

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería



Animatronics

Trabajo de graduación en modalidad de Megaproyecto presentado por:

Luis Alfonso Aguirre Pacay

Rodrigo José Jo Lau

para optar al grado académico de Licenciados en Ingeniería Electrónica; y

Javier Alexander Bolaños Chavac

Ana Rocío Debroy

Jose Ricardo Hegel Sánchez

Julio Javier Maldonado Barrios

para optar por el grado académico de Licenciados en Ingeniería Mecatrónica

Guatemala,

2016

Animatronics

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería



Animatronics

Trabajo de graduación en modalidad de Megaproyecto presentado por:

Luis Alfonso Aguirre Pacay

Rodrigo José Jo Lau

para optar al grado académico de Licenciados en Ingeniería Electrónica; y

Javier Alexander Bolaños Chavac

Ana Rocío Debroy

Jose Ricardo Hegel Sánchez

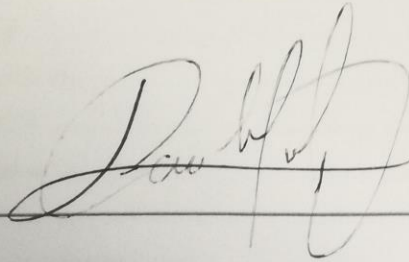
Julio Javier Maldonado Barrios

para optar por el grado académico de Licenciados en Ingeniería Mecatrónica

Guatemala,

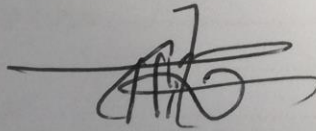
2016

(f)



Ing. Luis Montenegro
Coordinador Megapoyecto

(f)



M.Sc. Carlos Esquit
Director Ingeniería Electrónica y Mecatrónica

Fecha de aprobación: Guatemala, 28 de noviembre de 2016

ÍNDICE

LISTA DE CUADROS.....	xvi
LISTA DE FIGURAS.....	xx
RESUMEN	xxxiv
I. INTRODUCCIÓN	1
II. OBJETIVOS	4
A. Objetivo general.....	4
B. Objetivos específicos	4
III. JUSTIFICACIÓN	5
A. ¿Por qué construir un animatrónico?	5
B. La gran limitante de los animatrónicos	6
C. Verdadero costo de los animatrónicos	7
IV. MARCO TEÓRICO	8
A. Parque temático Xetulul.....	8
1. ¿Qué es el IRTRA?	8
2. ¿Qué es el Xetulul?	8
B. Castillo de San Felipe	9
1. Historia del Castillo de San Felipe.....	9
2. Sitio turístico.	10
C. ¿Qué es un animatrónico?.....	10
1. Historia de los animatrónicos.	11
2. Diseño, construcción e instalación de un animatrónico.	13
3. Mecánica de un animatrónico.....	13
4. Electrónica de un animatrónico.....	15
5. Programación de un animatrónico.....	16
6. Tematización de un animatrónico.	16
D. Actuadores	17
1. Actuadores neumáticos.	17
2. Actuadores hidráulicos.	18
3. Actuadores eléctricos.	19
4. Comparación entre los tipos de actuadores	20
E. Transformación de movimiento radial en lineal	20
1. Piñón-cremallera	21

2.	Biela manivela.....	21
3.	Mecanismo de tornillo-tuerca.....	22
4.	Leva-émbolo, excéntrica embolo.....	22
5.	Cigüeñal.....	23
6.	Tornillo sinfín-rueda dentada.....	24
F.	Convertidores de voltaje DC-DC.....	24
1.	Convertidor tipo buck.....	25
2.	Convertidor tipo boost.....	25
3.	Reguladores lineales.....	26
4.	Otros tipos de convertidores.....	27
G.	Controladores lógicos.....	28
1.	Autómatas programables.....	29
2.	Microcontroladores.....	30
3.	Otras alternativas.....	32
H.	Procesos de manufactura.....	33
1.	Impresión 3D.....	33
a.	Filamentos de impresión 3D.....	34
	Corte láser.....	37
I.	Esqueleto de la cabeza y cuello.....	37
1.	Partes, esqueleto y articulaciones de la cabeza.....	37
2.	Partes, articulaciones y esqueleto del cuello.....	39
J.	Movimientos de la cabeza y cuello.....	42
1.	Flexión.....	42
2.	Extensión.....	42
3.	Inclinación y rotación.....	42
4.	Movimiento de mandíbula.....	43
K.	Partes y movimientos del ojo humano.....	44
1.	Partes principales del ojo.....	44
2.	Movimientos del ojo.....	45
3.	Significado de la posición de los ojos.....	46
L.	Fisiología y biomecánica del brazo humano.....	47
1.	Planos y ejes del movimiento humano.....	47
2.	Mano humana.....	48
3.	Antebrazo humano.....	52
4.	Brazo humano.....	54
M.	Anatomía del torso humano.....	56

1.	Movimiento de flexión y extensión.....	56
2.	Movimiento de inclinación lateral.....	57
3.	Movimiento de rotación.....	58
4.	Movimiento de circunducción.....	59
N.	Análisis de esfuerzos por elementos finitos.....	60
O.	Sistemas de control.....	62
1.	Sistemas a lazo abierto.....	63
2.	Sistemas de lazo cerrado.....	63
P.	Principios básicos de un servo motor.....	64
Q.	Actuadores utilizados.....	65
1.	Dynamixel MX-106T.....	65
2.	MG996R.....	67
R.	Comunicación serial.....	69
1.	Estándar de la interfaz del puerto serial.....	69
2.	Conexión serial entre dos dispositivos.....	69
3.	Estados de señal.....	70
4.	Formato de datos seriales.....	71
5.	Comunicación síncrona y asíncrona.....	71
6.	Transmisión de bits de información.....	72
S.	Arduino mega 2560.....	73
1.	Dynamixel for Arduino.....	73
2.	Interfaz serial de Arduino.....	75
T.	Matlab.....	76
U.	Reguladores de voltaje.....	76
1.	Regulador lineal básico.....	77
V.	Optoacopladores.....	78
1.	Diseño de optoacopladores.....	78
2.	Características de conmutación.....	79
W.	Respuesta humana a saludos sociales.....	80
1.	La Ciencia Social de los saludos.....	81
2.	Observación y la decisión de saludar.....	81
3.	Distancia del saludo.....	81
4.	El acercamiento.....	82
5.	Acercamiento final.....	83
6.	Saludo cercano.....	83
X.	Sensores de detección.....	84

1.	Gestos.....	84
a.	Cámaras RGB.....	84
b.	Cámaras IR.....	85
1)	Infrarrojo.....	85
c.	APDS-9960.....	86
1)	Características.....	87
2)	Aplicaciones.....	87
d.	WiiMote.....	88
2.	Audio y voz.....	89
a.	Micrófonos direccionales.....	89
1)	Omnidireccionales.....	89
2)	Unidireccionales.....	89
3)	Bidireccionales.....	90
3.	PlayStation Move & Eye.....	90
4.	Kinect for Windows.....	92
a.	Emisor infrarrojo (IR).....	92
b.	Sensor de profundidad IR.....	93
c.	Cámara RGB.....	93
d.	Motor de inclinación y acelerómetro de tres ejes.....	93
e.	Arreglo de micrófonos.....	94
Y.	IDE (Entorno de Desarrollo Integrado).....	95
1.	SPYDER.....	95
a.	Python.....	95
2.	Processing.....	95
a.	SimpleOpenNI.....	96
b.	OpenNI.....	96
3.	Microsoft Visual Basic.....	97
a.	C#.....	97
Z.	NUI (Natural User Interface).....	98
1.	Rastreo de esqueleto (Skeleton Tracking).....	98
2.	Reconocimiento de audio.....	100
a.	Procesamiento de audio.....	101
b.	Reconocimiento de voz.....	102
c.	Microsoft Speech Application Programming Interface (SAPI).....	103
3.	SDK de Kinect for Windows 1.8.....	104
a.	Requerimientos.....	104

b.	Características	104
AA.	¿Qué es un actuador neumático flexible?.....	104
1.	Deducción del modelo matemático.	105
2.	Funcionamiento del sistema de pruebas.	108
V.	ANTECEDENTES	115
A.	Cabezas animatrónicas/robóticas	115
1.	Cabeza animatrónica desarrollada por la Worcester Polytechnic Institute.....	116
2.	Cabeza animatrónica desarrollada por la Universidad de San Buenaventura.....	117
3.	Kobian.....	117
4.	Kismet.....	118
5.	Cabeza animatrónica diseñada en la University of Skövde.....	119
6.	3 Axis Skull.....	120
7.	InMoov.....	120
B.	Otros proyectos	121
VI.	MÓDULO CALAVERA ANIMATRÓNICA	124
A.	Resumen	124
B.	Introducción.....	125
C.	Objetivos.....	127
1.	General	127
2.	Específicos	127
D.	Mecánica.....	127
1.	Metodología.	127
2.	Movimientos y grados de libertad.....	128
a.	Movimiento de ojos.....	129
b.	Movimiento de boca.....	130
c.	Movimiento de cuello.....	130
d.	Movimiento del cofre.....	131
3.	Elección de actuadores.....	131
a.	Movimiento de ojos.....	132
b.	Movimiento de boca.....	133
c.	Movimiento de cuello.....	133
d.	Movimiento de cofre.....	134
4.	Mecanismos.....	135
a.	Calavera a utilizar.....	135
b.	Mecanismo de los ojos y boca.....	135
c.	Mecanismo del cuello.....	137

d.	Mecanismo de apertura/cierre del cofre.	140
e.	Mecanismo completo.	143
5.	Análisis de esfuerzos.	144
6.	Manufactura.	147
a.	Elección de procesos de manufactura.	147
b.	Elección de materiales.	150
7.	Ensamblaje.	153
a.	Modificaciones a la calavera.	153
b.	Ensamblaje del mecanismo de los ojos y boca.	154
c.	Ensamblaje del mecanismo del cuello.	155
d.	Ensamblaje del mecanismo del cofre.	157
8.	Correcciones.	158
9.	Pruebas de movimiento.	159
E.	Potencia.	161
1.	Metodología.	161
2.	Alimentación general.	161
3.	Regulación de tensión.	163
a.	Tipo de regulador.	163
b.	Selección de componentes.	163
4.	Aislamiento de señales.	165
5.	PCB.	167
a.	Esquemático.	167
b.	Diseño de PCB.	170
c.	Maquinado.	173
d.	Soldadura.	174
6.	Conexión de componentes.	174
F.	Control.	176
1.	Metodología.	176
2.	Controlador lógico.	176
3.	Pruebas de control sobre los actuadores.	178
a.	Señal de control para un servomotor.	178
b.	Interfaz controlador-servomotor.	179
4.	Sistema de control.	179
a.	Naturaleza del sistema.	180
b.	Sistema de control implementado.	182
5.	Pruebas y correcciones.	182

G.	Análisis de costos.....	183
1.	Costo del animatrónico.....	183
2.	Precio de un animatrónico.....	186
3.	Comparación.....	187
VII.	MÓDULO DE TORSO ANIMATRÓNICO.....	189
A.	Resumen.....	189
B.	Introducción.....	189
C.	Objetivos.....	190
1.	General.....	190
2.	Específicos.....	190
D.	Metodología.....	191
E.	Análisis estructural.....	192
1.	Poppy Robot.....	192
2.	Inmoov.....	194
3.	Selección de diseño humanoide para torso.....	195
4.	Estructura del torso basado en Inmoov.....	196
5.	Mecanismo de rotación del torso.....	200
6.	Fuerza y torque necesario para rotación del torso.....	203
7.	Análisis de esfuerzos.....	207
F.	Selección de actuadores.....	215
G.	Manufactura y construcción de estructura mecánica.....	219
1.	Impresión 3D.....	219
2.	Corte láser.....	227
3.	Ensamble de la estructura completa.....	230
H.	Diseño e implementación de control.....	231
I.	Costos.....	235
J.	Pruebas e integración.....	236
VIII.	MÓDULO BRAZO.....	239
A.	Resumen.....	239
B.	Introducción.....	239
C.	Metodología.....	240
1.	Calendarización.....	242
D.	Análisis estructural y de mecanismos.....	242
1.	Poppy Robot.....	244
2.	Inmoov.....	245
3.	Comparación y selección entre Poppy Robot e Inmoov.....	246

4.	Mecanismos utilizados por el humanoide Inmoov.....	248
E.	Selección de actuadores.....	272
1.	Actuadores con mayor capacidad de torque.....	273
2.	Actuadores con mayor capacidad de respuesta veloz.....	277
F.	Manufactura y construcción de estructura mecánica.....	279
1.	Manufactura y selección de material para estructura mecánica.....	279
2.	Construcción de estructura mecánica.....	286
G.	Diseño e implementación de subrutinas para movimiento.....	304
1.	Dedos de mano y muñeca.....	305
2.	Codo.....	307
3.	Hombro.....	309
H.	Pruebas e integración.....	311
I.	Costos.....	314
1.	Material de manufactura.....	314
2.	Actuadores.....	314
3.	Análisis y resultados de costos.....	315
IX.	MÓDULO DE RECONOCIMIENTO DE GESTOS Y AUDIO.....	317
A.	Resumen.....	317
B.	Introducción.....	317
C.	Objetivos.....	318
1.	General.....	318
2.	Específicos.....	318
D.	Metodología.....	318
1.	Selección de sensores.....	318
2.	Selección de lenguaje de programación.....	320
3.	Configuración de sensor Kinect y entorno de programación.....	323
4.	Implementación y desarrollo de algoritmo de reconocimiento.....	324
E.	Resultados.....	330
1.	Primeras pruebas reconocimiento de gestos y audio.....	330
2.	Reconocimiento de audio.....	331
3.	Reconocimiento de gestos.....	333
F.	Análisis de resultados.....	340
X.	MÓDULO DE POTENCIA E INTERACCIÓN HUMANA.....	346
A.	Resumen.....	346
B.	Introducción.....	346
C.	Objetivos.....	347

1.	Generales.....	347
2.	Específicos	347
D.	Diseño experimental	347
E.	Resultados.....	348
1.	Selección de plataformas.....	348
2.	Configuración de la plataforma.....	349
3.	Configuración de motores Dynamixel.....	350
4.	Selección de componentes.	351
5.	Diseño de circuitos de aislamiento eléctrico.	354
6.	Desarrollo del algoritmo en Arduino.....	356
7.	Integración Matlab-Arduino.....	360
8.	Diseño y construcción de circuitos impresos.	363
9.	Pruebas e integración.	367
XI.	CARACTERIZACIÓN DE ACTUADORES NEUMÁTICOS FLEXIBLES.....	377
A.	Resumen	377
B.	Introducción.....	377
C.	Objetivos.....	378
1.	General	378
2.	Específicos	378
D.	Metodología.....	379
1.	Resumen.....	379
2.	Ensayos de tiempo.....	379
3.	Ensayos de carga.	380
4.	Ensayos destructivos.	382
5.	Mediciones de fuerza.	382
E.	Resultados.....	384
1.	Provenientes de los ensayos de tiempo	384
2.	Provenientes de los ensayos de carga.....	386
3.	Provenientes de la ecuación matemática	387
4.	Provenientes de los ensayos destructivos	387
5.	Provenientes de las mediciones de fuerza	389
F.	Análisis de resultados	391
XII.	CONCLUSIONES GENERALES	396
XIII.	RECOMENDACIONES GENERALES	401
XIV.	BIBLIOGRAFÍA.....	404
XV.	ANEXOS	416

A.	Especificaciones del Tower Pro Micro Servo	416
B.	Especificaciones del Tower Pro MG995	417
C.	Especificaciones de Mabuchi FC-280ST-18180, 9-15V DC motor.....	418
D.	Especificaciones del Servo HK 15268A.....	419
E.	Especificaciones de Nextrox DC Motor	419
F.	Especificaciones de NEMA 17 Stepper Motor	420
G.	Especificaciones del regulador LM7805.....	421
H.	Especificaciones del regulador de voltaje LM1084	422
I.	Especificaciones del módulo de regulación de voltaje LM2596.....	423
J.	Especificaciones del módulo regulador de voltaje XL4005	424
K.	Especificaciones del regulador de voltaje LM317T.....	425
L.	Especificaciones del optoacoplador PT817	426
M.	Especificaciones del switch digital CD4066.....	427
N.	Especificaciones de relay	428
O.	Especificaciones del PIC16F887	430
P.	Especificaciones de LOGO! 24CE	431
Q.	Especificaciones del AtMega1280.....	432
R.	Especificaciones de la Raspberry Pi 2	433
S.	Especificaciones del actuador lineal LACT4P.....	434
T.	Código implementado en arduino para controlar el brazo	434
U.	Código implementado en Arduino para controlar la rotación del torso	436
V.	Base de datos palabras y frases reconocidas	439
W.	Resultados pruebas reconocimiento audio	440
X.	Resultados pruebas reconocimiento de gestos	452
Y.	Repositorio de código de programación	463
Z.	Tabla comparativa de plataformas arduino	463
AA.	Código en Arduino.....	463
BB.	Rutina principal de código en Matlab	469
CC.	Función MoverMotores del código en Matlab.....	471
DD.	Programa para ensayos de funcionamiento.....	472

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Cuadro comparativo de los tipos de actuadores.....	20
Cuadro 2. Principales diferencias entre filamento ABS y PLA.....	36
Cuadro 3. Límites de la mano humano y articulaciones de los dedos	50
Cuadro 4. Características físicas de los Dynamixel MX-106T	66
Cuadro 5. Características dinámicas de los Dynamixel MX-106T.....	67
Cuadro 6. Características físicas de los Towerpro MG996R.....	68
Cuadro 7. Características dinámicas de los Towerpro MG996R.....	68
Cuadro 8. Especificaciones técnicas del microcontrolador Arduino Mega	73
Cuadro 9. Instrucciones para realizar acciones	74
Cuadro 10. Instrucciones para realizar configuraciones.....	75
Cuadro 11. Instrucciones para monitoreo.....	75
Cuadro 12. Requisitos SDK	104
Cuadro 13. Estudio de caso de elección de actuadores.	132
Cuadro 14. Estudio de caso de elección de motores para el movimiento de ojos	132
Cuadro 15. Estudio de caso de elección de motores para el movimiento de boca.....	133
Cuadro 16. Estudio de caso de elección de motores para el movimiento de cuello.	134
Cuadro 17. Estudio de caso de elección de motores para el movimiento de cofre.	134
Cuadro 18. Tipo de mecanismo para transformación de movimiento radial a movimiento lineal.	141
Cuadro 19. Análisis de torque exigido a los actuadores de los distintos mecanismos.....	146
Cuadro 20. Estudio de caso de selección de material para proceso de impresión 3D.	150
Cuadro 21. Estudio de caso de selección de material para proceso de corte láser.....	151
Cuadro 22. Requerimientos de potencia de los actuadores elegidos.	161
Cuadro 23. Estudio de caso de elección de fuente de poder para los componentes del animatrónico.....	162
Cuadro 24. Estudio de caso de selección de tipo de etapa de regulación.	163
Cuadro 25. Estudio de caso de selección de regulador de 5V.	164
Cuadro 26. Estudio de caso de selección de regulador de 7.2V.	165
Cuadro 27. Estudio de caso de selección de elemento para aislar las señales.	166
Cuadro 28. Estudio de caso de selección de controlador lógico.....	177
Cuadro 29. Error del sistema para distintos actuadores.....	181
Cuadro 30. Error del sistema para distintos actuadores.....	181
Cuadro 31. Tiempos para obtener un error menor a 3% para los servomotores del sistema.	181
Cuadro 32. Especificaciones de funcionamiento de cada motor en los distintos mecanismos.	183
Cuadro 33. Costo total del animatrónico.	184

Cuadro 34. Cronograma del desarrollo del proyecto.....	191
Cuadro 35. Comparación entre el torso de Poppy Robot e Inmoov	195
Cuadro 36. Parámetros del tornillo sinfín y engrane del mecanismo de rotación del Inmmov	202
Cuadro 37. Fuerzas y momentos externos aplicados al torso	204
Cuadro 38. Densidad de materiales utilizados en estructura del torso	205
Cuadro 39. Propiedades físicas del torso.....	205
Cuadro 40. Fuerzas y momentos resultantes obtenidos en la simulación de Inventor Professional	205
Cuadro 41. Configuración del mallado.....	207
Cuadro 42. Propiedades de los materiales utilizados en la simulación5.....	207
Cuadro 43. Resumen de análisis de estático del torso	210
Cuadro 44. Cargas aplicadas para simulación del mecanismo de rotación	212
Cuadro 45. Fuerzas y momentos de reacción en el sinfín	215
Cuadro 46. Resumen de análisis estático del mecanismo de rotación.....	215
Cuadro 47. Características de servomotores evaluados.....	216
Cuadro 48. Factor de peso de las características evaluado para los actuadores.....	216
Cuadro 49. Variables normalizadas.....	217
Cuadro 50. Matriz de decisión de los servomotores considerando precio.....	217
Cuadro 51. Matriz de decisión sin considerar el precio de los servomotores	218
Cuadro 52. Propiedades físicas de ABS y PLA.....	220
Cuadro 53. Criterios de comparación para ABS y PLA	220
Cuadro 54. Piezas requeridas para el estómago superior	221
Cuadro 55. Piezas requeridas para el estómago superior	224
Cuadro 56. Propiedades físicas del MDF	228
Cuadro 57. Piezas requeridas para el torso.....	228
Cuadro 58. Valores de calibración para conversión a grados del ADC.....	232
Cuadro 59. Variables utilizadas en Arduino para el control del motor	234
Cuadro 60. Costos de materiales utilizados para construcción de torso animatrónico.	235
Cuadro 61. Calendarización de proyecto.....	242
Cuadro 62. Articulaciones mecánicas y sus grados de libertad.	243
Cuadro 63. Criterios de evaluación entre Poppy Robot e Inmoov.	246
Cuadro 64. Tabla de masas y pesos de los antebrazos.	254
Cuadro 65. Resultados de par torso máximo para mecanismos tornillo de potencia.....	256
Cuadro 66. Tabla de masas y pesos de brazos completos.	259
Cuadro 67. Resultados de par torso máximo para mecanismos tornillo de potencia.....	260
Cuadro 68. Resultados para análisis de esfuerzos para la estructura del antebrazo.....	262
Cuadro 69. Resultados para el factor de seguridad de la estructura del antebrazo	262

Cuadro 70. Resultados para análisis de esfuerzos para la estructura del antebrazo.....	263
Cuadro 71. Resultados para el factor de seguridad de la estructura del antebrazo	264
Cuadro 72. Resultados para análisis de esfuerzos para mecanismo de tornillo de potencia del codo.	265
Cuadro 73. Resultados para el factor de seguridad para mecanismo de tornillo de potencia del codo.....	265
Cuadro 74. Resultados para análisis de esfuerzos para la estructura del hombro.....	266
Cuadro 75. Resultados para el factor de seguridad de la estructura del hombro	266
Cuadro 76. Resultados para análisis de esfuerzos para mecanismo de tornillo sinfín del hombro.....	268
Cuadro 77. Resultados para el factor de seguridad para mecanismo de tornillo sinfín del hombro	268
Cuadro 78. Tabla de factor de peso para criterios en la selección de actuadores.	273
Cuadro 79. Matriz de características para selección de servos de los dedos.	273
Cuadro 80. Matriz de decisión para selección de servos de los dedos.	274
Cuadro 81. Matriz de características para selección de servos del codo.	275
Cuadro 82. Matriz de decisión para selección de servomotores para mecanismo del codo.	275
Cuadro 83. Matriz de características para selección de servos del codo.	276
Cuadro 84. Matriz de decisión para selección de servomotores para mecanismo del hombro.	276
Cuadro 85. Matriz de características para selección de servos de los dedos.	278
Cuadro 86. Matriz de decisión para selección de servos de los dedos.	278
Cuadro 87. Matriz de características para selección de servos del codo.	279
Cuadro 88. Matriz de decisión para selección de servomotores para mecanismo del codo.	279
Cuadro 89. Análisis de materiales ABS y PLA.	281
Cuadro 90. Repetier Host para mano y antebrazo con cantidad de filamento y tiempo estimado.....	283
Cuadro 91. Tabla obtenida de Repetier Host para muñeca con cantidad de filamento y tiempo estimado.	284
Cuadro 92. Tabla obtenida de Repetier Host para bíceps con cantidad de filamento y tiempo estimado.	284
Cuadro 93. Tabla obtenida de Repetier Host para hombro con cantidad de filamento y tiempo estimado.	285
Cuadro 94. Tabla de rango de posición de cada dedo.	305
Cuadro 95. Tabla de rango de posición de cada dedo.	307
Cuadro 96. Tabla de rango de posición de articulación codo.	308
Cuadro 97. Tabla de rango de posición de articulación hombro.	309
Cuadro 98. Tabla de costo de material de impresión.....	314
Cuadro 99. Tabla de costo de actuadores utilizados.	315
Cuadro 100. Tabla de costo de actuadores recomendados.	315
Cuadro 101. Variables de interés, reconocimiento de gestos	326
Cuadro 102. Base de datos inicial palabras a reconocer.....	331
Cuadro 103. Pruebas reconocimiento de palabras en base de datos	332
Cuadro 104. Resumen pruebas de confiabilidad, reconocimiento de voz a diferentes distancias	333
Cuadro 105. Base de datos gestos a reconocer	333

Cuadro 106. Resumen 1 pruebas de reconocimiento de gestos a diferentes distancias	336
Cuadro 107. Resumen 2 pruebas de reconocimiento gestos a diferentes distancias.....	337
Cuadro 108. Pruebas medidas entre hombros a 1.5 metros del sensor	339
Cuadro 109. Tiempos para los actuadores con 2.5 kg de carga y presiones varias.	385
Cuadro 110. Cargas teóricas (derivadas de la ecuación 13) contra cargas reales utilizadas.....	386
Cuadro 111. Resumen numérico de los ensayos de carga para el actuador de 0.15 m.	386
Cuadro 112. Resumen numérico de los ensayos de carga para el actuador de 0.20 m.	386
Cuadro 113. Resumen numérico de los ensayos de carga para el actuador de 0.25 m.	386
Cuadro 114. Resultados teóricos para varios actuadores neumáticos flexibles.....	387
Cuadro 115. Comparación de fuerzas, generadas por un actuador de 0.15 m.	389
Cuadro 116. Comparación de fuerzas, generadas por un actuador de 0.15 m.	390
Cuadro 117. Base de datos palabras a reconocer.....	439
Cuadro 118. Prueba 1, frase: “Mi nombre es Marla”.	440
Cuadro 119. Prueba 2, frase: “Mi nombre es Chito”.	441
Cuadro 120. Prueba 3, frase: “Mi nombre es Hoppy”.	442
Cuadro 121. Prueba 4, frase: “Mi nombre es Raúl”.	443
Cuadro 122. Prueba 5, frase: “Mi nombre es Pedro”	445
Cuadro 123. Prueba 6, frase: “Mi nombre es Ana”.	446
Cuadro 124. Prueba 7, frase: “Mi nombre es Pérez”.	447
Cuadro 125. Prueba 8, frase: “Mi nombre es Waleska”.	448
Cuadro 126. Prueba 9, frase: “Mi nombre es Cristian”.	449
Cuadro 127. Prueba 10, frase: “Mi nombre es Luis”.	450
Cuadro 128. Prueba 11, frase: “Mi nombre es Mónica”.	451
Cuadro 129. Prueba 1, reconocimiento gestos.	452
Cuadro 130. Prueba 2, reconocimiento gestos.	453
Cuadro 131. Prueba 3, reconocimiento gestos.	454
Cuadro 132. Prueba 4, reconocimiento gestos.	455
Cuadro 133. Prueba 5, reconocimiento gestos.	456
Cuadro 134. Prueba 6, reconocimiento gestos.	457
Cuadro 135. Prueba 7, reconocimiento gestos.	458
Cuadro 136. Prueba 8, reconocimiento gestos.	459
Cuadro 137. Prueba 9, reconocimiento gestos.	460
Cuadro 138. Prueba 10, reconocimiento gestos.....	461
Cuadro 139. Prueba 11, reconocimiento gestos.....	462

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Pirata animatrónico construído.	xxxiv
Figura 2. Músculo neumático.	xxxv
Figura 3. Calavera animatrónica.....	xxxv
Figura 4. Garner Holt con un animatrónico desarrollado por Garner Holt Productions.	1
Figura 5. Atracción inspirada en el Castillo de San Felipe ubicada en Xetulul.....	3
Figura 6. Interior de la atracción inspirada en el Castillo de San Felipe.	3
Figura 7. Animatrónico de un dinosaurio utilizado en Jurassic Park	5
Figura 8. Johnny Depp con su animatrónico.	5
Figura 9. Marioneta electrónica de la película “E.T., el extraterrestre”.	6
Figura 10. Animatrónico inspirado en Abraham Lincoln.....	7
Figura 11. Gráfico con los logos de los parques de recreación del IRTRA.....	8
Figura 12. Mapa general del parque temático Xetulul.....	9
Figura 13. Castillo de San Felipe en la actualidad.....	10
Figura 14. Animatrónicos ubicados en Chuck. E. Cheese.....	11
Figura 15. Animatrónico utilizado en la saga de películas de los Hombres de Negro.	11
Figura 16. Figura representativa del autómatas conocido como El Turco.	12
Figura 17. Reloj “cuckoo” creado en el siglo XVII.....	12
Figura 18. Animatrónico utilizado en la película Mary Poppins.	13
Figura 19. Proceso de construcción de un animatrónico.	13
Figura 20. Mecanismos de un animatrónico antropomórfico.	14
Figura 21. Mecanismo de transformación de movimiento radial a lineal.....	14
Figura 22. Mecanismo encargado de imitar el movimiento de un brazo humano.	15
Figura 23. Mandíbula de un cocodrilo animatrónica, accionada por actuadores neumáticos.....	15
Figura 24. Representación de un puente H.....	15
Figura 25. Dinosaurio animatrónico luego de haber sido tematizado.	16
Figura 26. Pistón neumático.	17
Figura 27. Sistema neumático básico.	18
Figura 28. Sistema hidráulico básico.....	19
Figura 29. Ejemplos de motores eléctricos.....	19
Figura 30. Tricket, ejemplo de transformación de movimiento radial a movimiento lineal.....	20
Figura 31. Figura de transformación de movimiento utilizando un mecanismo de piñón-cremallera.....	21
Figura 32. Mecanismo de biela manivela utilizado en una máquina de coser.....	22
Figura 33. Ejemplo de aplicación de mecanismo tornillo-tuerca	22
Figura 34. Componentes de un sistema leva-émbolo.	23

Figura 35. Comparación entre un sistema leva-émbolo y uno excéntrica-émbolo.	23
Figura 36. Representación del funcionamiento de un cigüeñal.	24
Figura 37. Clavija de una guitarra, mecanismo de tornillo sinfín-rueda dentada.	24
Figura 38. Topología básica de un regulador tipo buck.	25
Figura 39. Topología básica de un convertidor tipo buck.	25
Figura 40. Topología básica de un convertidor tipo boost.	26
Figura 41. Circuito de aplicación de un regulador 7805.	26
Figura 42. Módulo de regulación de voltaje, utilizando el integrado LM2596.	27
Figura 43. Circuito convertidor de voltaje 12V-24V.	27
Figura 44. Topología básica de un aislamiento de señales utilizando un relay.	28
Figura 45. Clasificación de controladores lógicos.	28
Figura 46. Diagrama básico de un PLC:.....	29
Figura 47. Controlador lógico LOGO.	30
Figura 48. Arquitectura básica de un microcontrolador.	30
Figura 49. Arquitectura básica de un microcontrolador.	31
Figura 50. Aplicaciones de los microcontroladores.	31
Figura 51. Esquema básico de una Raspberry Pi.....	33
Figura 52. Proceso de fabricación por medio de impresión 3D.....	34
Figura 53. Proceso de fabricación por medio de impresión 3D.....	34
Figura 54. Comparación de acabados entre ABS y PLA.....	36
Figura 55. Proceso de corte láser.....	37
Figura 56. Huesos de la cabeza humana.	38
Figura 57. Ubicación de la mandíbula en el cráneo humano.	38
Figura 58. Partes de la mandíbula.	39
Figura 59. Límites superiores e inferiores del cuello.	39
Figura 60. Regiones del cuello.	40
Figura 61. Regiones de la columna vertebral.	40
Figura 62. Ubicación de las vértebras atlas y axis.....	40
Figura 63. Partes del Atlas y Axis.	41
Figura 64. Representación del movimiento de flexión.	42
Figura 65. Representación del movimiento de extensión.	42
Figura 66. Representación del movimiento de rotación e inclinación.....	43
Figura 67. Movimientos mandibulares.....	43
Figura 68. Rotación (izquierda) y traslación (derecha) producida en la apertura y cierre de mandíbula.	43
Figura 69. Partes del ojo.....	44
Figura 70. Estructura muscular del ojo humano.	45

Figura 71. Mantenimiento de la mirada.....	45
Figura 72. Significado de la mirada.	46
Figura 73. Planos y ejes del movimiento humano.....	47
Figura 74. Estructura ósea de la mano.....	48
Figura 75. Falanges y articulaciones del dedo índice.....	49
Figura 76. Tendones y músculos del dedo índice.....	50
Figura 77. Tendones y ligamentos de la mano.	51
Figura 78. Movimientos de flexión y extensión en articulación de muñeca.....	51
Figura 79. Movimientos de abducción y aducción en articulación de muñeca.	52
Figura 80. Esqueleto del brazo.	52
Figura 81. Movimiento de la articulación en la imagen a y b.	53
Figura 82. Movimiento de supinación y pronación.	54
Figura 83. Movimiento biomecánico del hombro de flexión y extensión.	55
Figura 84. Movimiento biomecánico del hombro de abducción y aducción.	55
Figura 85. Movimientos de flexión y extensión del tronco	57
Figura 86. Movimiento de inclinación lateral	58
Figura 87. Movimiento de rotación	59
Figura 88. Músculos utilizados para los movimientos de columna	60
Figura 89. Discretización de elemento mecánico. a) Elemento continuo b) Elemento discretizado	61
Figura 90. Análisis de esfuerzo utilizando generación de mallas automática	62
Figura 91. Esquema simplificado de un sistema de control	63
Figura 92. Sistema de control de lazo abierto	63
Figura 93. Sistema de lazo cerrado.....	64
Figura 94. Estructura interna de un servo motor	65
Figura 95. Asignación de pines para conectores de la serie MX de Dynamixel.....	66
Figura 96. Conexión en serie de actuadores de la serie MX de Dynamixel	66
Figura 97. Diagrama con dimensiones de los Dynamixel MX-106T	67
Figura 98. Diagrama con dimensiones de los Towerpro MG996R	68
Figura 99. Conexión con cable recto entre un DTE y un DCE	70
Figura 100. Conexión con cable cruzado de dos DTE	70
Figura 101. Estados de una señal de datos y una señal de control.....	71
Figura 102. Formato de datos seriales	71
Figura 103. Arduino Mega	73
Figura 104. Diagrama de funcionamiento de un regulador lineal	77
Figura 105. Aplicación básica de un optoacoplador.....	78
Figura 106. Chip con diseño de transmisor y receptor en línea.....	79

Figura 107. Chip con diseño de transmisor y receptor cara a cara	79
Figura 108. Circuito de un optoacoplador	79
Figura 109. Señal de entrada y salida en optoacoplador.....	80
Figura 110. Ejemplo cámara RGB	84
Figura 111. Espectro electromagnético	85
Figura 112 APDS-9960.....	86
Figura 113 Wii y Wii Remote	88
Figura 114. Respuesta polar micrófonos omnidireccionales	89
Figura 115. Respuesta polar micrófonos unidireccionales	90
Figura 116. Respuesta polar micrófonos bidireccionales	90
Figura 117. PlayStation Eye	91
Figura 118. PlayStation Move	91
Figura 119. Partes Kinect for Windows	92
Figura 120. Rango de vista Kinect for Windows	93
Figura 121. Rango de vista con inclinación Kinect for Windows	94
Figura 122. Rango de entrada de audio Kinect for Windows.....	94
Figura 123. Segmentación de cuerpo humano.....	99
Figura 124. Articulaciones reconocidas en modo normal	100
Figura 125. Articulaciones reconocidas en modo sentado	100
Figura 126. Arreglo de micrófonos Kinect for Windows	101
Figura 127. Función SAPI en reconocimiento de voz.....	103
Figura 128. Funcionamiento básico de un actuador neumático flexible.	105
Figura 129. Modelo teórico de un actuador neumático flexible.	106
Figura 130. Triángulo recto resultante de la modelación teórica.	107
Figura 131. Ángulo formado entre una fibra de la malla externa y la formada por el tubo interno.	108
Figura 132. Cámara de ensayos destructivos.....	109
Figura 133. Sistema neumático empleado en todos los ensayos de funcionamiento.....	109
Figura 134. Configuración del interruptor fotoeléctrico en la cámara de ensayos destructivos.	110
Figura 135. Sistema completo para el interruptor fotoeléctrico.	110
Figura 136. Electroválvulas empleadas para el sistema neumático.....	111
Figura 137. Escudo de relevadores para la protección del microcontrolador.	111
Figura 138. Lógica para los ensayos de tiempo.....	112
Figura 139. Lógica para los ensayos destructivos.	112
Figura 140. Lógica para los ensayos de carga.	113
Figura 141. Sensor de fuerza “PASCO”.....	113
Figura 142. Interfaz móvil “PASCO”.	114

Figura 143. Mecanismo utilizado para la movilización del cuello.	116
Figura 144. Mecanismo en el cuello utilizado.	116
Figura 145. Ensamblaje final.	116
Figura 146. Mecanismo utilizado para movilizar el ojo.	117
Figura 147. Proceso de construcción de la máscara del animatrónico.	117
Figura 148. Robot Kobian.	117
Figura 149. Robot Kobian.	118
Figura 150. Grados de libertad del robot Kosbian.	118
Figura 151. Robot Kismet.	118
Figura 152. Algunas emociones transmitidas con el robot Kismet.	119
Figura 153. Mecanismo de cuello y ojos luego de ser ensamblados.	119
Figura 154. Construcción de una 3 Axis Skull.	120
Figura 155. Calaveras animatrónicas.	120
Figura 156. InMoov.	121
Figura 157. InMoov.	121
Figura 158. Mecanismo de ojos diseñado por el usuario Micropuller de Thingiverse.	122
Figura 159. Mecanismo de ojos diseñado por Polymaker_3D, usuario de thigiverse.	122
Figura 160. Robot emocional diseñado por el usuario cjwu382 de Thingiverse.	122
Figura 161. Mecanismo de cuello diseñado por James Bruton.	123
Figura 162. Fotografía del animatrónico terminado.	124
Figura 163. Garner Holt con un animatrónico desarrollado por Garner Holt Productions.	125
Figura 164. Atracción inspirada en el Castillo de San Felipe ubicada en Xetulul.	127
Figura 165. Metodología utilizada en el sub módulo de la parte mecánica del animatrónico.	128
Figura 166. Calavera animatrónica desarrollada por SkullTroniX.	129
Figura 167. Grados de libertad para cada ojo del animatrónico.	129
Figura 168. Movimientos de apertura y cierre de mandíbula.	130
Figura 169. Movimientos a representar en el cuello del animatrónico.	130
Figura 170. Movimiento de apertura/cierra del cofre.	131
Figura 171. Calavera utilizada como base para el proyecto.	135
Figura 172. Pruebas realizadas de diseños existentes de mecanismos de ojos.	135
Figura 173. Unión universal utilizada para movilizar los ojos.	136
Figura 174. Unión universal utilizada para el movimiento de los ojos.	136
Figura 175. Ubicación del servomotor encargado de la apertura/cierre de mandíbula.	137
Figura 176. Mecanismo ensamblado de movimiento de ojos y boca.	137
Figura 177. Unión universal utilizada para realizar el movimiento del cuello.	138
Figura 178. Unión universal utilizada para realizar el movimiento del cuello.	138

Figura 179. Mecanismo de movimiento de inclinación y flexión/extensión del cuello.....	139
Figura 180. Mecanismo final de movimiento del cuello.	139
Figura 181. Mecanismo de apertura/cierre del cofre pirata.....	140
Figura 182. Mecanismo de apertura/cierre del cofre pirata.....	140
Figura 183. Vista inferior del mecanismo de émbolos para subir la calavera.	141
Figura 184. Vista superior del mecanismo de émbolos para subir la calavera.	142
Figura 185. Mecanismo para subir la calavera ensamblado con mecanismo del cuello.....	142
Figura 186. Servo montado a la excéntrica diseñada para subir la calavera.....	142
Figura 187. Mecanismos acoplados.	143
Figura 188. Mecanismos acoplados.	143
Figura 189. Colocación de cargas distribuidas en el mecanismo del cuello.....	144
Figura 190. Colocación de uniones por elementos de fijación en el mecanismo del cuello.	144
Figura 191. Análisis de Von Mises realizado sobre el mecanismo del cuello.....	145
Figura 192. Análisis de deformación realizado sobre el mecanismo del cuello.....	145
Figura 193. Análisis de Von Mises realizado en el mecanismo del cuello.....	145
Figura 194. Impresoras 3D utilizadas para el proceso de manufactura.	147
Figura 195. Proceso de impresión 3D.	148
Figura 196. Piezas fabricadas por medio de impresión 3D.	148
Figura 197. Cortadora láser del departamento de electrónica de la Universidad.	149
Figura 198. Proceso de corte láser.....	149
Figura 199. Piezas realizadas con corte láser.	149
Figura 200. Rollo de ABS adquirido para proceso de impresión 3D.	150
Figura 201. Comparación entre piezas de PLA (rojas) y piezas de ABS (blancas).....	151
Figura 202. Piezas fabricadas con MDF.....	152
Figura 203. Piezas fabricadas con acrílico.	152
Figura 204. Interior de la calavera luego de realizar las modificaciones sobre la misma.....	153
Figura 205. Interior de la calavera luego de realizar las modificaciones sobre la misma.....	153
Figura 206. Exterior de la calavera luego de realizar las modificaciones sobre la misma.	154
Figura 207. Barras dentadas y juntas utilizadas para la transmisión de potencia.	154
Figura 208. Mecanismo de ojos y boca luego de ser ensamblados, vista lateral.	154
Figura 209. Mecanismo de ojos y boca ensamblados, vista superior.	155
Figura 210. Mecanismo de ojos y boca ensamblado visto desde el exterior.	155
Figura 211. Mecanismo del cuello luego de ser ensamblado.	155
Figura 212. Mecanismo del cuello luego de ser ensamblado con la parte trasera del cráneo.....	156
Figura 213. Mecanismo del cuello luego de ser ensamblado con la cabeza de la calavera.	156
Figura 214. Mecanismo para subir la calavera luego de ser ensamblado con el mecanismo del cuello.	156

Figura 215. Mecanismo para levantar el cofre luego de ser ensamblado.	157
Figura 216. Tapadera del cofre fabricada.	157
Figura 217. Mecanismo de la tapadera del cofre ensamblada a la tapadera del cofre.	157
Figura 218. Actuador lineal utilizado para levantar la calavera del cofre.	158
Figura 219. Nuevo mecanismo implementado para levantar la calavera del cofre pirata.	158
Figura 220. Pruebas de movimiento del cuello.	159
Figura 221. Pruebas de movimiento del cuello.	159
Figura 222. Pruebas de movimiento del cuello.	159
Figura 223. Pruebas de movimiento de la boca.	160
Figura 224. Pruebas de movimiento de los ojos.	160
Figura 225. Pruebas de movimiento de los ojos.	160
Figura 226. Pruebas de movimiento del cofre.	160
Figura 227. Metodología utilizada en el sub módulo de la parte de potencia del animatrónico.	161
Figura 228. Fuente de alimentación utilizada para los actuadores del sistema.	162
Figura 229. Esquemático de circuito de alimentación de componentes que utilizarán 5V.	164
Figura 230. Esquemático de circuito de alimentación de componentes que utilizarán 7.2V.	165
Figura 231. Circuito diseñado para el aislamiento de señales utilizando optoacopladores.	166
Figura 232. Esquemático de la etapa de regulación de 5V.	167
Figura 233. Esquemático de la etapa de regulación de 7.2V.	167
Figura 234. Esquemático de la etapa de aislamiento de señales.	168
Figura 235. Esquemático de las conexiones del microcontrolador.	168
Figura 236. Esquemático de las terminales para la conexión de los servomotores.	169
Figura 237. Esquemático de todos los circuitos del proyecto.	169
Figura 238. Componentes ubicados en el PCB, antes de realizar el trazado de conexiones.	170
Figura 239. Diseño del PCB luego de realizar las conexiones.	170
Figura 240. Vista superior del diseño del PCB.	171
Figura 241. Vista inferior del diseño del PCB.	171
Figura 242. Distintas partes del diseño PCB.	172
Figura 243. Vista 3D del diseño del PCB.	172
Figura 244. Máquina fresadora.	173
Figura 245. Proceso de maquinado del PCB.	173
Figura 246. Vista posterior del diseño del PCB.	173
Figura 247. Vista frontal del diseño del PCB.	174
Figura 248. Proceso de soldadura.	174
Figura 249. Empalmes en la conexión de los motores.	175
Figura 250. Diagrama unifilar de la conexión eléctrica.	175

Figura 251. Metodología utilizada en el sub módulo de la parte de control del animatrónico.	176
Figura 252. Distribución de pines del Arduino Mega.	177
Figura 253. Tipo de señal para controlar los servos convencionales.	178
Figura 254. Diagrama de bloques de un sistema de control a lazo abierto.	180
Figura 255. Diagrama de bloques de un sistema de control a lazo cerrado.	180
Figura 256. Diagrama de bloques del sistema de control del proyecto.	182
Figura 257. Calavera animatrónica desarrollada por Skulltronix.	186
Figura 258. Calavera animatrónica desarrollada por Skulltronix.	187
Figura 259. Comparación entre los cráneos de ambos animatrónicos.	188
Figura 260. Humanoide Poppy Robot	192
Figura 261. Diseño anatómico de Poppy Robot	193
Figura 262. Tronco ensamblado de Poppy Robot	193
Figura 263. Robot humanoide Inmoov	194
Figura 264. Mecanismo de Inmoov para rotación del torso	195
Figura 265. Vista isométrica del torso ensamblado	196
Figura 266. Vista frontal del torso ensamblado	197
Figura 267. Vista trasera del torso ensamblado	197
Figura 268. Vista lateral del torso ensamblado	198
Figura 269. Vista isométrica del estómago parte superior	198
Figura 270. Vista isométrica del estómago medio	199
Figura 271. Vista superior del estómago medio	199
Figura 272. Vista frontal del estómago medio	199
Figura 273. Vista isométrica del torso y estómago ensamblado	200
Figura 274. Transmisión con engranes rectos	200
Figura 275. Transmisión con tornillo sinfín	201
Figura 276. Nomenclatura de tornillo sinfín	201
Figura 277. Creación de mecanismo basado en los parámetros del Cuadro 36	203
Figura 278. Mecanismo de rotación de tornillo sinfín	203
Figura 279. Fuerzas y momentos generados por los brazos aplicados al torso	204
Figura 280. Área donde se calculó la fuerza resultante de la estructura	205
Figura 281. Radio eje del mecanismo de rotación	206
Figura 282. Esfuerzos de Von Mises del torso	208
Figura 283. Esfuerzos de Von Mises críticos del torso	208
Figura 284. Desplazamiento generado por las fuerzas aplicadas al torso	209
Figura 285. Desplazamiento crítico del tors	209
Figura 286. Factor de seguridad del torso	210

Figura 287. a) Esfuerzo-deformación materiales dúctiles b) Esfuerzo-deformación materiales frágiles	211
Figura 288. Simulación con cargas extremas	211
Figura 289. Torque aplicado al mecanismo de rotación.....	212
Figura 290. Esfuerzo de Von Mises para mecanismo de rotación.....	213
Figura 291. Esfuerzo de Von Mises crítico del mecanismo	213
Figura 292. Factor de seguridad del mecanismo de rotación	214
Figura 293. Sección con factor de seguridad mínimo	214
Figura 294. Impresión 3D, tecnología FFF	219
Figura 295. Engrane y eje de rotación del torso	222
Figura 296. Tornillo sinfín de mecanismo de transmisión de potencia	222
Figura 297. Montaje de mecanismo de rotación (sinfín) y motor Dynamixel MX-106	222
Figura 298. Montaje de mecanismo tornillo sinfín y engranaje	223
Figura 299. Tapa para montaje.....	223
Figura 300. Base del estómago superior.....	224
Figura 301. Soporte trasero del estómago superior	225
Figura 302. Soporte frontal del estómago superior	225
Figura 303. Conexión estómago superior- torso	225
Figura 304. Castigador eje de rotación - estómago superior	226
Figura 305. Eje de rotación y estómago superior ensamblados.....	226
Figura 306. Conexión estómago superior-torso y soporte trasero ensamblados.....	226
Figura 307. Conexión estómago superior-torso y soporte frontal ensamblados.....	227
Figura 308. Ensamble completo del estómago superior	227
Figura 309. Parte frontal del torso.....	228
Figura 310. Parte trasera del torso.....	229
Figura 311. Acoples para torso frontal y torso trasero	229
Figura 312. Ensamble parte frontal del torso y estómago superior	230
Figura 313. Ensamble parte trasera del torso y estómago superior	230
Figura 314. Ensamble completo del torso animatrónico	231
Figura 315. Sistema de control de lazo cerrado para rotación de torso	231
Figura 316. Potenciómetro insertado en el eje para medir rotación del torso.....	232
Figura 317. Motor Dynamixel y Arduino Uno.....	233
Figura 318. Diagrama de flujo para control de rotación del torso	234
Figura 319. Torso y brazos ensamblados	236
Figura 320. Torso y brazos con base metálica de soporte	237
Figura 321. Torso y brazo rotando en sentido antihorario.....	237
Figura 322. Torso y brazos rotando en sentido horario	238

Figura 323. Diagrama de metodología del proyecto.	241
Figura 324. Mecanismo ideal para la articulación del hombro.....	243
Figura 325. Proyecto Poppy robot.....	244
Figura 326. Anatomía del Poppy Robot.	245
Figura 327. Robot humanoide Inmoov.....	246
Figura 328. Sistema de poleas para la generación de movimientos.	248
Figura 329. Sistema de poleas para la generación de movimientos en los mecanismos de los dedos.	249
Figura 330. Servomotor HS-322HD.....	250
Figura 331. Mecanismo de dedo extendido con hilo de pescar de 0.5 mm de grosor.	250
Figura 332. Mecanismo de dedo flexionado con hilo de pescar de 0.5 mm de grosor.	251
Figura 333. Principio de un tornillo de potencia.	252
Figura 334. Tipos de roscas comúnmente utilizadas para tornillos de potencia.	253
Figura 335. Brazo humano ensamblado en su posición crítica para la extremidad del codo.....	253
Figura 336. Diseño de tornillos de potencia dibujados en Inventor	255
Figura 337. Tornillo sinfín y corona.....	257
Figura 338. Nomenclatura para tornillo sinfín.	257
Figura 339. Posición donde sucede la carga máxima del hombro.....	259
Figura 340. Esfuerzo de Von-Mises en estructura del antebrazo.	262
Figura 341. Factor de seguridad a estrés en estructura del antebrazo.....	263
Figura 342. Esfuerzo de Von-Mises en estructura del bíceps.....	264
Figura 343. Factor de seguridad a estrés en estructura del bíceps.	264
Figura 344. Esfuerzo de Von-Mises en mecanismo de tornillo de potencia del bíceps.....	265
Figura 345. Factor de seguridad de estrés en mecanismo de tornillo de potencia del bíceps.	266
Figura 346. Esfuerzo de Von-Mises en estructura del hombro.	267
Figura 347. Esfuerzo de Von-Mises en estructura del hombro.	267
Figura 348. Factor de seguridad de estrés en estructura del hombro.....	268
Figura 349. Esfuerzo de Von-Mises en mecanismo de tornillo sinfín del hombro.	269
Figura 350. Factor de seguridad de estrés en mecanismo de tornillo sinfín del hombro.	269
Figura 351. Equipo Soiltest para pruebas de materiales.....	270
Figura 352. Pieza robPart5	271
Figura 353. Interfaz gráfica de Repetier Host	282
Figura 354. Patrones lineal (a) y hexagonal (b) para piezas impresas 3D.	283
Figura 355. Unión con pegamento de Robpart2 con Robpart5.	287
Figura 356. Unión con pegamento de Robpart3 con Robpart4.	287
Figura 357. Unión con pegamento de Robpart2 con Robpart5 y RotaWrist.	288
Figura 358. Unión de RobCap con ShaftGear y las piezas Robpart2 – Robpart5.	288

Figura 359. Unión de antebrazo completo.....	289
Figura 360. Servomotor para mecanismo de muñeca.....	289
Figura 361. Engrane para mecanismo de muñeca	290
Figura 362. Engrasar mecanismo de muñeca antes de ensamblar.....	290
Figura 363. Mecanismo de la muñeca listo para ensamblar con el antebrazo.....	291
Figura 364. Preparando ensamblaje de los dedos.....	291
Figura 365. Limar piezas antes de ensamblar.....	292
Figura 366. Limar piezas antes de ensamblar.....	292
Figura 367. Ensamblar piezas del dedo.....	293
Figura 368. Dedo meñique.....	293
Figura 369. Dedo anular.....	294
Figura 370. Dedo medio.....	294
Figura 371. Dedo índice.....	295
Figura 372. Dedo pulgar.....	295
Figura 373. Ensamble de hilo de pescar con dedos de la mano.....	296
Figura 374. Ensamble de hilo de pescar con mano.....	296
Figura 375. Unión de hilos al final del dedo.....	297
Figura 376. Ensamblaje de mano con hilos de pescar.....	297
Figura 377. Ensamblaje de mano completa con hilos de pescar.....	298
Figura 378. Ensamblaje de hilos de pescar con poleas de los motores.....	298
Figura 379. Ensamblaje completo de antebrazo.....	299
Figura 380. Unión de HighArmSide y LowArmSide.....	300
Figura 381. Piezas que forman el bíceps.....	300
Figura 382. Ensamblaje de piezas del bíceps.....	301
Figura 383. Vista lateral del ensamblaje del bíceps.....	301
Figura 384. Vista frontal del ensamblaje del bíceps total.....	302
Figura 385. Ensamblaje de tornillo a motor.....	302
Figura 386. Mecanismo del hombro sin grasa.....	303
Figura 387. Mecanismo del hombro con grasa.....	303
Figura 388. Mecanismo final listo para ensamblar.....	304
Figura 389. Arduino UNO.....	305
Figura 390. Dedos de la mano en extensión y muñeca en pronación.....	306
Figura 391. Dedos de la mano en compresión.....	306
Figura 392. Muñeca en pronación.....	307
Figura 393. Codos en posición de extensión.....	308
Figura 394. Codos en posición de flexión.....	309

Figura 395. Hombro derecho en posición de extensión.....	310
Figura 396. Hombro izquierdo en posición de extensión.	310
Figura 397. Hombros en posición de flexión.	311
Figura 398. Brazos y torso ensamblados.	312
Figura 399. Integración de módulo de control, reconocimiento de gestos y audio, torso y brazos.	313
Figura 400. Integración de módulo de control, reconocimiento de gestos y audio, torso y brazos.	313
Figura 401. Integración de módulo de control, reconocimiento de gestos y audio, torso y brazos	313
Figura 402. Pantallazo de ejemplo “hands.pde”	321
Figura 403. Pantallazo ejemplo “user3d.pde”	322
Figura 404. Diagrama de flujo ejemplo “Skeleton Basics - WPF”	325
Figura 405. Secuencia movimientos para reconocimiento de saludo	327
Figura 406. Diagrama de flujo ejemplo “KinectAudioDemo”	328
Figura 407. Reconocimiento de posición de mano (parte 1), enviando datos a reconocimiento de audio ..	330
Figura 408. Reconocimiento de posición de mano (parte 2), enviando datos a reconocimiento de audio ..	330
Figura 409. Pruebas de audio con micrófono omnidireccional unido a reconocimiento de gestos	330
Figura 410. Pruebas de audio con micrófono unidireccional unido a reconocimiento de gestos	331
Figura 411. Reconocimiento “hola”	332
Figura 412. Reconocimiento gesto “saludo con mano derecha”	334
Figura 413. Reconocimiento gesto “saludo con mano izquierda”	334
Figura 414. Reconocimiento gesto “levantar mano derecha”	334
Figura 415. Reconocimiento gesto “levantar mano izquierda”	335
Figura 416. Reconocimiento gesto “levantar ambas manos”	335
Figura 417. Reconocimiento gesto “abrir los brazos”	335
Figura 418. Reconocimiento gesto “cruzar los brazos”	336
Figura 419. Reconocimiento de medida de distancia entre hombros de usuario	336
Figura 420. Prueba 1 reconocimiento de gestos con dos personas	338
Figura 421. Prueba 2 reconocimiento de gestos con dos personas	338
Figura 422. Prueba 3 reconocimiento de gestos con dos personas	338
Figura 423. Configuración física del Arduino Mega.....	350
Figura 424. Señal de control original para servos comunes	352
Figura 425. Señal de control aislada para servos comunes.....	352
Figura 426. Señal de control original para motores Dynamixel	353
Figura 427. Señal en la salida del 6N137	353
Figura 428. Señal de control completamente aislada	354
Figura 429. Circuito de aislamiento para señales de control del MG996R	355
Figura 430. Circuito de aislamiento para señales de control de motores Dynamixel	355

Figura 431. Diagrama de flujo de la configuración inicial del código de Arduino	356
Figura 432. Diagrama de flujo de la función principal del código de Arduino	357
Figura 433. Diagrama de flujo de la función Mover del código de Arduino.....	358
Figura 434. Diagrama de flujo de la función Comparar del código de Arduino	360
Figura 435. Diagrama general de funcionamiento	361
Figura 436. Método principal del código en Matlab	361
Figura 437. Función MoverMotores del código de Matlab	362
Figura 438. Diagrama de etiquetas de identificación	362
Figura 439. Diseño del PCB de optoacopladores	363
Figura 440. PCB de optoacopladores con componentes	363
Figura 441. Diseño del PCB de potencia.....	364
Figura 442. PCB de potencia con terminales	364
Figura 443. Diseño del PCB de reguladores de voltaje	365
Figura 444. PCB de potencia con componentes	365
Figura 445. Placa final de optoacopladores.....	366
Figura 446. Placa final de potencia	366
Figura 447. Placa final de reguladores de voltaje.....	367
Figura 448. Posición inicial del animatrónico	367
Figura 449. Brazo derecho completamente extendido	368
Figura 450. Hombro derecho arriba, codo derecho contraído	368
Figura 451. Hombro derecho arriba, codo derecho extendido	369
Figura 452. Mano completamente extendida	369
Figura 453. Muñeca derecha rotada a 180°	370
Figura 454. Dedo meñique contraído	370
Figura 455. Dedo anular contraído	371
Figura 456. Dedo medio contraído	371
Figura 457. Dedo índice contraído	372
Figura 458. Dedo pulgar contraído.....	372
Figura 459. Mano derecha contraída	373
Figura 460. Brazo izquierdo extendido	373
Figura 461. Hombro izquierdo arriba, codo izquierdo contraído	374
Figura 462. Hombro izquierdo arriba, codo izquierdo extendido.....	374
Figura 463. Muñeca izquierda a 0°	375
Figura 464. Muñeca izquierda a 180°	375
Figura 465. Torso a 140°	376
Figura 466. Torso a 40°	376

Figura 467. Actuador neumático flexible de 0.15 m.	379
Figura 468. Actuador neumático flexible de 0.20 m.	379
Figura 469. Actuador neumático flexible de 0.25 m.	379
Figura 470. Configuración de un actuador neumático flexible para los ensayos de carga y tiempo.	382
Figura 471. Configuración de un actuador neumático flexible para mediciones de fuerza.	383
Figura 472. Ensayo de tiempo para el actuador de 0.15 m, con 2.5 kg de carga y presiones varias.	384
Figura 473. Ensayo de tiempo para el actuador de 0.20 m, con 2.5 kg de carga y presiones varias.	384
Figura 474. Ensayo de tiempo para el actuador de 0.25 m, con 2.5 kg de carga y presiones varias.	385
Figura 475. Actuador de 0.15 m, antes y después, de fallar a 480kPa (70 psi).	387
Figura 476. Actuador de 0.20 m, antes y después, de fallar a 480kPa (70 psi).	388
Figura 477. Actuador de 0.25 m, antes y después, de fallar a 480kPa (70 psi).	388
Figura 478. Vista lateral e inferior del actuador de 0.20 m antes de la falla a 480 kPa (70 psi).....	388
Figura 479. Comparación de fuerza teórica generada y fuerza práctica (máxima y estable) generada.	391

RESUMEN

Un animatrónico es toda máquina que emule el comportamiento de un ser viviente real o imaginario. El objetivo del megaproyecto del cual forma parte el módulo presentado en este trabajo es diseñar, fabricar e implementar animatrónicos con un costo menor a su precio de venta. El objetivo principal de este proyecto fue el diseño y construcción de animatrónicos de bajo costo. Es menester indicar que el animatrónico se diseñó para una atracción del parque temático Xetulul. Esta atracción está inspirada en el Castillo de San Felipe, un sitio turístico ubicado en el departamento Izabal, Guatemala. Para cumplir con el objetivo del proyecto se desarrollaron dos prototipos de animatrónicos, un pirata y un cocodrilo; y una calavera animatrónica, que sería instalada en el parque. Cada uno de los animatrónicos se diseñaron y desarrollaron seleccionando los componentes y procesos adecuados a las necesidades del proyecto, buscando reducir el costo del animatrónico. La calavera animatrónica desarrollada realizó la emulación de una calavera encerrada en un cofre pirata, y tuvo un costo total de Q6,630. El pirata desarrollado realizó un reconocimiento de gestos y audio para que con base a estos se desarrollaran los movimientos del animatrónico, y tuvo un costo total de Q32,998.20. Finalmente, en cuanto al cocodrilo, se decidió enfocar el trabajo en el prototipo de una cola de cocodrilo, y se obtuvo el diseño y construcción de un músculo neumático de bajo costo. Con base en los resultados obtenidos por cada animatrónico se pudo concluir que se cumplieron con los objetivos del proyecto.

Figura 1. Pirata animatrónico construido.



Figura 2. Músculo neumático.



Figura 3. Calavera animatrónica.



I. INTRODUCCIÓN

Un animatrónico es toda máquina que emule el comportamiento de un ser viviente real o imaginario. La gama de seres que han sido representados en animatrónicos a través de la historia es muy grande. Existen animatrónicos que representan distintos animales, personajes históricos y de alguna película famosa, seres fantásticos e incluso mascotas o insignias de alguna marca. Por lo general un animatrónico cumple la función de entretener a los visitantes de algún sitio temático, como un restaurante o un parque, por lo que el animatrónico representa algún personaje acorde al ambiente en el que se encuentre. La complejidad y cantidad de movimientos del animatrónico dependerá de lo que se quiera representar y el realismo que se le desee impregnar. Este tipo de atracciones son ideales para sitios temáticos, ya que llaman la atención de la mayoría de personas y logran desarrollar una experiencia completa en los visitantes del sitio en el que se encuentre instalados.

Hoy en día la instalación de animatrónicos es una apuesta muy común, y existen compañías dedicadas únicamente al desarrollo de animatrónicos. La empresa más famosa dedicada al desarrollo de animatrónicos es Garner Holt Productions, uno de los principales distribuidores de los parques de Disney y Universal. En la Ilustración 2 se muestra a Garner Holt, fundador de Garner Holt Productions, con uno de los animatrónicos desarrollados por su empresa. Este tipo de industrias realizan animatrónicos con un realismo bastante grande, y la inversión que representa un animatrónico desarrollada por estas compañías beneficia a los grandes parques.

Figura 4. Garner Holt con un animatrónico desarrollado por Garner Holt Productions.



(WiseGeek, 2016)

Para parques con menor presupuesto es imposible realizar una inversión en un animatrónico desarrollado por este tipo de compañías, por lo que buscan alternativas de menor precio. Garner Holt Productions desarrolla un animatrónico sencillo que imita a un pájaro parlanchín, cuyo precio asciende a \$12000¹, cifras que hacen imposible la inversión de muchos compradores en grandes atracciones. Existen distribuidores de animatrónicos de segunda mano, que ofrecen precios razonables para las atracciones, tomando en cuenta el uso que ha adquirido la atracción.

El elevado precio de este tipo de atracciones tiene varias razones. El número de empresas dedicadas a este tipo de atracciones es limitado, por lo que no existen una variedad de opciones para las entidades que quieran adquirir un animatrónico. No obstante, existen desarrolladores de menor prestigio, como industrias de origen asiático, que ofrecen precios bastante cómodos para los compradores, sin embargo, la calidad de los animatrónicos no es la misma que la de los desarrollados por otras empresas.

Así mismo, abordando el problema desde otra perspectiva, manejar una compañía dedicada al desarrollo de animatrónicos se enfrenta a la venta de atracciones que tienen como cliente a un mercado reducido. El tiempo invertido en el desarrollo de este tipo de atracciones, la especialización de las personas dedicadas a su fabricación e instalación, la personalización de la máquina dependiendo del lugar en el que se vaya a encontrar y el número de clientes para este producto produce que este tipo de negocios no puedan ser rentables. Esta serie de factores son otra de las razones por las cuales las industrias manejan precios elevados para los animatrónicos.

Este problema es el que busca abordar el proyecto que se presentará a continuación. Xetulul es un parque temático perteneciente al Instituto de Recreación de los Trabajadores (IRTRA). El parque se caracteriza por brindarle una experiencia única en Guatemala a todos sus visitantes. El parque no tiene un tema en específico, ya que se encuentra tematizado con una gran variedad de tramas. Existen sectores inspirados en países de Europa, secciones con temática maya y algunos otros temas. El parque cuenta con una división que tiene atracciones inspiradas en una temática pirata, y el parque desea completar la experiencia con la incursión de animatrónicos. En esta parte del parque se encuentra una atracción inspirada en el Castillo de San Felipe, un sitio turístico ubicado en Izabal, Guatemala. El juego consiste en abordar un barco pirata, acompañado de otros tripulantes, y lanzar agua a otros barcos que se encuentren en el juego, procurando evitar ser mojado por otros barcos. En el tiempo en el que uno espera para poder ingresar a la atracción las personas recorren el interior del castillo, con algunos elementos piratas que hacen la experiencia del visitante más completa. En la Ilustración 3 se muestra el juego descrito anteriormente.

¹ Dato obtenido de: <http://www.themeparktourist.com/news/20110929/4831/disney-animatronics-supplier-garner-holt-launches-new-product-line>

Figura 5. Atracción inspirada en el Castillo de San Felipe ubicada en Xetulul.



Figura 6. Interior de la atracción inspirada en el Castillo de San Felipe.



El parque desea instalar animatónicos en el interior del castillo y en el juego en si, por lo que en este punto es donde entra en juego este proyecto concretamente. El objetivo del proyecto es desarrollar animatrónicos de bajo costo para el parque temático Xetulul. Se desarrollaron tres animatronicos, dos en forma de prototipo y uno para ser instalado en el parque. Los animatronicos que se plantearon en forma de prototipo fueron un pirata y un cocodrilo, y se estipuló desarrollar una calavera animatónica para ser instalada en el parque.

II. OBJETIVOS

A. OBJETIVO GENERAL

- Diseño, construcción e implementación de animatrónicos con un costo menor a su precio de venta.

B. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Diseño, construcción e implementación de un animatrónico que emule el comportamiento de una calavera encerrada en un cofre pirata.
- Diseño, construcción e implementación de un animatrónico que emule el comportamiento de un pirata.
- Diseño, construcción e implementación de un animatrónico que emule el comportamiento de un cocodrilo.

III. JUSTIFICACIÓN

A. ¿POR QUÉ CONSTRUIR UN ANIMATRÓNICO?

Los parques de diversiones, sitios temáticos y lugares familiares en general, buscan situaciones y atracciones que logren captar la atención de la mayor cantidad de personas posible, sobre todo la de los niños de la familia, para así desarrollar una experiencia agradable para los visitantes del sitio, y con esto atraer más visitantes, y el regreso de las personas que ya han visitado el lugar. Para alcanzar este objetivo estos lugares establecen atracciones y shows que logran atraer lo suficiente a la mayoría de personas. Un tipo de atracción muy utilizado en la industria del entretenimiento son los animatrónicos.

Los animatrónicos son recursos muy utilizados en la industria del entretenimiento, ya que mejoran la experiencia de los visitantes del lugar en el que se encuentra ubicado el animatrónico. Los grandes parques temáticos del mundo, como Universal Studios o Disneyland, cuentan con una gran variedad y cantidad de animatrónicos en sus distintos parques y atracciones. Un animatrónico es una opción ideal para todo lugar tematizado, ya que realza la decoración del lugar. En las siguientes figuras se muestran algunos animatrónicos instalados y utilizados en la industria del entretenimiento.

Figura 7. Animatrónico de un dinosaurio utilizado en Jurassic Park



(School, Stan Winston, 2015)

Figura 8. Johnny Depp con su animatrónico.



(WiseGeek, 2016)

Es un hecho que los animatrónicos han sido rentables para las grandes industrias del entretenimiento. En la década de los años 60 Walt Disney incorporó figuras que emulaban el sonido de distintas figuras y realizaban pequeños movimientos mediante hidráulica. Hoy en día existen más de 100 figuras animatrónicas en los distintos parques de Disney, hecho que muestra la recepción que han tenido este tipo de figuras en la audiencia (Studios, Rogers, 2012). Así mismo, este tipo de atracciones se encuentran en todo parque temático de prestigio, como Universal Studios. Los animatrónicos de los parques de diversiones tienen distintas formas y tamaños, que van desde pequeñas figuras hasta grandes dragones o dinosaurios. Otra de las grandes industrias en las que los animatrónicos han encontrado una gran acogida es en la industria del séptimo arte. La incursión de estas figuras en las películas inició con pequeñas marionetas electrónicas como la utilizada en la famosa cinta *“E.T., el extraterrestre”*. Hoy en día los animatrónicos son parte esencial de la industria cinematográfica, teniendo grandes incursiones en famosas películas, como *“Jurassic Park”*. (School, Stan Winston, 2015)

Figura 9. Marioneta electrónica de la película *“E.T., el extraterrestre”*.



(WiseGeek, 2016)

B. LA GRAN LIMITANTE DE LOS ANIMATRÓNICOS

A pesar de que los animatrónicos representan grandes beneficios para la industria del entretenimiento, existe una limitante en la instalación de este tipo de atracciones, su costo. Para grandes industrias, su presupuesto les permite realizar la implementación de animatrónicos sin problema alguno, no obstante, parques con menor presupuesto no pueden financiar la instalación de animatrónicos de buena calidad. Esta es una de las principales razones de ser de este proyecto.

El parque temático Xetulul cuenta con instalaciones que, sin lugar a dudas, representan una de los lugares más visitados de Guatemala. El parque ha recibido premios a nivel mundial por su gestión, y siempre busca la innovación en las atracciones de su parque. No obstante, su presupuesto no les permite afrontar la compra de animatrónicos para su instalación en el parque. Un animatrónico que emule el comportamiento de una persona humana, desarrollado por las grandes industrias en sus versiones más sencillas, puede ascender a \$100,000.00. Existen compañías que ofrecen animatrónicos de menor calidad a precios más accesibles, no obstante, no ofrecen la misma experiencia que un animatrónico desarrollado por las grandes compañías, y sus precios no representan una opción totalmente viable para parques con presupuestos más limitados.

Existen grandes empresas dedicadas a la industria animatrónica. Las más prestigiosas del medio son *Garner Holt Productions, Inc.*, *UCFab International, LLC* o *Sally Corporation*, entre otras. Los animatrónicos que ofrecen estas compañías fácilmente logran ascender a \$100,000. En la imagen se muestra el proceso de decoración de un animatrónico inspirado en el famoso e icónico expresidente de los Estados Unidos, Abraham Lincoln.

Figura 10. Animatrónico inspirado en Abraham Lincoln.



(WiseGeek, 2016)

C. VERDADERO COSTO DE LOS ANIMATRÓNICOS

Los precios de los animatrónicos son bastante elevados debido a que las compañías que se dedican a la construcción e instalación de animatrónicos manejan un gran prestigio y no realizan una producción en masa de animatrónicos. Básicamente tiene un mayor costo la mano de obra que los materiales en sí del animatrónico. Este factor busca ser aprovechado por nuestro megaproyecto, para así construir animatrónicos de bajo costo para el parque temático Xetulul, pero que cumpla con el objetivo de ofrecer una experiencia más completa a los visitantes que interactúen con el animatrónico. Debido a que es la primera experiencia de este tipo de proyectos en el parque temático, se construirá un animatrónico relativamente sencillo, siendo este una calavera animatrónica; y se realizará la construcción del prototipo de dos animatrónicos adicionales, siendo los mismos un pirate y un cocodrilo. Debido a que la mano de obra de realización del animatrónico no será tomada en cuenta, esto reducirá drásticamente el costo del mismo.

IV. MARCO TEÓRICO

A. PARQUE TEMÁTICO XETULUL

1. ¿Qué es el IRTRA? En el año 1962 el Congreso de la República de Guatemala promovió la creación de una ley que estableciera que los empresarios privados debían brindar recreación a sus trabajadores. De este modo el uno de julio de 1962 entró en vigencia el decreto 1528, que contiene la Ley de Creación del Instituto de Recreación de los Trabajadores, IRTRA, en el que se estipuló que los empleadores deberían contribuir con el 0.3% de los sueldos ordinarios de sus trabajadores. Desde ese día el IRTRA han construido una red de parques de recreación para sus trabajadores, que se han caracterizado por su limpieza, seguridad, comodidad, hospitalidad, diversión y magia, como indica el lema de la institución. (Asociación de Amigos del País , 2004)

Figura 11. Gráfico con los logos de los parques de recreación del IRTRA.



(IRTRA, 2012)

2. ¿Qué es el Xetulul? Xetulul es un proyecto del Instituto de Recreación de los Trabajadores de la Empresa Privada Guatemalteca, IRTRA. El parque les brinda a sus visitantes opciones de ocio a bajo costo, o incluso gratuitas. Todo trabajador con carnet del IRTRA puede ingresar gratuitamente el parque junto a su familia nuclear, y se permite el ingreso de los no afiliados al Instituto, manejando el precio de Q200 por adulto y Q100 por niño. El nombre del parque quiere decir “bajo los zapotes” que refleja la inspiración en las tradiciones propias con las que ha sido construido el parque. El parque contiene rasgos de la cultura maya, sin dejar de tomar en cuenta las singularidades adquiridas de los colonizadores europeos. El zapote es un árbol de frutos dulces famoso en la región. (Prensa Libre, 2003)

El parque cuenta con juegos electromecánicos para visitantes de un gran rango de edades, shows ambulantes, un teatro, tiendas de regalos, restaurantes y muchas otras atracciones. El parque tiene capacidad de 12,000 visitantes y se encuentra dividido en 9 plazas: Plaza Chapina, Pueblo Guatemalteco, Plaza Maya, Plaza España, Plaza Italia, Plaza Francia, Plaza Alemania/Suiza, Pueblo Caribeño y Pueblo Fantasía. En la Plaza caribeña se encuentra una atracción inspirada en el Castillo de San Felipe, lugar en el que se instalará el animatrónico a desarrollar. (IRTRA, 2012)

Figura 12. Mapa general del parque temático Xetulul.



(IRTRA, 2012)

B. CASTILLO DE SAN FELIPE

El Castillo de San Felipe es un monumento histórico ubicado en el departamento de Izabal, Guatemala. El Castillo fue utilizado principalmente como protección contra piratas que lograban penetrar a Guatemala por medio de la costa atlántica. Actualmente es un atractivo turístico muy importante en la región. (deGuate, 2014)

1. **Historia del Castillo de San Felipe.** Cuando los europeos llegaron a Mesoamérica se encontraron con una gran cantidad de bienes de valor del otro lado del océano. Debido a que la presencia de europeos era prácticamente española únicamente, se estableció un sistema en el cual todo producto debía tocar puerto español antes de poder comercializarse a cualquier otra parte del continente europeo. Esto trajo consigo varias consecuencias, entre las cuales se encuentra la molestia por parte de los comerciales de otras potencias europeas del momento, como Francia, Holanda e Inglaterra. Esta molestia, y la vasta cantidad de bienes en la región propicio la incursión de los llamados “piratas”. Los piratas buscaban apropiarse de cualquier cantidad de bienes en la región, del modo que fuera necesario sin pagar por los productos, para sacar el mayor provecho posible de los mismos. (Chajón, 2014)

Los piratas trajeron consigo una serie de problemas que provocó la preocupación de parte de las autoridades españolas de la región, que se vieron en la necesidad de abordar soluciones contra las ofensivas de los bucaneros. En el año 1595 Francisco de Sandé, Presidente de la Audiencia, describió en algunas cartas el ataque de piratas ingleses a un torreón utilizado para cobrar impuestos y guardar mercancía, en la desembocadura del lago de Izabal, conocido en ese entonces como Golfo Dulce. (deGuate, 2014)

En la primera mitad del siglo XVII el comercio entre el Reino de Guatemala y España disminuyó debido al declive naval en España, producido en cierta parte por los piratas. No obstante, a mitad de siglo se introdujo un producto que sería muy cotizado en el viejo mundo, el añil. En el año 1651 el Presidente de la Audiencia, Antonio de Lara y Mongrovejo ordenó la construcción de una fortaleza en la ubicación del antiguo torreón, y lo nombró en honor al rey de España, por lo que pasó a llamarse San Felipe. (deGuate, 2014)

A través de los años se realizaron varias mejoras al Castillo. En el año 1688 iniciaron obras de reconstrucción del castillo por mandato del Presidente Jacinto Barrios y Leal, a cargo del ingeniero militar Andrés Ortiz de Urbina. Producto de esta remodelación es la estructura que actualmente se encuentra en pie.

Con el pasar de los años otros puertos fueron tomando mayor protagonismo, y el Castillo de San Felipe fue perdiendo importancia en la región. En el siglo XIX la incursión de los puertos Santo Tomás de Castilla y Puerto Barrios sepultaron la importancia estratégica y comercial del Castillo de San Felipe por completo. (deGuate, 2014)

2. **Sitio turístico.** Actualmente el Castillo de San Felipe forma parte de una de las principales atracciones turísticas de la región, por su importancia histórica y su atractivo. Debido a las constantes visitas de turistas, el Castillo sufrió algunos daños, por lo que fue necesario un proyecto de restauración en el año 2001.

Figura 13. Castillo de San Felipe en la actualidad.



(deGuate, 2014)

C. ¿QUÉ ES UN ANIMATRÓNICO?

Un animatrónico es una máquina electrónica y mecánica que imita el comportamiento de seres vivos o fantásticos. Los seres que son imitados por los animatrónicos pueden ser desde carácter antropomórfico hasta seres pertenecientes a cuentos de hadas. La emulación del comportamiento se basa en la imitación de sonidos y movimientos.

Los movimientos de un animatrónico pueden ser sencillos o de gran complejidad, situación que depende del ser en el que está basado el animatrónico, y el realismo que se le quiere impregnar a la máquina. (WiseGeek, 2016)

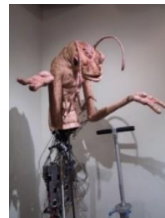
Es importante mencionar que la animación de la figura puede ser total o parcial. Existen animatrónicos que tienen movimiento únicamente en algunas de las partes del cuerpo del mismo, mientras que algunos otros tienen movimiento en la totalidad de las partes del animatrónico. Existen animatrónicos sencillos que realizan movimientos marcados y que son utilizados únicamente para animar un escenario específico, y también existen animatrónicos complejos cuyo objetivo es imitar con el mayor realismo posible un ser vivo o fantástico, por lo que requieren mecanismos que realicen un movimiento suave para lograr la mayor naturalidad posible. Por mencionar algunos ejemplos, los animatrónicos ubicados en la famosa cadena de restaurantes Chuck E. Cheese realizan movimientos bruscos y que carecen de realismo, sin embargo, cumplen la función para la que fueron colocados, animar el show presentado a los niños visitantes. En contraste, los animatrónicos utilizados en películas buscan tener movimientos lo más naturales posibles, para que las personas no logren percibir que es una máquina la responsable del movimiento.

Figura 14. Animatrónicos ubicados en Chuck. E. Cheese.



(WiseGeek, 2016)

Figura 15. Animatrónico utilizado en la saga de películas de los Hombres de Negro.



(WiseGeek, 2016)

1. **Historia de los animatrónicos.** Existe un debate acerca del verdadero origen de los animatrónicos, y a qué se le puede conocer como el primer animatrónico. Un punto de partida de la inspiración de los primeros animatrónicos fueron los distintos autómatas desarrollados a lo largo de la historia. Un autómata básicamente es un artefacto o máquina que repite actividades realizadas por el ser humano. Existe documentación que registra que uno de los primeros autómatas conocidos fue una estatua de Memon, un rey de Etiopía, construida por Amenhotep en el año 1500 a.C. El autómata emitía sonidos son los rayos del sol al amanecer. (Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Industrial de Zaragoza, 2014)

Con el pasar de los años, los autómatas fueron cobrando mayor realismo y complejidad. Por esta razón, y por el objetivo de los autómatas, se puede considerar su incursión en la historia como un punto de partida para la disciplina animatrónica contemporánea. Uno de los autómatas más conocidos y de mayor misterio fue el famoso *turco*. El turco fue creado en 1769 por Wolfgang Von Kempelen. El turco fue un autómata que realizaba partidas de ajedrez contra cualquier adversario, aparentemente sin intervención humana. A pesar de que se llegó a probar que el turco fue una farsa montada por su creador, este tipo de incursiones fueron las que llegaron a propiciar la invención de los animatrónicos. (Ajedrez de Ataque, 2004)

Figura 16. Figura representativa del autómata conocido como El Turco.



(Ajedrez de Ataque, 2004)

Con el pasar de los años se fue comprendiendo de mejor manera los fenómenos que se desarrollan en el planeta, y se fueron desarrollando leyes, teoremas y teorías de carácter físico, eléctrico y mecánico. Esto propicio la incursión de máquinas que ya no necesitaran de ilusiones para imitar a un ser determinado. Un ejemplo claro son los relojes comúnmente conocidos como “cuckoo”. Estos relojes simulaban el canto de un pájaro al cumplirse una hora de tiempo. (Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Industrial de Zaragoza, 2014)

Figura 17. Reloj “cuckoo” creado en el siglo XVII.



(Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Industrial de Zaragoza, 2014)

No obstante, no fue hasta el siglo XX cuando surgieron las máquinas a las que se les acuñaría animatrónicos. Walt Disney incursiono máquinas que imitaban el sonido y pequeños movimientos de seres de la franquicia. El éxito de este tipo de incursiones propició la expansión de la disciplina. En el año 1964 se utilizó un pájaro animatrónico en la famosa película Mary Poppins. (School, Stan Winston, 2015)

Figura 18. Animatrónico utilizado en la película Mary Poppins.



(School, Stan Winston, 2015)

Desde mediados del siglo XX hasta hoy en día el desarrollo de los animatrónicos ha crecido exponencialmente. Uno de los grandes factores que han apoyado este fenómeno es el crecimiento del estudio y desarrollo de la electrónica y mecánica. Hoy en día existen grados universitarios especializados en la animatrónica.

2. **Diseño, construcción e instalación de un animatrónico.** El diseño, construcción e instalación de un animatrónico requiere de distintas disciplinas de ingeniería y diseño. Existen muchos puntos a tomar en cuenta cuando se habla de un animatrónico, y es por eso que se vuelve importante tomar en cuenta cada uno de los aspectos de la máquina. A grandes rasgos, se puede modular la construcción e instalación de un animatrónico en cuatro disciplinas: mecánica, electrónica, programación y tematización.

Figura 19. Proceso de construcción de un animatrónico.



(School, Stan Winston, 2015)

3. **Mecánica de un animatrónico.** La parte mecánica de un animatrónico es esencial para su correcto funcionamiento. Esta disciplina se encarga de brindarle al animatrónico los mecanismos necesarios para realizar los movimientos propios de la figura o ser que se desea imitar. La complejidad de los movimientos y los mecanismos a implementar dependerán del tipo de movimiento que se desea imitar, así como el realismo que se desea para el animatrónico.

Figura 20. Mecanismos de un animatrónico antropomórfico.



(School, Stan Winston, 2015)

Existen diferentes ramas de la mecánica que pueden tomar un papel importante en el desarrollo del animatrónico. Estas pueden ser la hidráulica, neumática, entre otras. El diseño y elección de mecanismos debe desarrollarse en conjunto con las otras disciplinas del animatrónico, ya que existe una relación directa y dependiente entre disciplinas. Con base al tipo de actuadores que se utilizarán para los realizar los distintos movimientos, se determinarán los mecanismos y las partes mecánicas que formarán parte del animatrónico. Por ejemplo, si se utilizarán motores eléctricos para realizar los movimientos, se debe realizar el diseño correspondiente de mecanismos para utilizar el giro de los motores y convertirlo en un movimiento que refleje el comportamiento del ser que se desea imitar. Si se utilizarán actuadores hidráulicos y neumáticos, se deben diseñar los mecanismos que convertirán el movimiento de los pistones en la imitación que se desea lograr.

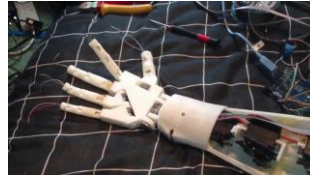
La elección de actuadores se basa en la necesidad del animatrónico y el movimiento que se desea imitar. Si el movimiento es complejo, y se requiere una mayor naturalidad en el desarrollo del mismo, se suelen utilizar motores eléctricos para realizar los movimientos. Los servo motores son una alternativa muy interesante en la elección de actuadores, ya que son sencillos de controlar. Sin embargo, presentan el inconveniente del ruido que realizan al moverse. En el caso de elegir motores eléctricos como actuadores para determinado movimiento, es necesario diseñar y construir un mecanismo capaz de transformar el movimiento transmitido por el eje de los motores al movimiento que se desea emular.

Figura 21. Mecanismo de transformación de movimiento radial a lineal.



(WiseGeek, 2016)

Figura 22. Mecanismo encargado de imitar el movimiento de un brazo humano.



(WiseGeek, 2016)

Si la complejidad del movimiento del mecanismo es sencilla, se pueden utilizar actuadores neumáticos e hidráulicos para movilizar la estructura. Otra de las razones por las cuales son utilizados estos actuadores es cuando el torque que se requiere de los mismos es grande.

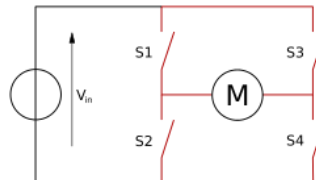
Figura 23. Mandíbula de un cocodrilo animatrónica, accionada por actuadores neumáticos.



(WiseGeek, 2016)

4. **Electrónica de un animatrónico.** La electrónica de un animatrónico hace referencia a los componentes electrónicos necesarios para el control de los actuadores del animatrónico. Si los actuadores que se utilizan son motores eléctricos, los componentes electrónicos corresponden a los circuitos que controlarán el sentido de giro y velocidad de giro de los motores.

Figura 24. Representación de un puente H.



Si los actuadores son hidráulicos y neumáticos, la electrónica correspondería al tipo de componentes que realizarán el control del animatrónico. En este caso se pueden utilizar Controladores Lógicos Programables (PLC's), o alguna alternativa que realice las funciones del mismo. Es importante mencionar que se pueden utilizar válvulas para controlar actuadores neumáticos e hidráulicos, por lo que la electrónica del sistema dependerá de cómo se desean manipular los actuadores.

Así mismo se puede considerar parte de la electrónica del sistema la implementación de un sistema de control para poder alcanzar la posición deseada de los distintos actuadores del animatrónico. Otra parte muy importante es considerar un aislamiento de las señales de control y las señales de potencia del sistema, ya que se debe procurar brindarles la corriente necesaria a los componentes del sistema, así como a los actuadores.

5. **Programación de un animatrónico.** La programación de un animatrónico es parte fundamental del mismo, y depende directamente de la mecánica y electrónica del sistema. La programación determina el movimiento de las distintas partes del sistema. Lo que se programará dependerá directamente de los actuadores utilizados y la electrónica implementada para controlar los mismos. Si se decidió utilizar motores eléctricos, y se utilizó un microcontrolador para controlar los circuitos de control de los mismos, se deberá programar el microcontrolador para definir las trayectorias del animatrónico.

Si se decidió utilizar un controlador lógico programable (PLC) para el control de los actuadores, se deberá programar en este las trayectorias del animatrónico. En ocasiones no es necesario utilizar algún tipo de controlador, ya que por medio de componentes electrónicos y lógica combinacional basta para determinar los movimientos del animatrónico.

6. **Tematización de un animatrónico.** Finalmente, la tematización del animatrónico es una parte muy importante en el desarrollo del animatrónico. La tematización determinará cómo se verán reflejados los movimientos del animatrónico en el entorno del mismo. No basta con lograr un movimiento realista, si este no se ve realista. Se deben ocultar los actuadores del sistema y toda parte mecánica y electrónica, para que el espectador no vea el animatrónico como una máquina. Además, es importante que todo el entorno en el que se encuentra el animatrónico corresponda a la temática del mismo.

Figura 25. Dinosaurio animatrónico luego de haber sido tematizado.



(School, Stan Winston, 2015)

D. ACTUADORES

Un actuador es un dispositivo mecánico que tiene como objetivo proporcionar fuerza para poder mover otro dispositivo mecánico. Se clasifican según la fuente de donde provenga la fuerza del actuador: presión neumática, presión hidráulica y fuerza motriz eléctrica. (Vildósola, 2010). La elección de tipo de actuadores se realiza según las necesidades de la aplicación en la que serán utilizados. Los principales aspectos a tomar en cuenta para la elección de actuadores son los siguientes: potencia, controlabilidad, peso y volumen, precisión, velocidad, mantenimiento y costo.

1. **Actuadores neumáticos.** Los actuadores neumáticos son aquellos que utilizan aire comprimido como fuente de energía. Este tipo de actuadores son utilizados para aplicaciones que requieran un movimiento rápido y no necesiten una precisión alta. Usualmente se requieren fuentes de aire comprimido a una presión entre 5-10bar. Para su funcionamiento se requiere la fuente de aire comprimido (compresor) y un sistema de distribución de aire (tubería, válvulas, etc.). Es muy importante tomar en cuenta que se requiere un mantenimiento periódico de los distintos componentes de un sistema con actuadores neumáticos, para asegurar su correcto funcionamiento. (González, 2002)

Existen dos tipos básicos de actuadores neumáticos, los cilindros y motores. Los cilindros realizan un movimiento lineal, mientras que los motores realizan un movimiento radial. Debido a compresibilidad del aire, los actuadores neumáticos no consiguen una precisión alta. Son ideales para sistemas en los que se requiere el posicionamiento en dos ubicaciones. Son muy utilizados en manipuladores sencillos, pinzas y determinadas articulaciones de robots. (Universidad de Vigo, 2012)

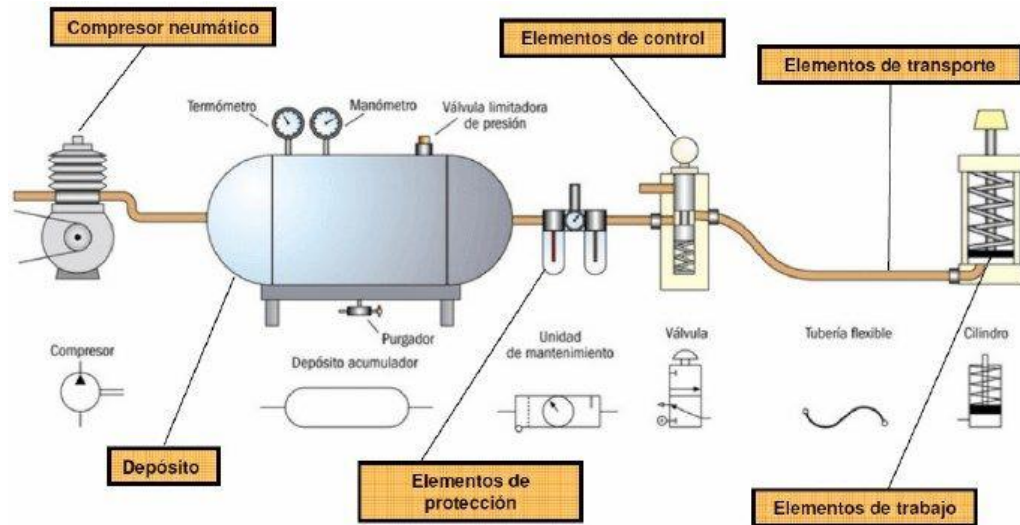
Existen varias alternativas para el control de este tipo de actuadores. Se pueden utilizar lógica de relevadores y apoyarse con el uso de electro válvulas. Usualmente se utilizan Controladores Lógicos Programables (PLC's) para realizar el control de actuadores neumáticos.

Figura 26. Pistón neumático.



(Universidad de Vigo, 2012)

Figura 27. Sistema neumático básico.



(González, 2002)

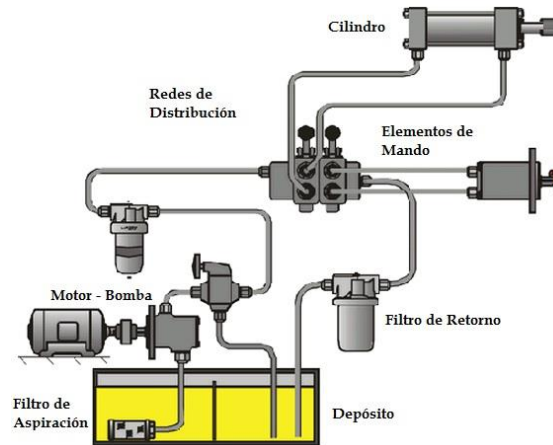
2. **Actuadores hidráulicos.** Los actuadores hidráulicos son aquellos que utilizan una bomba hidráulica como fuente de alimentación, y utilizan un fluido líquido como elemento de trabajo. Son utilizados en aplicaciones que requieren gran carga y precisión en su velocidad y posicionamiento. Se utiliza una presión comprendida normalmente entre los 50 y 100 bar, aunque en ocasiones las presiones manejadas superan fácilmente los 300bar. Al igual que con los actuadores neumáticos, existen actuadores de desplazamiento lineal y radial.

La compresibilidad de los aceites utilizados es mucho menor a la del aire comprimido, por lo que se alcanza una mayor precisión respecto a los actuadores neumáticos. Por esta razón es posible utilizar estos actuadores en aplicaciones que requieran un posicionamiento específico en una coordenada dada. Las presiones de trabajo de estos sistemas permiten brindar fuerza y torques considerablemente mayores a los sistemas neumáticos. (González, 2002)

Adicionalmente, los actuadores hidráulicos se destacan por su auto lubricación. Sin embargo, las altas presiones de trabajo también provocan que sea mayor la probabilidad de fuga de líquido de trabajo en la instalación. La instalación de estos sistemas es más compleja y costosa que la de un sistema neumático o eléctrico, por la necesidad de una gran variedad de equipos y dispositivos. (Universidad de Vigo, 2012)

Las opciones de controladores para este tipo de actuadores no difieren respecto a las de los actuadores neumáticos.

Figura 28. Sistema hidráulico básico.



(González, 2002)

3. **Actuadores eléctricos.** Los actuadores eléctricos son aquellos que utilizan la energía eléctrica para producir movimiento. Son los más utilizados, debido a su fácil utilización y control preciso. Existe una amplia variedad de tipos de actuadores eléctricos, lo que brinda una mayor cobertura de necesidades con este tipo de actuadores. Los actuadores eléctricos más destacados y comunes son los motores de corriente continua, motores de corriente alterna, servomotores y los motores paso a paso. Todos estos tipos de motores son de desplazamiento lineal, no obstante, también existen actuadores de desplazamiento lineal eléctricos, aunque son poco utilizados en comparación con su contraparte de desplazamiento radial. (González, 2002)

La instalación del sistema con estos actuadores es mucho más sencilla comparada con la de los actuadores neumáticos e hidráulicos, no obstante, se debe procurar con las normas de seguridad y requerimientos en la instalación eléctrica de la alimentación del sistema. La precisión lograda por estos actuadores es bastante grande y el control de los mismos es relativamente sencillo. La mayor limitante de estos sistemas es la potencia que pueden brindar los actuadores, considerablemente menor a la de los actuadores hidráulicos. (Universidad de Vigo, 2012)

Figura 29. Ejemplos de motores eléctricos.



(González, 2002)

4. Comparación entre los tipos de actuadores

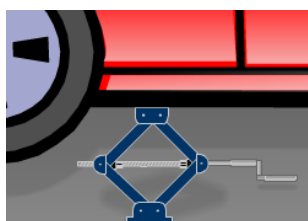
Cuadro 1. Cuadro comparativo de los tipos de actuadores

	Accionamiento eléctrico	Accionamiento neumático	Accionamiento hidráulico
Energía	Corriente eléctrica	Aire a presión (5-10 bar)	Aceite a presión (50-100 bar)
Tipos	Motores de corriente directa Motores de corriente alterna Servomotores Motores paso a paso	Cilindros Motores	Cilindros Motores
Ventajas	Fiabilidad Precisión Facilidad de Control Sencilla Instalación	Rapidez Precio bajo Sencillez	Rapidez Alta capacidad de carga Autolubricación
Desventajas	Potencia limitada	Difícil control de ruido Baja precisión Instalación complicada	Dificultad de mantenimiento Precio alto Instalación complicada

E. TRANSFORMACIÓN DE MOVIMIENTO RADIAL EN LINEAL

La transformación de movimiento radial a movimiento lineal es muy utilizada en distintos aspectos de la vida humana. Es muy común, y su aplicación es muy variada. En ocasiones se utilizan mecanismos de transformación de movimiento radial a movimiento lineal debido a que se tiene un actuador que otorga un desplazamiento circular, sin embargo, nuestra aplicación requiere un desplazamiento lineal. Otra razón muy común en la utilización de este tipo de mecanismos es la necesidad de una mayor velocidad de movimiento, o una mayor fuerza otorgada por el actuador.

Figura 30. Tricket, ejemplo de transformación de movimiento radial a movimiento lineal.

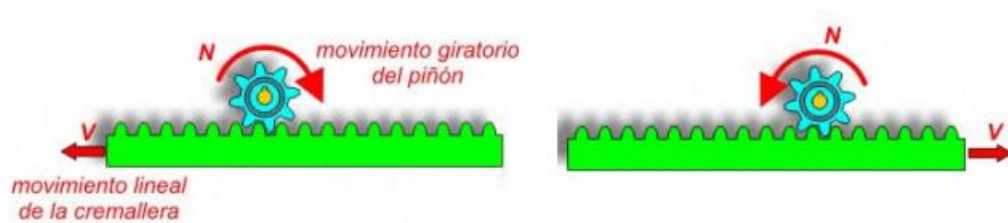


(Aprendamos de tecnología, 2010)

1. **Piñón-cremallera.** Este tipo de mecanismo convierte el movimiento circular de un piñón en un movimiento lineal continuo por parte de una cremallera, que prácticamente es una barra rígida y dentada. En este tipo de mecanismo se puede convertir también el movimiento lineal en circular. Son muy utilizados en aplicaciones que requieren precisión, como microscopios. Otros ejemplos de aplicación son el direccionamiento de algunos vehículos y vías de ferrocarriles en los que existe una gran pendiente. (Aprendamos de tecnología, 2010)

El sistema está formado por un piñón (rueda dentada) que engrana en una cremallera. Cuando el piñón gira, sus dientes empujan los de la cremallera, provocando el desplazamiento lineal de esta. Si lo que se mueve es la cremallera, sus dientes empujan a los del piñón consiguiendo que este gire y obteniendo en su eje un movimiento giratorio. (Blasco, 2010)

Figura 31. Figura de transformación de movimiento utilizando un mecanismo de piñón-cremallera.



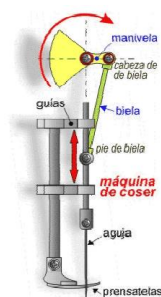
(Aprendamos de tecnología, 2010)

2. **Biela manivela.** Permite convertir el movimiento giratorio continuo de un eje en uno lineal alternativo en el pie de la biela. no se usan mecanismos que empleen solamente la manivela y la biela, pues la utilidad práctica exige añadirle algún operador más como la palanca o el émbolo, siendo estas añadiduras las que permiten funcionar correctamente a máquinas tan cotidianas como: motor de automóvil, limpiaparabrisas, rueda de afilar, máquina de coser, compresor de pistón, sierras automáticas, etc. (Aprendamos de tecnología, 2010)

Estos sistemas son totalmente reversibles, pues se puede imprimir un movimiento lineal alternativo al pie de la biela y obtener uno giratorio en el eje de la manivela.

El sistema biela-manivela emplea, básicamente, una manivela, un soporte y una biela cuya cabeza se conecta con el eje excéntrico de la manivela. (Blasco, 2010)

Figura 32. Mecanismo de biela manivela utilizado en una máquina de coser.



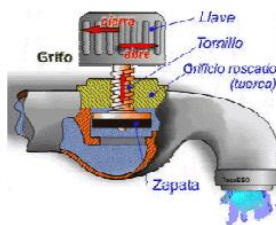
(Aprendamos de tecnología, 2010)

Este mecanismo es muy utilizado en aplicaciones que no requieren una transmisión de potencia muy elevada, y el desplazamiento lineal de salida que se desea obtener no es muy grande, ya que para producir grandes desplazamientos lineales el mecanismo adquiere un tamaño considerablemente mayor.

3. **Mecanismo de tornillo-tuerca.** Se emplea en la conversión de un movimiento giratorio en uno lineal continuo cuando sea necesaria una fuerza de apriete o una desmultiplicación de la velocidad muy grandes. (Aprendamos de tecnología, 2010)

El sistema tornillo-tuerca como mecanismo de desplazamiento se emplea en multitud de máquinas que requieran de gran precisión de movimiento. También, este tipo de mecanismo se encuentra en multitud de objetos de uso cotidiano: grifos, tapones de botellas y frascos, lápices de labios, barras de pegamento, elevadores de talleres, gatos de coche, tornillos de banco, máquinas herramientas, sacacorchos. Un ejemplo de aplicación en la vida cotidiana es en el caso de los grifos nos permite abrir (o cerrar) el paso del agua levantando (o bajando) la zapata a medida que vamos girando adecuadamente la llave. (Blasco, 2010)

Figura 33. Ejemplo de aplicación de mecanismo tornillo-tuerca

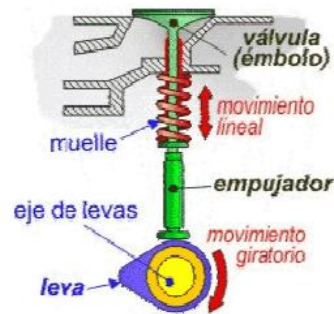


(Aprendamos de tecnología, 2010)

4. **Leva-émbolo, excéntrica embolo.** Permite obtener un movimiento lineal alternativo, o uno oscilante, a partir de uno giratorio; pero no nos permite obtener el giratorio a partir de uno lineal alternativo (o de uno oscilante). Es un mecanismo no reversible. Este mecanismo se emplea en: motores de

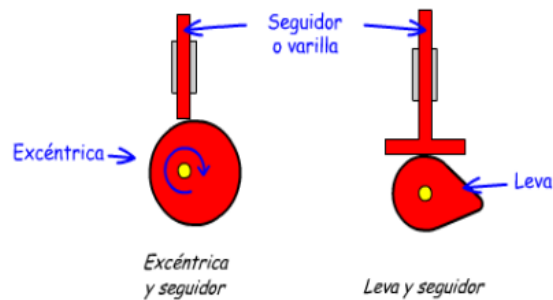
automóviles (para la apertura y cierre de las válvulas), programadores de lavadoras (para la apertura y cierre de los circuitos que gobiernan su funcionamiento), carretes de pesca, cerraduras, etc.

Figura 34. Componentes de un sistema leva-émbolo.



(Aprendamos de tecnología, 2010)

Figura 35. Comparación entre un sistema leva-émbolo y uno excéntrica-émbolo.



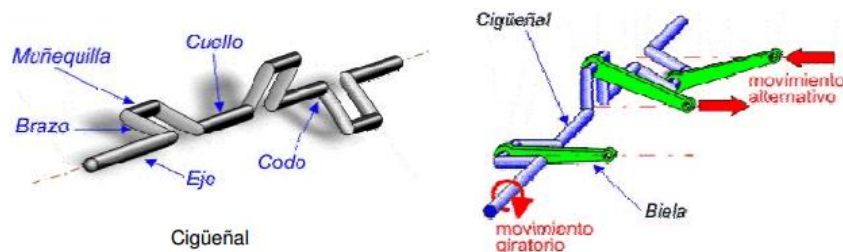
(Aprendamos de tecnología, 2010)

5. **Cigüeñal.** La utilidad práctica del cigüeñal viene de la posibilidad de convertir un movimiento rotativo continuo en uno lineal alternativo, o viceversa. Para ello se ayuda de bielas (sistema biela-manivela sobre un cigüeñal). Los cigüeñales son empleados en todo tipo de mecanismos que precisen movimientos alternativos sincronizados: motores de coches, juguetes en los que piernas y manos van sincronizados, etc. (Blasco, 2010)

El cigüeñal es un árbol de transmisión que junto con las bielas transforma el movimiento alternativo en circular, o viceversa. El sistema consiste en un conjunto de manivelas. Cada manivela consta de una parte llamada muñequilla y dos brazos que acaban en el eje giratorio del cigüeñal. Cada muñequilla se une a una biela, la cual a su vez está unida por el otro extremo a un pistón. (Aprendamos de tecnología, 2010)

Cuando varias manivelas se asocian sobre un único eje da lugar al cigüeñal. Este operador se comporta como una serie de palancas acopladas sobre el mismo eje. (Aprendamos de tecnología, 2010)

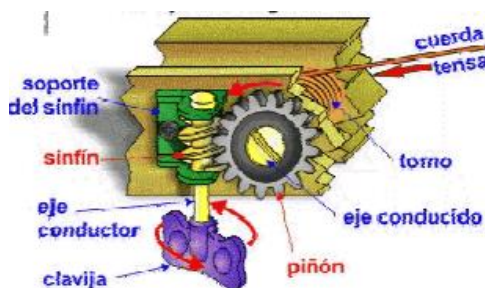
Figura 36. Representación del funcionamiento de un cigüeñal.



(Aprendamos de tecnología, 2010)

6. **Tornillo sinfín-rueda dentada.** Transmiten un movimiento giratorio entre dos ejes que se cruzan perpendicularmente. Se emplea en mecanismos que necesiten una gran reducción de velocidad y un aumento importante de la ganancia mecánica: clavijas de guitarra, reductores de velocidad para motores eléctricos, limpiaparabrisas de los coches, cuentakilómetros, y algunas otras aplicaciones. (Aprendamos de tecnología, 2010)

Figura 37. Clavija de una guitarra, mecanismo de tornillo sinfín-rueda dentada.



(Aprendamos de tecnología, 2010)

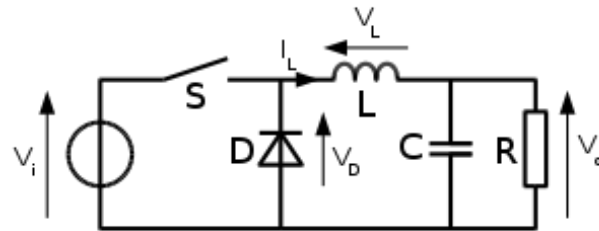
Este mecanismo ofrece una gran reducción de velocidad y, por tanto, un aumento importante de la ganancia mecánica. Es importante tomar en cuenta que el sinfín solamente tiene un diente mientras que el piñón puede tener los que se requieran. El mecanismo es irreversible, por lo que no es posible hacerlo funcionar si conectamos el piñón al árbol motriz y el sinfín al conducido. (Blasco, 2010)

F. CONVERTIDORES DE VOLTAJE DC-DC

Los convertidores de voltaje DC-DC son circuitos capaces de producir una salida de tensión de corriente directa a partir de una entrada de tensión de corriente directa, aumentando o disminuyendo el nivel de voltaje entre la entrada y salida. Son muy utilizados, debido a que existe una gran variedad de voltaje de alimentación para los distintos dispositivos del mercado.

1. **Convertidor tipo buck.** Un convertidor tipo buck es un circuito capaz de regular el nivel de tensión de entrada de un circuito, para obtener un nivel de tensión menor en la salida.

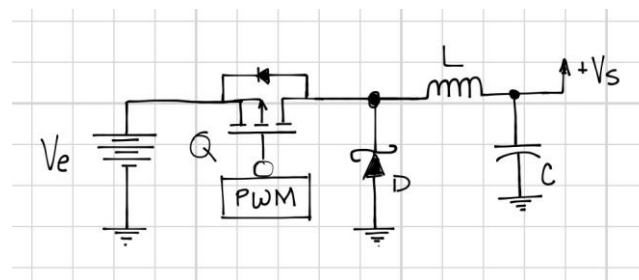
Figura 38. Topología básica de un regulador tipo buck.



(Electrónicos, 2015)

En la imagen podemos observar la topología básica de un convertidor tipo buck. Para poder emular el comportamiento del switch S se utiliza normalmente un transistor tipo MOSFET. Estos circuitos se caracterizan por su alta eficiencia, por lo que al reducir el nivel de voltaje se alcanza un aumento de la corriente ofrecida por el circuito. El nivel de tensión de la salida es controlado por medio de una señal pwm, en donde el ciclo de trabajo y su frecuencia determinan el voltaje de salida del circuito. (Electrónicos, 2015)

Figura 39. Topología básica de un convertidor tipo buck.

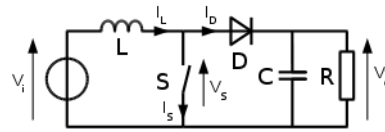


(Electrónicos, 2015)

La desventaja de este tipo de circuitos es la complejidad de los mismos, ya que es necesario el diseño de un sistema de control para alcanzar la regulación del voltaje. Así mismo se requieren componentes muy especializados y costosos para su fabricación, ya que se necesita precisión, se manejarán corrientes elevadas y se necesita que los componentes reacciones de una manera rápida. (González, 2009)

2. **Convertidor tipo boost.** Este tipo de convertidor surgió a partir del estudio de un convertidor tipo *buck*. La idea original fue voltear el convertidor tipo *buck*, para así producir un voltaje de salida mayor al voltaje de entrada. (Electrónicos, 2015)

Figura 40. Topología básica de un convertidor tipo boost.

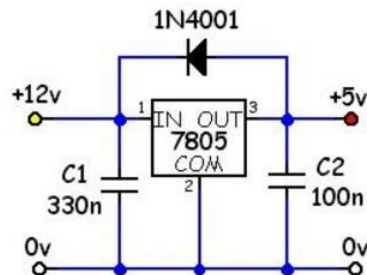


(Electrónicos, 2015)

Nuevamente, el control del nivel de tensión de salida se realiza por medio de una señal PWM. Estos circuitos son muy eficientes, alcanzando fácilmente eficiencias por encima del 90%. La corriente de salida disminuye debido a que el nivel de voltaje aumenta, no obstante, si la corriente de entrada es grande, la corriente de salida no sufrirá de grandes pérdidas. Al igual que con el convertidor tipo *buck*, este tipo de convertidor es bastante complejo, y adquiere además la complejidad de que es un sistema no lineal, por lo que el sistema de control a implementar aumenta su grado de dificultad. (González, 2009)

3. **Reguladores lineales.** Los reguladores lineales son circuitos integrados, en los que uno puede obtener un nivel de voltaje de salida a partir de uno de entrada. Por lo general se necesitan algunos componentes adicionales para completar el circuito del regulador, sin embargo, estos componentes adicionales son básicos, como capacitores o resistencias. Usualmente los fabricantes indican en la hoja de datos de los integrados los circuitos de aplicación de los reguladores. Una familia muy famosa de reguladores son los de la familia 78xx, que ofrecen un nivel de tensión correspondiente a los dos últimos dígitos de su nombre. Si el integrado tiene nombre 7805, el nivel de tensión de salida son 5V. Una de las grandes ventajas de estos reguladores son su bajo costo, por lo regular menor a \$3. El gran inconveniente de estos reguladores es la corriente de salida ofrecida por el integrado, que por lo general maneja una eficiencia menor al 30%. En el caso de la familia 78xx la corriente máxima de salida es 1A. (Millan, 2010)

Figura 41. Circuito de aplicación de un regulador 7805.



(González, 2009)

Existen otros reguladores lineales que ofrecen una mayor corriente de salida, cuyo precio aumenta, sin embargo, la corriente máxima ofrecida por estos circuitos difícilmente sobrepasa los 5A. El nivel de tensión de salida puede ser determinado para otros integrados, según su circuito aplicación. El integrado LM317 permite determinar el voltaje de salida mediante una relación de resistencias. Algunos distribuidores y desarrolladores ofrecen módulos en los que ya se encuentra el circuito de aplicación de los reguladores, por lo que únicamente se requiere realizar la conexión de entrada y salida, y mediante algún tipo de potenciómetro determinar el nivel de tensión en la salida.

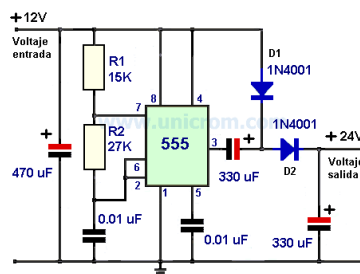
Figura 42. Módulo de regulación de voltaje, utilizando el integrado LM2596.



(González, 2009)

4. Otros tipos de convertidores. Existe una gran variedad de circuitos de aplicación para regular el nivel de tensión, ya que para aumentar o disminuir el voltaje. Sin embargo, la mayoría tiene la limitante de manejar corrientes de salida por lo regular menores a 1A.

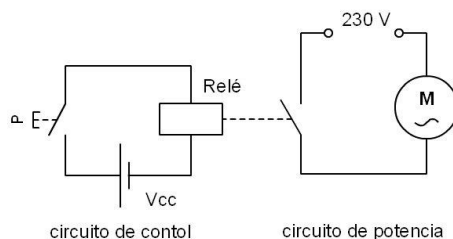
Figura 43. Circuito convertidor de voltaje 12V-24V.



(González, 2009)

Otra alternativa es realizar un cambio de nivel de voltaje por medio de algún componente que funcione como una especie de *switch*. Dispositivos como los *relays* y optoacopladores permiten obtener un cambio de nivel de tensión sencillo, con circuitos de aplicación sin mayor complejidad y con corrientes de salida mayores a 5A, dependiendo de las fuentes de alimentación utilizadas. Estos circuitos no son reguladores en sí, sino que circuitos de cambio de nivel de voltaje, por lo que se requieren dos señales, una señal de control y una señal de alimentación, que será la que se obtendrá en la salida cuando la señal de control lo indique. Estos circuitos también son utilizados para el aislamiento de señales de potencia y señales de control.

Figura 44. Topología básica de un aislamiento de señales utilizando un relay.



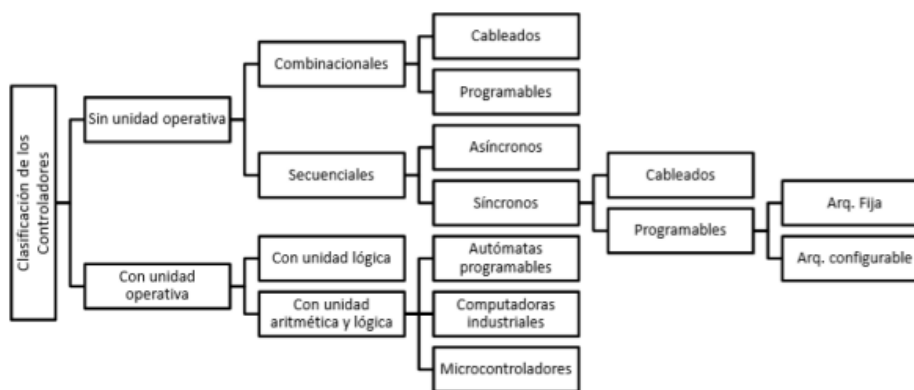
(González, 2009)

G. CONTROLADORES LÓGICOS

El desarrollo de las diferentes tecnologías a lo largo de la primera mitad del siglo XX dio lugar a una repentina elevación de la complejidad de los sistemas e hizo que fuesen muchas las variables físicas que debían que ser vigiladas y controladas. Con el desarrollo de la electrónica, se introduce la noción de sistemas capaces de procesar y hasta memorizar variables. Los sistemas electrónicos que reciben variables binarias en sus entradas y generan a partir de ellas otras variables binarias reciben el nombre de controladores lógicos. (Búrbano, 2016)

A lo largo de la historia los controladores lógicos fueron avanzando según las necesidades de la industria, mejorando su rendimiento y facilitando su uso para las grandes industrias. Según sus características, los controladores lógicos pueden clasificarse según se puede observar en la siguiente Figura.

Figura 45. Clasificación de controladores lógicos.

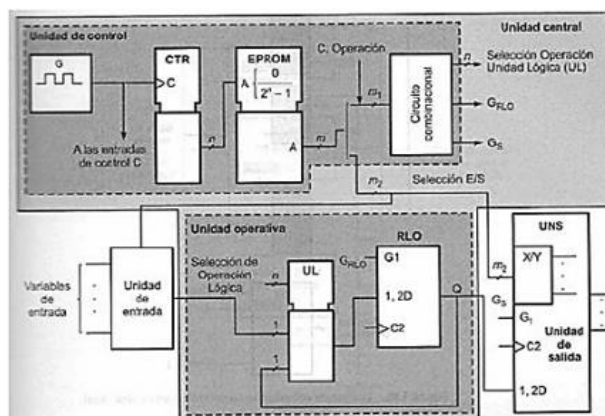


La división principal en los tipos de controladores lógicos es la posesión de unidad operativa, que surgió con la necesidad procesar operaciones lógicas y aritméticas con versatilidad y rapidez. Para este proyecto toman relevancia únicamente los controladores con unidad aritmética y lógica, por lo que se profundizará en sus características.

1. **Autómatas programables.** Los controladores lógicos que son procesadores digitales secuenciales programables que actúan sobre las variables de salida mediante la ejecución de una secuencia de instrucciones se denominan controladores lógicos programables. En la actualidad se les conoce como PLC por sus siglas en inglés (programmable logic controller) y también por la denominación autómatas programables. (Búrbano, 2016)

Los PLC son ideales para grandes industrias, ya que tienen procesadores capaces de manejar una gran cantidad de datos a una gran velocidad. La capacidad de procesamiento, límite de variables a manejar, entradas y salidas del sistema, velocidad de proceso y otras características dependen del PLC. Los PLC pueden manejar niveles de tensión de corriente directa mayores a 5V, e incluso se pueden utilizar para controlar actuadores que funcionen con corriente alterna. Se pueden agregar módulos de entradas y salidas analógicas, y pueden manejar una gran variedad de protocolos de comunicación. Los PLC se pueden programar de distintas maneras, y sus lenguajes más complejos brindan la capacidad de manejar variables de varios tipos y controlar procesos complejos.

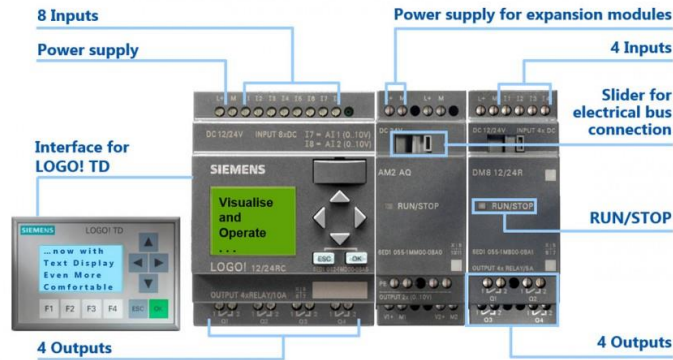
Figura 46. Diagrama básico de un PLC:



La gran limitante de los autómatas programables es su precio, ya que fácilmente puede sobrepasar los \$1000. Los costos de instalación son elevados y dependiendo de las necesidades del sistema puede ser necesaria la incursión de módulos adicionales de trabajo. SIEMENS es un ejemplo de fabricantes de PLC. Existen alternativas de bajo costo de autómatas programables sencillos, cuyo precio es menor a \$1000. Estos controladores por lo general suelen estar limitados en recursos respecto a sus contrapartes más costosos, sin embargo, para aplicaciones y procesos de complejidad media baja y baja son ideales. Uno de estas alternativas son los LOGO, desarrollados por SIEMENS, cuyo precio no asciende a más que \$300.²

² Dato obtenido de https://www.amazon.com/SIEMENS-230VAC-INPUTS-MODULE-052-1FB00-0BA8/dp/B01EGOUXMU/ref=sr_1_1?ie=UTF8&qid=1475722400&sr=8-1&keywords=plc+logo

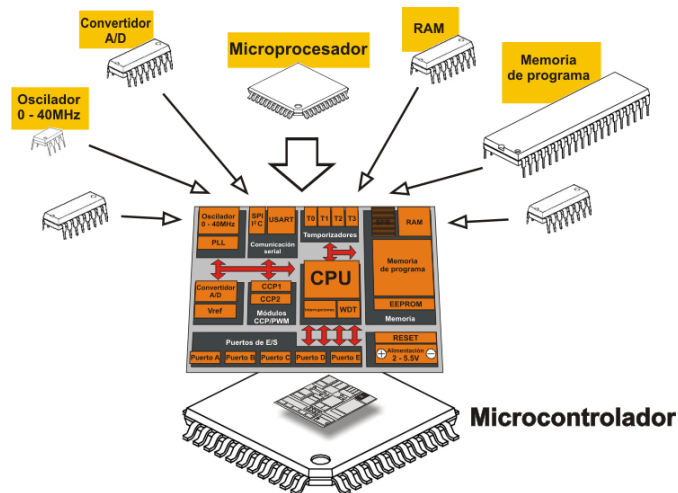
Figura 47. Controlador lógico LOGO.



(Mikroelektronika, 2014)

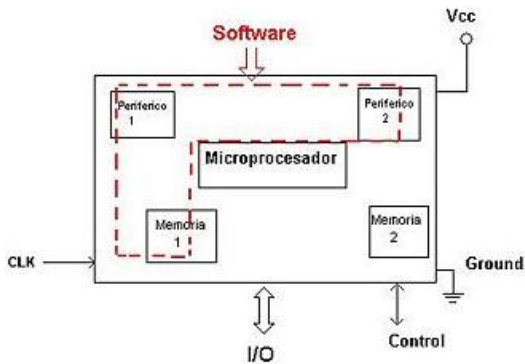
2. **Microcontroladores.** Un microcontrolador es un circuito integrado o chip que incluye en su interior las tres unidades funcionales de una computadora: CPU, Memoria y Unidades de E/S, es decir, se trata de un computador completo en un solo circuito integrado. Son diseñados para disminuir el coste económico y el consumo de energía de un sistema en particular. Por eso el tamaño de la CPU, la cantidad de memoria y los periféricos incluidos dependerán de la aplicación. El control de un electrodoméstico sencillo como una batidora, utilizará un procesador muy pequeño (4 u 8 bit) por que sustituirá a un autómatas finito. En cambio, un reproductor de música y/o vídeo digital (mp3 o mp4) requerirá de un procesador de 32 bit o de 64 bit y de uno o más Códec de señal digital (audio y/o vídeo). El control de un sistema de frenos ABS (Antilock Brake System) se basa normalmente en un microcontrolador de 16 bit, al igual que el sistema de control electrónico del motor en un automóvil. (Mikroelektronika, 2014)

Figura 48. Arquitectura básica de un microcontrolador.



(Mikroelektronika, 2014)

Figura 49. Arquitectura básica de un microcontrolador.



(Mikroelectronica, 2014)

Los microcontroladores representan la inmensa mayoría de los chips de computadoras vendidos, sobre un 50% son controladores "simples" y el restante corresponde a DSPs más especializados. Mientras se pueden tener uno o dos microprocesadores de propósito general en casa, se suelen poseer distribuidos seguramente entre los electrodomésticos del hogar una o dos docenas de microcontroladores. Pueden encontrarse en casi cualquier dispositivo electrónico como automóviles, lavadoras, hornos microondas, teléfonos. (Sánchez S. , 2013)

Figura 50. Aplicaciones de los microcontroladores.



(Mikroelectronica, 2014)

Un microcontrolador difiere de una CPU normal, debido a que es más fácil convertirla en una computadora en funcionamiento, con un mínimo de chips externos de apoyo. La idea es que el chip se coloque en el dispositivo, enganchado a la fuente de energía y de información que necesite, y eso es todo. Un microprocesador tradicional no permitiría hacer esto, ya que espera que todas estas tareas sean manejadas por otros chips. Hay que agregarle los módulos de entrada/salida (puertos) y la memoria para almacenamiento de información.

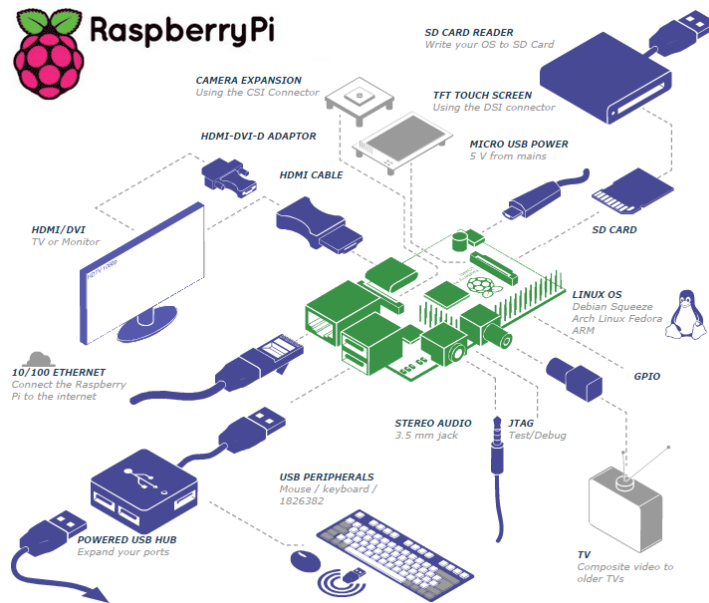
Por ejemplo, un microcontrolador típico tendrá un generador de reloj integrado y una pequeña cantidad de memoria RAM y ROM/EPROM/EEPROM/FLASH, significando que para hacerlo funcionar, todo lo que se necesita son unos pocos programas de control y un cristal de sincronización. Los microcontroladores disponen generalmente también de una gran variedad de dispositivos de entrada/salida, como convertidores de analógico a digital, temporizadores, UARTs y buses de interfaz serie especializados, como I²C y CAN. Frecuentemente, estos dispositivos integrados pueden ser controlados por instrucciones de procesadores especializados. Los modernos microcontroladores frecuentemente incluyen un lenguaje de programación integrado, como el BASIC que se utiliza bastante con este propósito. Los microcontroladores negocian la velocidad y la flexibilidad para facilitar su uso. Debido a que se utiliza bastante sitio en el chip para incluir funcionalidad, como los dispositivos de entrada/salida o la memoria que incluye el microcontrolador, se ha de prescindir de cualquier otra circuitería. (Sánchez S. , 2013)

A pesar de poseer una menor capacidad de procesamiento que un PLC, los microcontroladores son ideales para una gran gama de aplicaciones, y su costo suele ser menor a \$100. Los distribuidores más conocidos de microcontroladores son Microchip y Atmel, responsables de los conocidos PIC y Arduino, respectivamente.

3. **Otras alternativas.** Existen alternativas a los microcontroladores y los autómatas programables que podrían desempeñar sus funciones en ciertas aplicaciones. Una de las alternativas más interesantes es el uso de computadoras. Utilizar una computadora personal para una aplicación industrial no sería adecuado, sin embargo, existen ordenadores que tienen un enfoque diferente, brindarle una alternativa al uso de microcontroladores en procesos especializados.

Las coloquialmente llamadas minis PC's son una buena opción para disfrutar de toda la potencia de un ordenador, pero recurriendo a un tamaño compacto. Pueden ser utilizadas como servidor de contenidos, conectados al televisor y, por supuesto, como ordenador al uso. Raspberry Pi es uno de los productos más populares para estos fines, tanto por su atractivo precio como por las enormes opciones que trae consigo. Pero hasta este punto no podríamos suplir a un microcontrolador con una Raspberry Pi, sin embargo, una Raspberry Pi tiene la variante respecto a una PC común y corriente en que posee entradas y salidas digitales, por lo que se pueden manejar procesos que requieran entradas y salidas. A pesar de que el enfoque de este tipo de dispositivos es diferente, una mini PC puede desempeñar como un controlador lógico en algunas aplicaciones. (Castro A. , 2014)

Figura 51. Esquema básico de una Raspberry Pi.



(Castro A. , 2014)

H. PROCESOS DE MANUFACTURA

Un proceso de manufactura son todos los procedimientos realizados para cambiar la forma de la materia prima. Si la deformación sobre una pieza es intencional y aumenta su valor, los pasos y proceso para deformar la pieza son considerados un proceso de manufactura. Se profundizará sobre los procesos de manufactura realizados en el proyecto.

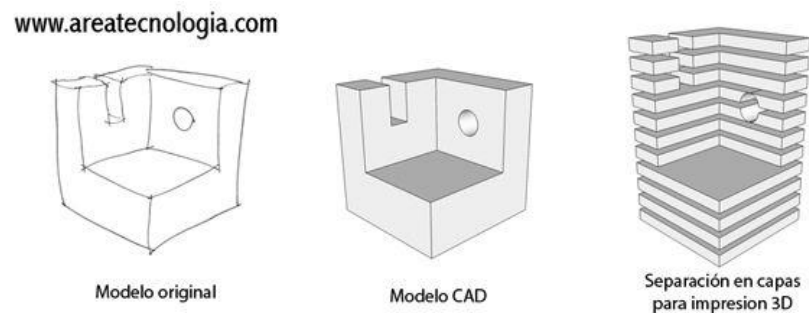
1. **Impresión 3D.** Las impresoras 3D básicamente se crearon para transformar archivos CAD en 3 dimensiones en prototipos reales. Del mismo modo que una impresora convencional es capaz de imprimir una hoja de papel con los esquemas realizados en un programa CAD 2D, las impresoras 3D son capaces de dar cuerpo a los diseños en 3 dimensiones. (Penalva, 2006)

Las versiones comerciales construyen piezas a partir de los datos de un archivo CAD en formato STL (monocromo) o VRML (color). Ambas fabrican la pieza capa a capa. La geometría del modelo se construye esparciendo una capa de polvo, imprimiendo una sección horizontal de la pieza y después repitiendo el proceso (esparcir polvo e imprimir sección) hasta terminar la pieza. (Penalva, 2006)

Las capas se construyen una encima de otra hasta que la pieza se completa. La geometría de la pieza se soporta gracias al polvo “no-imprimido”, lo que permite un amplio rango de complejidad en las piezas. Esta tecnología no necesita estructuras de soporte durante la fase de construcción, ya que el polvo cumple esa función hasta que la pieza se desentierra de la cubeta de fabricación. (Penalva, 2006)

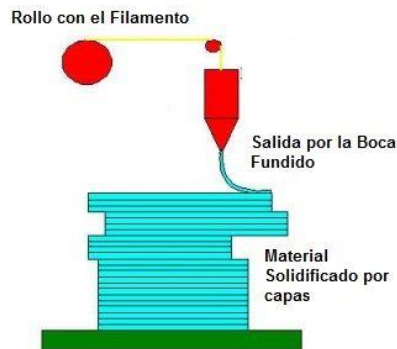
El tipo de impresoras más conocidas son las de Adición de polímeros o FDM. Este tipo de impresoras van fundiendo un filamento (hilo) de polímero mediante un pico (boca de salida) y depositando capa sobre capa el material fundido hasta crear el objeto sólido. En esta tecnología, el propio material se va añadiendo por capas hasta crear la forma deseada. Las impresoras que emplean esta técnica tienen un coste menor y son las más utilizadas en el ámbito educativo. Esta técnica también se conoce como "Deposición de Material Fundido" o FDM. Es una tecnología que permite conseguir piezas utilizando plástico ABS (similar al material de los juguetes Lego) o bien PLA (un polímero biodegradable que se produce desde un material orgánico). (Penalva, 2006)

Figura 52. Proceso de fabricación por medio de impresión 3D.



(Penalva, 2006)

Figura 53. Proceso de fabricación por medio de impresión 3D.



(Penalva, 2006)

a. **Filamentos de impresión 3D.** Hoy en día el mercado de las impresoras ha crecido y el desarrollo de estas nuevas tendencias ha incrementado notablemente; desde que las impresoras han sido introducidas para el ámbito industrial, han desarrollado nuevos consumibles que se adapten a las necesidades. (MakerShop, 2014)

El consumible más demandado es el Políácido láctico comúnmente nombrado PLA por su abreviatura; se trata de un material de origen vegetal, lo que lo hace un material amigable con el medio ambiente siendo biodegradable, además que no desprende emisiones nocivas al fundirse, es fácil de utilizar ya que requiere menos temperatura de extrusor que otros filamentos sintéticos. (MakerShop, 2014)

El Acrilonitrilo Butadieno Estireno o también llamado ABS, por sus siglas en inglés, es junto con el PLA uno de los termoplásticos más utilizados en la impresión 3D. Este plástico a diferencia del PLA es un plástico sintético que se usa principalmente como material industrial; ya que es un material muy duro y rígido; además, que este material ofrece una alta resistencia mecánica, química y abrasión. (MakerShop, 2014)

Los otros materiales que actualmente están teniendo gran popularidad en la impresión 3D son el Nylon, LayBrick, LayWood y PVA. El Nylon es un co-polímero de alta resistencia, poco viscoso, resistente a la temperatura, entre las propiedades que más llaman la atención es que aportan flexibilidad, transparencia y durabilidad. El alcohol polivinílico o PVA por sus siglas en inglés, es resistente a aceites, grasas y disolventes, es comúnmente utilizado para material de soporte ya que es un material soluble en agua fría; sus propiedades mecánicas son alta resistencia y flexibilidad, aunque estas están sujetas a la humedad y temperatura que sufra. (MakerShop, 2014)

El LayBrick es una combinación entre yeso y plástico que permite crear impresiones con un alto espectro de acabados superficiales con aspecto de yeso, es ideal para maquetas y diseños arquitectónicos. El LayWood es una mezcla entre madera y plástico y permite acabados en madera que además presenta poca deformación estructural y permite ser fácilmente mecanizado. (MakerShop, 2014)

Principales diferencias entre ABS y PLA: Nos centraremos en estos dos materiales debido a que ya que el ABS y el PLA, los cuales son utilizados por un porcentaje muy elevado entre los usuarios de las impresoras 3D del mercado. (MakerShop, 2014) (Ferrer,2014)

El filamento ABS es un tipo de plástico resistente y duro, el cual permite ser mecanizado fácilmente. Este es soluble en acetona, por lo que una vez terminada la pieza, se le puede hacer un acabado superficial de alto grado como técnica de post-procesado.

El ABS requiere una menor fuerza para ser extruido ya que su coeficiente de fricción es menor, por lo que lo hace ideal para impresión de piezas pequeñas a comparación del PLA. El mayor inconveniente del material es que debe ser extruido a una temperatura mayor, teniendo un rango de fusión de 230°C-240°C, además que la cama caliente en la que se deposita el material debe estar a una temperatura superior de los 80°C. (MakerShop, 2014) (Ferrer,2014)

El PLA es principalmente utilizado por su facilidad uso en la de impresión de las piezas. Entre sus propiedades, este filamento es relativamente más frágil que el ABS y tiene más limitantes a la hora de manipularlo post-proceso. La diferencia de velocidad de impresión es considerable ya que el factor de la temperatura de extrusión no es un factor crítico en la impresión. (MakerShop, 2014) (Ferrer,2014)

Figura 54. Comparación de acabados entre ABS y PLA



(CubeX,2013)

Un efecto negativo del ABS es la emisión de gases nocivos, ya que es un plástico sintético derivado del petróleo, que, al fundirse con la impresora, emite gases levemente nocivos; hecho que no sucede con el PLA que es un material vegetal biodegradable que tiene una buena relación con el medio ambiente. (MakerShop, 2014)

Cuadro 2. Principales diferencias entre filamento ABS y PLA.

ABS	PLA
Temperatura de extrusión: ~ 240 ° C	Temperatura de extrusión: ~ 200 ° C
Requiere cama caliente > 70 ° C	Poca temperatura o bien nula de cama caliente
Funciona bastante bien sin refrigeración de capa	Se beneficia enormemente de refrigeración de capa durante la impresión
Peor adherencia, se necesita cinta de poliamida o laca.	Buena adherencia a una gran variedad de superficies
Resistente a temperaturas altas	Poco resistente a temperaturas altas
Propenso a las grietas, delaminación, y deformación	Propenso a la ondulación de las equinas y salientes
Más flexible	Más frágil
Se pueden unir piezas usando adhesivos o disolventes (acetona o MEK)	Se poden unir piezas usando adhesivos específicos
Los humos son desagradables y nocivos en áreas cerradas	Humos no nocivos y olor más agradable
Plástico derivado del petróleo	Plástico de origen vegetal

(Ferrer,2014)

Corte láser. El proceso consiste en la focalización del haz láser en un punto del material que se desea tratar, para que éste funda y evapore lográndose así el corte. El haz láser, con una determinada potencia procedente del generador y de un sistema de conducción llegará al cabezal. Dentro de éste, un grupo óptico se encarga de focalizar el haz con un diámetro determinado, sobre un punto de interés del material a tratar. El posicionamiento del punto focal del rayo respecto de la superficie que se desea cortar es un parámetro crítico. El proceso requiere de un gas de asistencia, que se aplica mediante la propia boquilla del cabezal, coaxial al propio rayo láser.

Aunque la aplicación mayoritaria del corte con láser se da en materiales metálicos, otro tipo de materiales como goma, vidrio, cuero, o madera son susceptibles de ser cortados con este método. En aplicaciones de corte láser de materiales metálicos debe tenerse en cuenta aspectos como calidad del material o posibles recubrimientos (aceite, óxido, pinturas, etc.) como condicionantes importantes del resultado final. (EcuRed, 2014)

Figura 55. Proceso de corte láser.



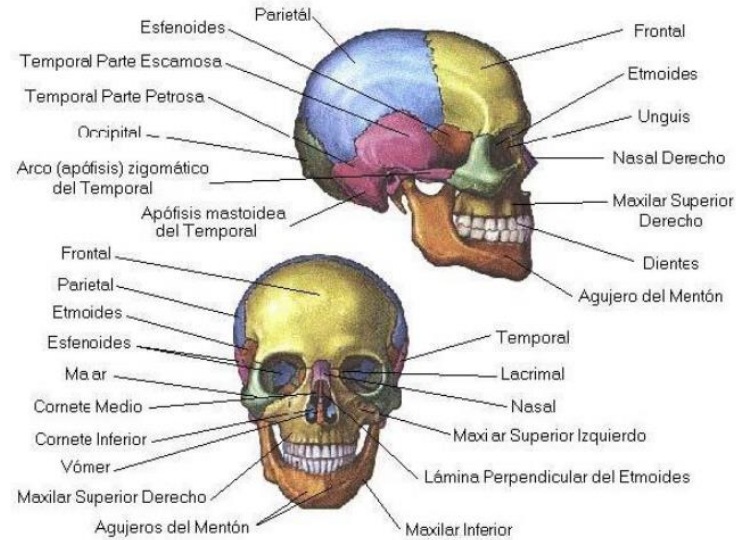
(EcuRed, 2014)

Entre las aplicaciones industriales del láser para procesamiento de materiales se calcula que en torno al 60% de la actividad está dedicada al corte. Una de las industrias que mayormente absorbe esta actividad es la industria del automóvil y la industria auxiliar del automóvil.

I. ESQUELETO DE LA CABEZA Y CUELLO

1. Partes, esqueleto y articulaciones de la cabeza. El cráneo se divide en dos partes fundamentales, la bóveda y base. El esqueleto de la cabeza está formado por el esqueleto del cráneo y el esqueleto de la cara. En la siguiente Figura se muestra un diagrama de los huesos que forman parte de la cabeza.

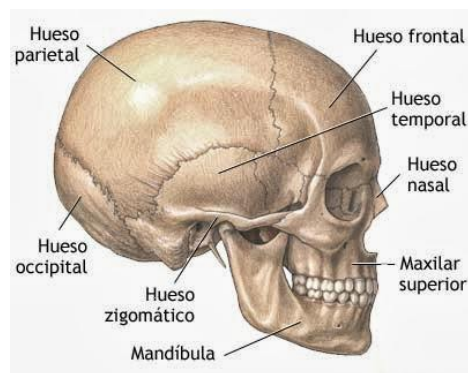
Figura 56. Huesos de la cabeza humana.



(Castro A. , 2013)

Como se puede observar, la cabeza está compuesta por una gran gama de huesos. Debido a que se desea realizar un animatrónico que emule una calavera, solamente se colocará movimiento en la cabeza y cuello de un esqueleto. Por tanto, no es necesario profundizar en cada uno de los huesos que forman parte de la calavera, ya que el único que tendrá movimiento será la mandíbula. Toda la estructura ósea de la cabeza no es de relevancia para el proyecto. El requerimiento esencial es utilizar una calavera que permita el movimiento de la mandíbula.

Figura 57. Ubicación de la mandíbula en el cráneo humano.



(Castro A. , 2013)

La mandíbula constituye el esqueleto a la parte inferior de la cara y se articula con el hueso temporal del cráneo constituyendo la articulación temporomandibular; participa en los movimientos de la masticación y en los de la articulación de palabras. (Castro A. , 2013)

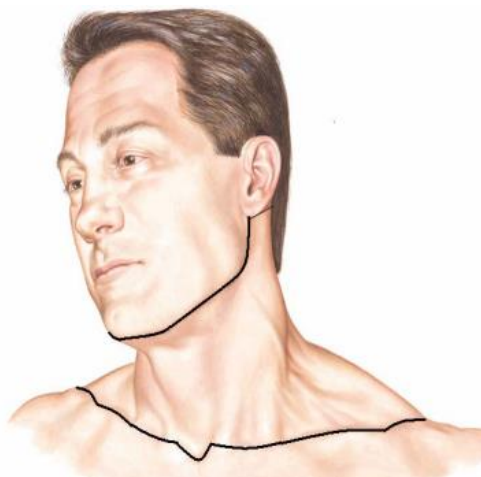
Figura 58. Partes de la mandíbula.



(Castro A. , 2013)

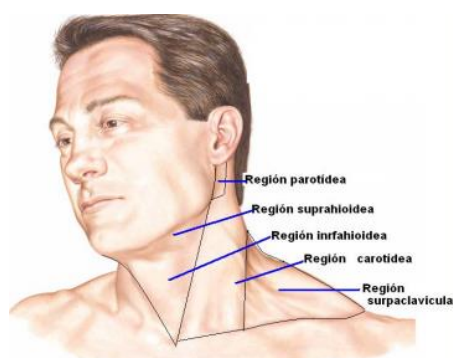
2. Partes, articulaciones y esqueleto del cuello. El cuello es la parte del cuerpo comprendida entre la cabeza y el tórax. El cuello es una región de transición entre la cabeza, el tórax y los miembros superiores. El cuello es un paso para elementos vasculares, nerviosos y viscerales entre la cabeza y el tórax. La forma del cuello es cilíndrica, y la morfología específica del mismo depende de la edad, sexo y otras características de la persona. Para una persona promedio de sexo masculino, el cuello tiene una longitud de 8cm. En la figura se pueden observar los límites superiores e inferiores del cuello. (Naranjo, 2012)

Figura 59. Límites superiores e inferiores del cuello.



(Naranjo, 2012)

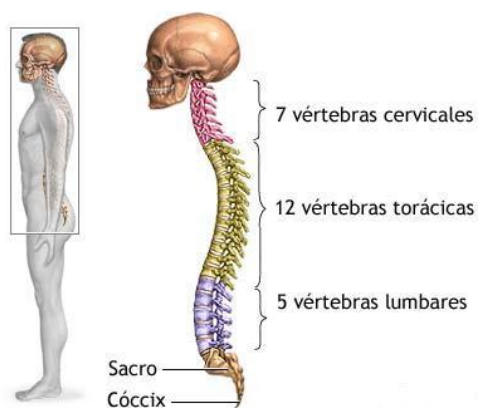
Figura 60. Regiones del cuello.



(Naranjo, 2012)

La columna vertebral se divide en tres regiones, la cervical, la torácica y la lumbar. Para nuestro estudio toma relevancia únicamente la región cervical, ya que es la que toma un papel en los movimientos del cuello.

Figura 61. Regiones de la columna vertebral.



(Naranjo, 2012)

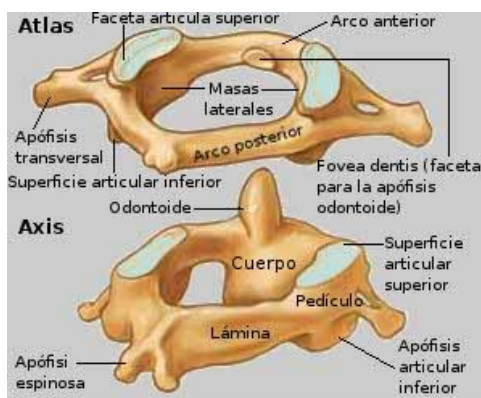
De la región cervical de la columna vertebral, las vértebras axis y atlas toman relevancia, ya que son responsables del movimiento del cuello. (Naranjo, 2012)

Figura 62. Ubicación de las vértebras atlas y axis.



(amici, 2012)

Figura 63. Partes del Atlas y Axis.



(amici, 2012)

El atlas es la primera vértebra cervical. Está situado debajo del cráneo, entre el occipital y el axis. Presenta características especiales que son dos masas laterales. El axis es la segunda vértebra cervical. Se sitúa por debajo del atlas y presenta características especiales en las distintas partes de la vértebra. Tiene forma cilindrocónica. Presenta dos partes separadas por una estrechez llamada cuello. (amici, 2012)

Existen tres articulaciones que permiten movimiento en el cuello. Para la unión del atlas con el axis hay dos articulaciones, la atlododontoidea y la atlodoaxoidea.

La Articulación atlododontoidea (articulación atlodoaxoidea media) es una diartrosis del género trocoide, formada por dos partes: la parte anterior entre el arco anterior del atlas y la apófisis odontoides o articulación atlododontoidea propiamente dicha. La parte posterior entre la apófisis odontoides y el ligamento transversal o articulación sindesmodontoidea. Produce movimientos de rotación del atlas alrededor del eje de la apófisis odontoides del axis, y por tanto de la cabeza sobre el cuello. (amici, 2012)

La Articulación atlodoaxoidea (articulación atlodoaxoidea lateral). + Son diartrosis, pertenecientes al género artrodia. Como superficies articulares tiene la superficie articular inferior del atlas, que recubierta de cartílago es ligeramente convexa. La superficie articular superior del axis, que recubierta de cartílago es ligeramente convexa. No existe fibrocartílago. Permite movimientos de deslizamiento del atlas sobre el axis, durante los movimientos de rotación del atlas sobre el axis. (amici, 2012)

También existe una articulación para la unión del occipital con el atlas, que es articulación occipitoatlóidea, que básicamente son diartrosis del género condílea. Como superficie articular tiene los cóndilos occipitales, que son elípticos y miran hacia abajo y afuera. Las cavidades glenoideas del atlas, que son elípticas con una estrechez media y miran hacia arriba y adentro. Permite movimientos de flexión y extensión de la cabeza sobre el cuello y de inclinación lateral de la misma. (amici, 2012)

J. MOVIMIENTOS DE LA CABEZA Y CUELLO

El cuello puede realizar un gran número de movimientos, debido a que se encuentra formado por una multitud de piezas rígidas superpuestas unidas por elementos elásticos. Esto le permite movilizarse en cualquier de los tres ejes de referencia. Las articulaciones que se estudiaron en la sección anterior le permiten realizar cuatro movimientos básicos.

1. **Flexión.** La flexión es el movimiento producido por el deslizamiento de la vértebra superior sobre la inferior, debido al grosor del disco intervertebral. El núcleo pulposo se desliza hacia atrás. Este movimiento se encuentra limitado por ligamentos vertebrales. (Sánchez J. , 2012)

Figura 64. Representación del movimiento de flexión.



(Sánchez J. , 2012)

2. **Extensión.** La extensión es producida por las mismas razones que la flexión. En este caso el núcleo pulposo se desliza hacia adelante. La limitación de este movimiento es producida por el choque de la apófisis de las vértebras cervicales. (Sánchez J. , 2012)

Figura 65. Representación del movimiento de extensión.



(Sánchez J. , 2012)

3. **Inclinación y rotación.** Tanto la inclinación como la rotación se producen por la existencia de articulaciones en forma de cuña, que proporcionan un apoyo oblicuo de una vértebra sobre otra, lo que causa un resbalamiento entre vértebras cuando una de las dos se inclina. (Sánchez J. , 2012)

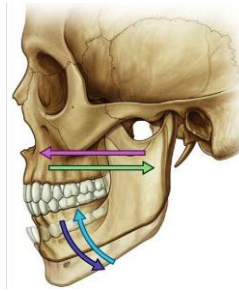
Figura 66. Representación del movimiento de rotación e inclinación



(Sánchez J. , 2012)

4. **Movimiento de mandíbula.** Los movimientos mandibulares son: apertura, cierre, lateralidad, protrusión y retrusión. Se profundizará únicamente en los movimientos que se desean realizar en el animatrónico. Los movimientos de la mandíbula se pueden realizar por la articulación temporomandibular.

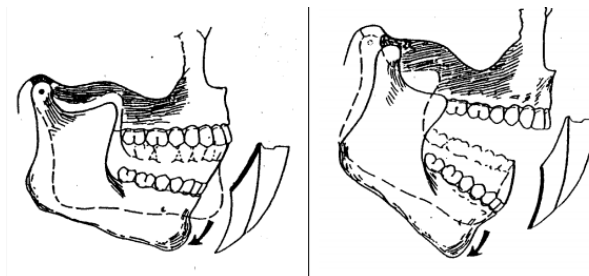
Figura 67. Movimientos mandibulares.



(Sánchez J. , 2012)

Los movimientos de apertura y cierre se producen partiendo de la posición de contacto retrusivo y produciendo una apertura mandibular, el movimiento puede ser dividido en dos componentes: cuando los cóndilos están en rotación (eje de bisagra) hasta que los incisivos inferiores se separen de los superiores aproximadamente unos 25 milímetros y cuando los cóndilos comienzan la translación. (Castro A. , 2013)

Figura 68. Rotación (izquierda) y translación (derecha) producida en la apertura y cierre de mandíbula.

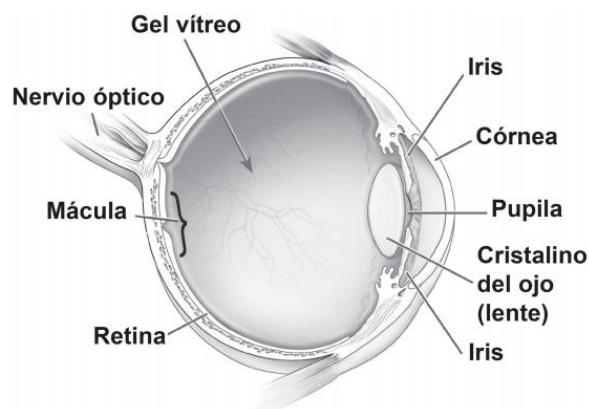


(Castro A. , 2013)

K. PARTES Y MOVIMIENTOS DEL OJO HUMANO

1. Partes principales del ojo

Figura 69. Partes del ojo.



(Castro A. , 2013)

Córnea: La córnea es la capa clara que está sobre el ojo. La córnea protege al ojo y ayuda a enfocar la luz.

Cristalino del ojo (lente): El cristalino es la parte clara del ojo detrás del iris. Este lente ayuda a enfocar la luz y las imágenes en la retina.

Gel vítreo: El vítreo es como una gelatina clara y sin color. Se encuentra entre el lente y la retina. El vítreo llena dos tercios de la parte de atrás del globo del ojo.

Iris: El iris es la parte que da color al ojo y ajusta el tamaño de la pupila. El iris regula la cantidad de luz que entra al ojo.

Mácula: La mácula es la pequeña zona sensible de la retina. Es responsable de la visión central y también ayuda a ver los detalles pequeños.

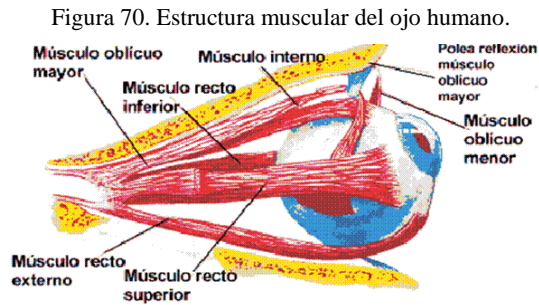
Nervio óptico: El nervio óptico es el nervio sensorial más grande del ojo. Este nervio es el que manda impulsos visuales desde la retina hasta el cerebro.

Pupila: La pupila es el agujero redondo en el centro del iris. La pupila se achica o agranda dependiendo de la cantidad de luz que le entra al ojo.

Retina: La retina es el tejido en la parte de atrás del ojo. La retina es sensible a la luz, ya que la convierte en impulsos eléctricos. Luego, estos impulsos son enviados al cerebro a través del nervio óptico. (National Eye Institute, 2011)

2. **Movimientos del ojo.** Los ojos tienen distintos movimientos que cumplen con distintos propósitos que surgen de ciertas necesidades del ser humano, entre las que se pueden mencionar: movimientos de compensación del movimiento craneal para fijar un estímulo visual, mantener centrada la imagen en la fovea, aumento del campo de fijación binocular hasta 360° al coordinar movimientos oculares y de la cabeza, coordinación ocular para obtener visión haplópica y mantener las ventajas de la visión binocular. (Universidad de Alicante, 2012)

Según Guyton (1992), en el ámbito muscular, el ojo puede moverse en todas las direcciones alrededor de un punto fijo, gracias a seis músculos que se insertan en la esclerótica, además de un séptimo músculo insertado en el párpado superior y encargado de su elevación. Así, dentro del ojo encontramos, músculos oculares extrínsecos, esqueléticos y voluntarios, que se insertan en el exterior del globo ocular y en los huesos de la órbita, cuya función es mover el globo ocular en la dirección deseada.

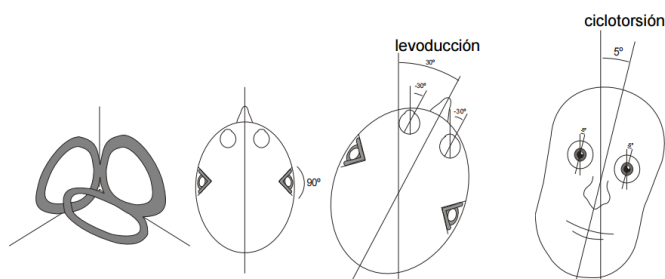


(Universidad de Alicante, 2012)

Existen tres tipos de movimientos oculares, los cuales se especifican a continuación.

a. **Mantenimiento de la mirada.** Compensan el movimiento de la cabeza o del objeto para que la imagen permanezca sobre la fovea. Existen dos movimientos para el mantenimiento de la mirada: los vestibulo-oculares, que compensan movimiento de cabeza; los optocinéticos, que compensan movimiento de objeto. (Universidad de Alicante, 2012)

Figura 71. Mantenimiento de la mirada.



(Universidad de Alicante, 2012)

b. **Desplazamiento de la mirada.** Permiten pasar la atención de un objeto a otro y ayudan al incremento del campo visual efectivo. Existen tres movimientos para el desplazamiento de la mirada: sacádicos, seguimiento y vergencias. (Universidad de Alicante, 2012)

c. **Fijación binocular.** Evitan el fenómeno del Fading y ayudan en el mantenimiento fijación binocular. Existen tres movimientos para la fijación binocular: trémores, fluctuaciones y microsacádicos. (Universidad de Alicante, 2012)

3. **Significado de la posición de los ojos.** La mirada, y por ende la posición de los ojos, pueden transmitir sentimientos de la persona. En la siguiente figura se muestra el significado de la posición de los ojos de una persona. Este tipo de aspectos y su correcta utilización en tecnologías como los animatrónicos le brindan un mayor realismo a la máquina.

Figura 72. Significado de la mirada.

El significado de la mirada



Imagina
Ojos hacia arriba a la izquierda
Imagina cosas que no vio antes o inventa. Delata mentira.



Recuerda
Ojos hacia arriba a la derecha
Recuerda cosas que conoce o momentos vividos.



Imagina o recuerda
Ojos centrados, mirando el vacío



Relacionado con la audición
Ojos hacia los lados
Imagina, recuerda o intenta escuchar mejor un sonido.



Sensaciones o emociones
Ojos hacia abajo a la izquierda
Está recordando sensaciones o emociones que ya le sucedieron.



Piensa
Ojos hacia abajo a la derecha
Está hablando con ella misma.

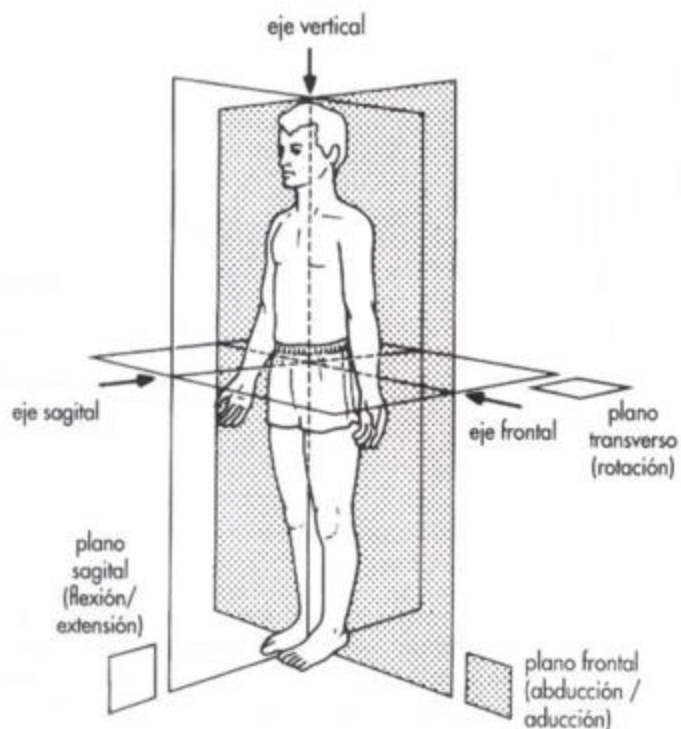
(Universidad de Alicante, 2012)

L. FISIOLÓGÍA Y BIOMECÁNICA DEL BRAZO HUMANO

1. Planos y ejes del movimiento humano. El cuerpo humano, gracias a las extremidades permite varios movimientos que se dan en varios planos y ejes; cuando estudiamos los movimientos del ser humano, sirve de ayuda caracterizarlos con planos específicos de movimiento. La Figura 73 nos permite apreciar a un ser humano en la posición que se denomina “posición anatómica básica”. (Acero, 2013)

La posición anatómica básica está definida con un sujeto parado, con pies levemente separados y situados aproximadamente a la altura de los hombros, con la cabeza erguida y con los brazos extendidos a ambos lados del cuerpo levemente separados del tronco con las manos mirando al frente y los dedos pulgares mirando hacia afuera. (Acero, 2013)

Figura 73. Planos y ejes del movimiento humano.



(Acero, 2013)

En los planos primarios tenemos:

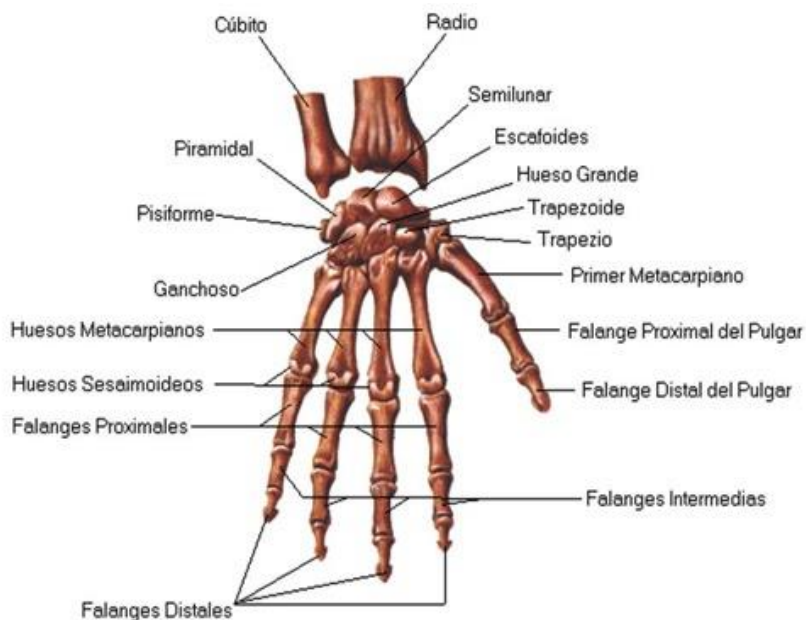
- Plano sagital: plano que divide el cuerpo en dos mitades, derecha e izquierda; en él se describen movimientos de flexión y extensión. Su eje es el frontal o transversal. (Acero, 2013)

- Plano frontal: plano que divide el cuerpo en otras dos mitades, la anterior o delantera y la posterior o trasera; en él se describen movimientos de abducción y adducción. Su eje es el sagital o anteroposterior. (Acero, 2013)
- Plano transversal: plano que divide el cuerpo en las mitades superior e inferior; donde se describen las rotaciones. Su eje es el vertical. (Acero, 2013)

2. **Mano humana.** La mano es el órgano inferior de la extremidad superior de cuerpo, que en el ser humano es una de las partes más importantes del cuerpo, ya que tiene una gran importancia funcional, brindando la posibilidad de ser un segmento efector, sensitivo, permite efectuar varios movimientos y acciones necesarias para la supervivencia y relación con nuestro entorno.

La mano humana se compone de 27 huesos divididos en tres grupos: el carpo, el metacarpo y las falanges, se conecta a la muñeca a través de la palma y en ella tenemos veinte grados de libertad accionados por cerca cuarenta músculos, por lo que la hace muy compleja de emular y útil para el desarrollo del ser humano. (Quinayás, 2010)

Figura 74. Estructura ósea de la mano.



(Lucía, 2015)

En la mano cada dedo está compuesto por tres falanges (Distal, intermedia y proximal), con la excepción del dedo pulgar que sólo tiene dos (Distal y proximal). El dedo pulgar está fijo por debajo de los otros dedos y puede realizar los movimientos de cierre y rotación, gracias a que el metacarpo tiene una gran movilidad.

El dedo pulgar es uno de los dedos más importantes para el ser humano y lo que nos diferencia de otras especies; el dedo pulgar es el agente de la pinza pulgar-dedos, sin él, los movimientos de los dedos constituirían solo prensiones globales en lugar de poseer movimientos precisos. (Delmas, 2010) (Quinayás, 2010)

Con el dedo pulgar podemos hacer los siguientes movimientos:

- Abducción-extensión: separa el dedo pulgar del eje de la mano, su amplitud es de 35 a 40°, este movimiento permite abrir la mano. (Delmas, 2010)
- Aducción: aproxima el dedo pulgar al eje de la mano. Su amplitud es de 35 a 40°. (Delmas, 2010)
- Oposición: combinada con la flexión del dedo pulgar, lo conduce frente al dedo meñique. Se trata de un movimiento de prensión o cierre de la mano y presenta una amplitud de 45 a 60°. (Delmas, 2010)
- Reposición: devuelve el dedo pulgar a su posición inicial de partida, su amplitud es necesariamente igual a la del movimiento precedente. (Delmas, 2010)

Los dedos presentan principalmente tres articulaciones; articulación metacarpo falángica (MCP): esta une la falange metacarpiana y la proximal de un dedo o pulgar; articulación interfalángica distal (DIP): ubicada entre las falanges media y distal del dedo; articulación interfalángica proximal (PIP): localizada entre las falanges media y proximal del dedo. (Robots, 2012)

Figura 75. Falanges y articulaciones del dedo índice.



(Robots, 2012)

De acuerdo a estudios de biomecánica de la mano y de medidas antropométricas; se tomó de referencia las características del dedo índice ya que tiene muchas similitudes con los demás dedos. (Quinayás, 2010)

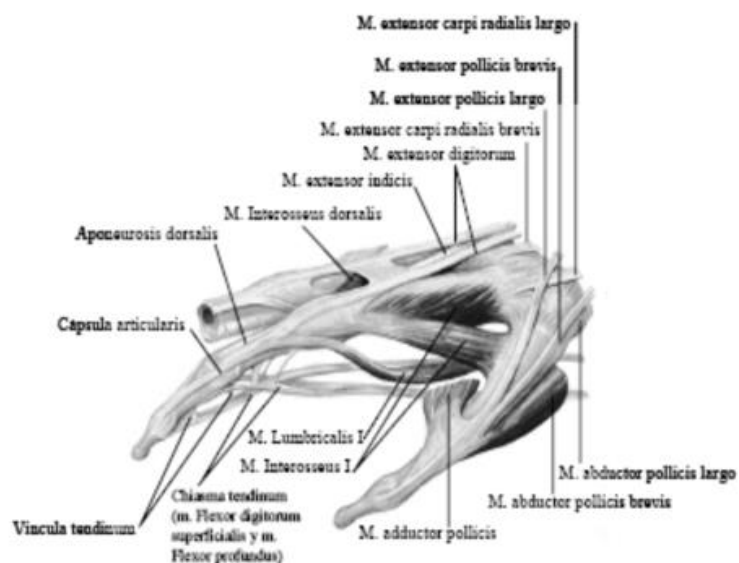
Cuadro 3. Límites de la mano humano y articulaciones de los dedos

Dedo	Articulación	Grados de libertad	Ángulo flexión-extensión	Ángulo abducción-aducción
Índice	DIP	1	60°	-
	PIP	1	100°	-
	MCP	2	90°	60°
Pulgar	IP	1	85°	-
	MCP	2	50°	30°
	CMC	2	120°	40°

(Taylor, 1955)

a. Tendones y músculos. En los dedos existen tres grupos básicos de músculos: los extrínsecos originados en la parte anterior del antebrazo; el flexor profundo y superficial perteneciente a este grupo. Los músculos extensores extrínsecos originados en la parte posterior del antebrazo, el musculo extensor digitorum pertenece a este grupo. Finalmente, los músculos intrínsecos cuyo origen va del distal a la articulación de la muñeca. Todos ayudan y benefician al movimiento y la estabilidad de los dedos. (Mazariegos, 2012) (García, 2001)

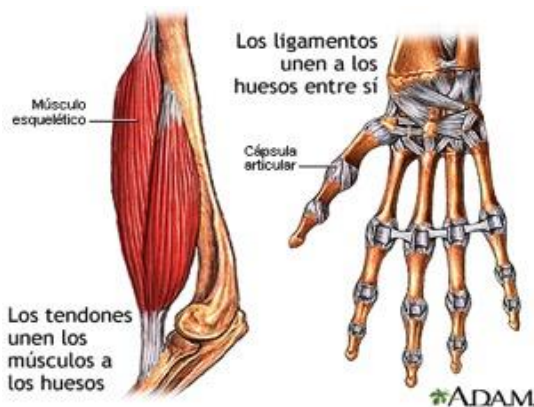
Figura 76. Tendones y músculos del dedo índice.



(García, 2001)

Los tendones son tejidos fibrosos que unen los músculos con el hueso y su función principal es transferir fuerza por contracción muscular, para así lograr producir el movimiento de las articulaciones, así como para mantener estables y rígidos los huesos. (Mazariegos, 2012) (Vorvick, 2014)

Figura 77. Tendones y ligamentos de la mano.

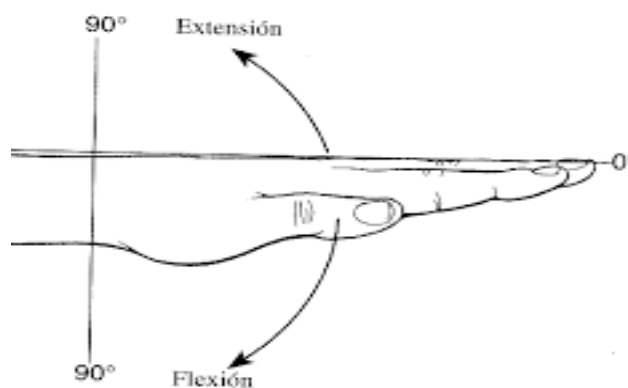


(Vorvick, 2014)

La articulación de la muñeca tiene como núcleo central el carpo; esta articulación permite la posición óptima de la prensión. Los movimientos que se pueden realizar en esta articulación son los de flexión y extensión, los cuales tienen un movimiento máximo de 90° .

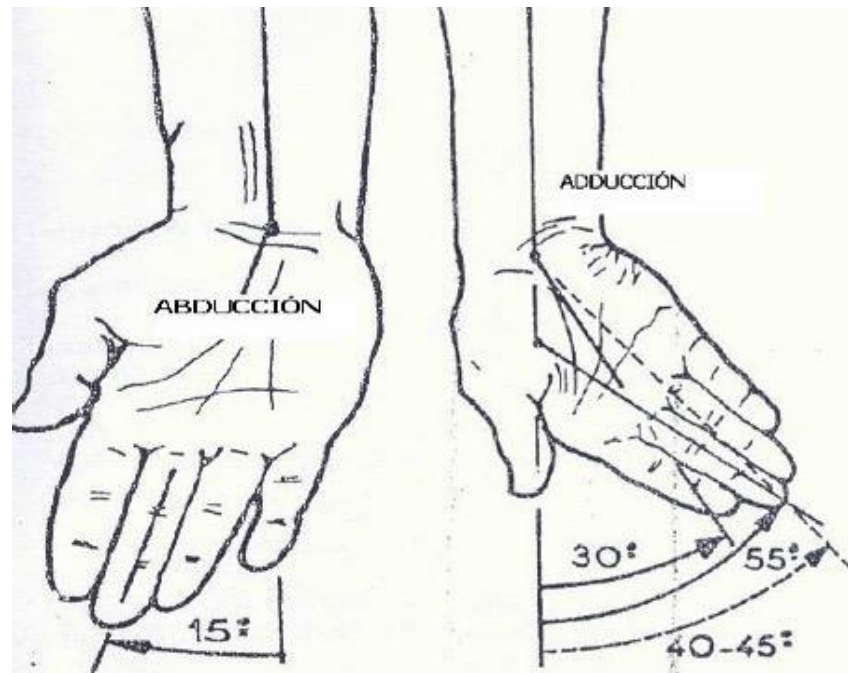
La articulación también tiene movimiento de aducción y abducción, en la cual el eje de la mano pasa por el tercer metacarpiano y se localiza en la prolongación del eje del antebrazo. El movimiento de abducción puede llevar a 15° , mientras que el movimiento de aducción puede llegar a los 30° .

Figura 78. Movimientos de flexión y extensión en articulación de muñeca.



(Juan, 2015)

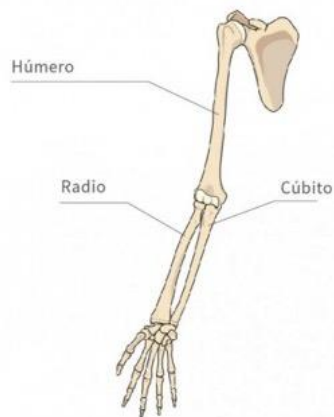
Figura 79. Movimientos de abducción y aducción en articulación de muñeca.



(TADAD, 2015)

3. **Antebrazo humano.** El antebrazo se compone de dos huesos denominados radio y cúbito. Este comienza desde la articulación del codo y termina hasta los huesos de la mano en la muñeca. (Osuna 2012)

Figura 80. Esqueleto del brazo.



(Osuna 2012)

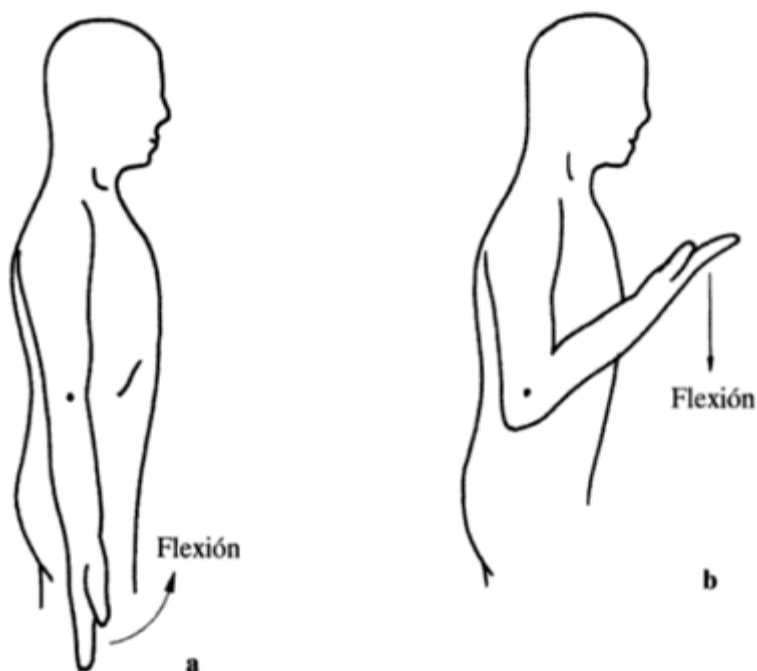
La articulación del codo es una articulación intermedia entre el brazo y antebrazo. Se considera que está subordinada a la mano porque le permite a ésta y a los dedos situarse en el espacio. La articulación del codo es de suma importancia ya que nos permite el acortamiento y alargamiento de la extremidad superior; nos permite la capacidad de poder llevar comida a nuestra boca gracias a la flexión del codo. (Palastanga, 2016)

La articulación cuenta con varios ligamentos colaterales y músculos que se hallan agrupados a los lados de la articulación, donde no interfieren con el movimiento. Los movimientos posibles de la articulación del codo son la flexión y la extensión en torno a un eje transversal. (Palastanga, 2016)

La flexión es un movimiento del antebrazo en sentido a las agujas del reloj (Figura 9.a), y termina hasta que el contacto ante el antebrazo y el brazo impide la continuación del movimiento (Figura 9.b). La amplitud del movimiento de flexión es de 145° , en algunos casos puede llegar a ser de 160° , midiéndolo desde el eje sagital. El movimiento de flexión está limitado sobre todo por la oposición de los músculos anteriores del brazo y el antebrazo. (Palastanga, 2016)

La extensión es el movimiento del antebrazo en dirección posterior y la mejor definición es la vuelta del antebrazo a la posición anatómica. Estrictamente hablando, la amplitud de extensión posible de la articulación nula, porque la extensión completa corresponde a la posición anatómica. (Robots, 2012)

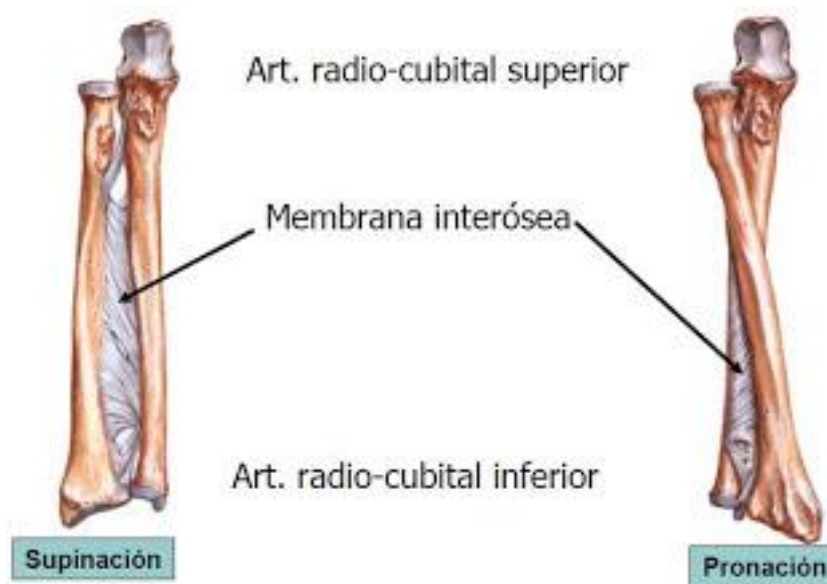
Figura 81. Movimiento de la articulación en la imagen a y b.



(Robots, 2012)

El movimiento que provoca el cruce del radio y el cubito recibe el nombre de pronación, este movimiento implica un ángulo de 85° , mientras que el movimiento que los hace permanecer paralelos se llama supinación, este último implica un ángulo de 90° . (Palastanga, 2016)

Figura 82. Movimiento de supinación y pronación.



(Perez, 2016)

4. **Brazo humano.** En el brazo existe una articulación de gran importancia para las actividades cotidianas para el desempeño de las actividades: la articulación del hombro. La articulación del hombro se constituye por varias articulaciones, las cuales mantienen su integridad mediante estructuras ligamentosas más que mediante estructuras óseas.

El brazo se compone del hueso húmero, en él tenemos insertados músculos que dan la mayor parte de la fuerza, tal es el caso del músculo que flexiona el brazo o bíceps y el que lo extiende o tríceps. El brazo y el antebrazo están unidos por la articulación del codo.

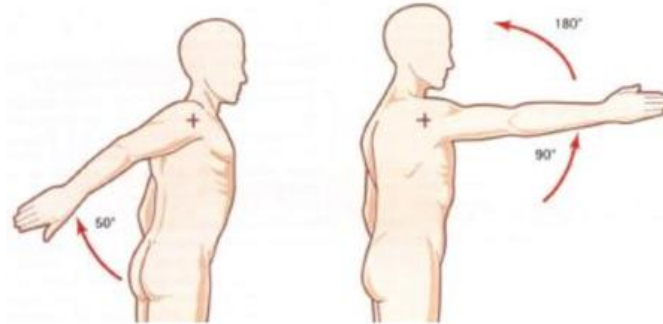
Es la articulación más móvil del cuerpo humano, ya que realiza los tres pares de movimientos básicos y, además, la suma de ellos nos da la circunducción:

La biomecánica del brazo se define en los siguientes movimientos:

- **Flexión:** amplitud máxima de 180° ; este movimiento se logra en tres tiempos: el primero alcanza un ángulo de 60° , y está dado por el fascículo anterior del deltoides, el coracobraquial y pectoral mayor; el segundo alcanza los 120° , e intervienen el trapecio y serrato anterior, el tercero llega a los 180° con ayuda del raquis. (Leloir, 1985)

- **Extensión:** llega a 50° en un solo tiempo; intervienen el redondo mayor, redondo menor, fascículo posterior del deltoides y el dorsal ancho. (Leloir, 1985)

Figura 83. Movimiento biomecánico del hombro de flexión y extensión.

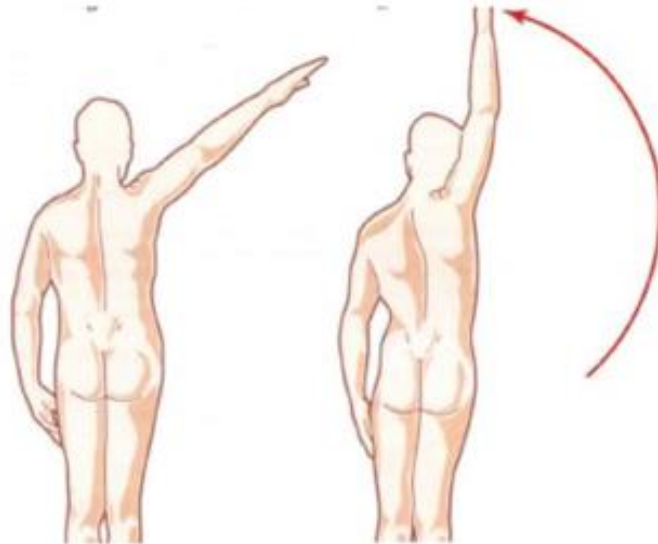


(Leloir, 1985)

- **Abducción:** amplitud máxima de 180° ; este movimiento al igual que la flexión, se logra en tres tiempos: el primero alcanza 60° , y está dado por el fascículo medio del deltoides y supraespinoso; el segundo alcanza los 120° , e intervienen el trapecio y serrato anterior, el tercero llega a los 180° con colaboración del raquis. (Leloir, 1985)

- **Abducción:** alcanza los 30° evitando el tronco por delante o por detrás; en él intervienen los músculos: dorsal ancho, redondo mayor, subescapular y pectoral mayor. (Leloir, 1985)

Figura 84. Movimiento biomecánico del hombro de abducción y aducción.



(Leloir, 1985)

M. ANATOMÍA DEL TORSO HUMANO

En la anatomía humana, el torso o tronco es el pilar central del cuerpo humano ya que une las extremidades superiores con las extremidades inferiores por lo que constituye la base para los principales movimientos realizados por las personas, además brinda estabilidad al cuerpo humano en las diferentes posturas o posiciones que este toma durante sus movimientos soportando las cargas axiales que ejercen las extremidades.

El torso se compone de dos partes principales: columna vertebral y tórax:

- Tórax: es la parte superior del tronco, se sitúa entre el cuello y el abdomen. Está compuesto de huesos y músculos. Su función es proteger a los órganos vitales como el corazón, los órganos respiratorios y parte del aparato digestivo. (Eriksen, 2005)
- Columna vertebral: es la estructura en forma de pilar que forma la base del tronco, consiste en un sistema dinámico compuesto por vértebras (elementos rígidos) y discos intervertebrales (elementos elásticos), su compleción es una estructura lineal conformada por 33 o 34 vértebras, alternadas con discos unidos por ligamentos. (Palastanga, 2000)

La columna vertebral cumple con tres funciones fundamentales:

1. Dar rigidez para soportar cargas axiales
2. Proteger las estructuras del sistema nervioso central.
3. Otorgar una adecuada movilidad y flexibilidad para los principales movimientos del tronco. (Palastanga, 2000)

La movilidad de la columna depende de tres elementos:

- El encaje a nivel de las apófisis articulares.
- La solidaridad intervertebral dada por las articulaciones.
- La musculatura vertebral.

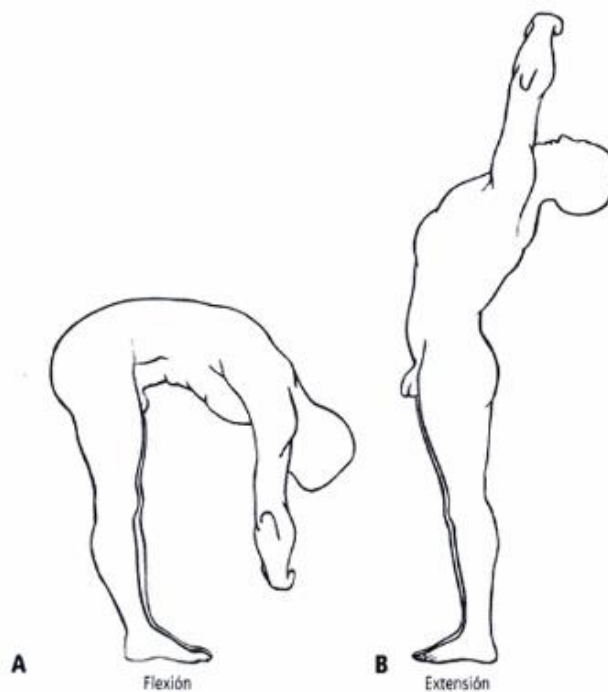
La columna vertebral puede realizar cinco movimientos: flexión, extensión, inclinación lateral, rotación y circunducción

1. **Movimiento de flexión y extensión.** En la flexión las vértebras vecinas se separan de las apófisis espinosas, se aplasta el disco intervertebral en su parte inferior y ocurre deslizamiento entre las apófisis articulares entre sí. La flexión se realiza utilizando los músculos abdominales rectos, oblicuos y transversos. Además, el centro del movimiento se ubica en las apófisis articulares inferiores. (Latarjet, 2004)

Mientras que en el movimiento de extensión los desplazamientos son en el sentido contrario a los de flexión, y los músculos utilizados son los erectores de la columna es su totalidad. (Latarjet, 2004)

Cabe destacar que se quiere mayor fuerza para levantar un peso enderezando el tronco, lo que implica un movimiento de extensión en la columna. (Latarjet, 2004)

Figura 85. Movimientos de flexión y extensión del tronco



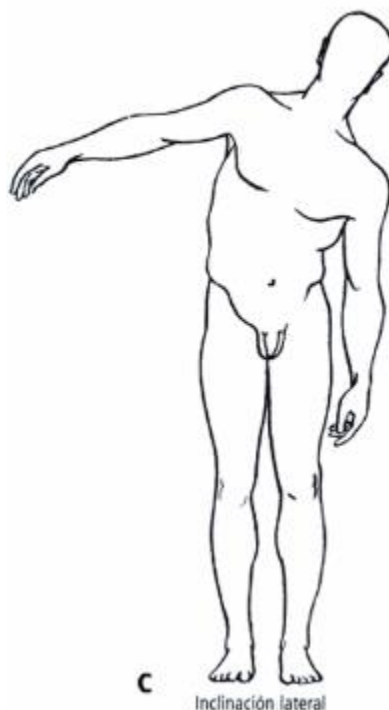
(Latarjet, 2004)

2. **Movimiento de inclinación lateral.** Este movimiento se realizado sobre el eje anteroposterior que pasa por el conducto vertebral, este eje es horizontal a nivel de la columna lumbar y se inclina aproximadamente 45° en la columna cervical. (Latarjet, 2004)

Durante este movimiento el disco se aplasta en su parte lateral, se separa del lado opuesto y se produce un desplazamiento entre las superficies articulares superiores. La limitante de este movimiento es el contacto entre la apófisis articular inferior y la raíz de la apófisis transversa de la vértebra lo cual restringe la inclinación lateral.

Para realizar este movimiento se utilizan los músculos intertransversos, el músculo espinoso torácico y el músculo erector de la columna. (Latarjet, 2004)

Figura 86. Movimiento de inclinación lateral

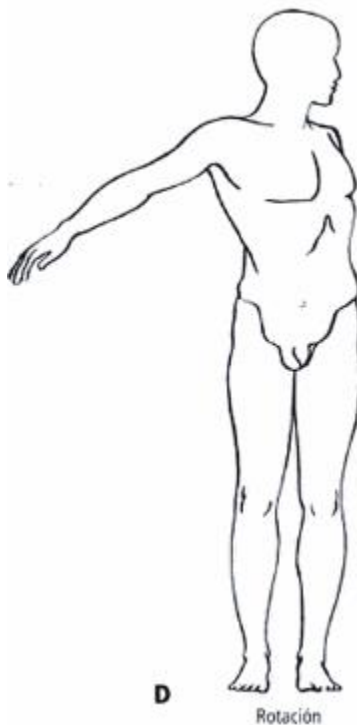


(Latarjet, 2004)

3. **Movimiento de rotación.** El movimiento de rotación es producido por la torsión de las vértebras alrededor de un eje vertical. El desplazamiento producido entre vértebras es muy pequeño, durante este movimiento se utiliza rigurosamente el disco intervertebral, pero este es limitado por la escasa elasticidad que restringe la rotación del tronco.

Los músculos utilizados para realizar este movimiento son el unilateral del transverso-espinoso que lleva el tronco hacia el lado opuesto, los músculos longísimo torácico e ilocostal que orientan al tronco hacia el lado que se contraen. (Latarjet, 2004)

Figura 87. Movimiento de rotación



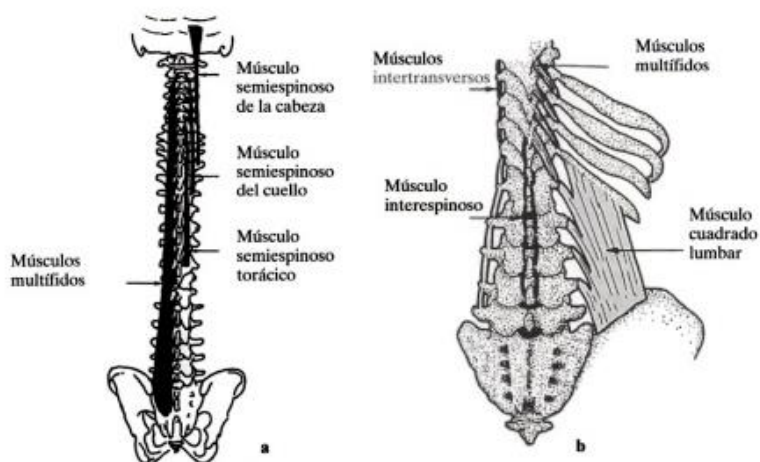
(Latarjet, 2004)

4. **Movimiento de circunducción.** Es el movimiento que resulta de la combinación de los movimientos.

Un factor muy importante para delimitar la movilidad es la raza, se ha comprobado una diferencia de más del doble entre europeos y bantúes ya que para un grupo de la misma edad las personas europeas alcanzaron 42° de flexión a la extensión, mientras que los otros alcanzaron 87° en el mismo tiempo. (Latarjet, 2004)

El movimiento que es más exigido es la extensión, existen cálculos que establecen para levantar una masa de 10 kg, se transmite a la unión lumbosacar una fuerza de 1000 kg, este esfuerzo se puede realizar gracias a la contracción simultánea de los músculos abdominales y torácicos. (Latarjet, 2004)

Figura 88. Músculos utilizados para los movimientos de columna



(Palastanga, 2000)

N. ANÁLISIS DE ESFUERZOS POR ELEMENTOS FINITOS

Los componentes mecánicos simples como vigas, barras simples, y otros de estructura sencilla se pueden analizar con mucha facilidad utilizando métodos básicos que proporcionan soluciones aproximadas; sin embargo, los componentes reales muy rara vez son tan simples, por lo que es necesario realizar aproximaciones menos eficaces mediante soluciones cercanas o métodos numéricos. En el diseño mecánico, donde el software de diseño asistido por computadora (CAD) es muy utilizado el método de análisis de elemento finito (FEA, por sus siglas en inglés) se acopla perfectamente. (Budynas, 2008)

El método FEA puede usarse para análisis estática y dinámico, lineal y no lineal, de esfuerzo y deflexión; vibraciones, transferencia de calor, pandeo, dinámica de fluidos, análisis de tuberías y casi cualquier aplicación de física. (Budynas, 2008)

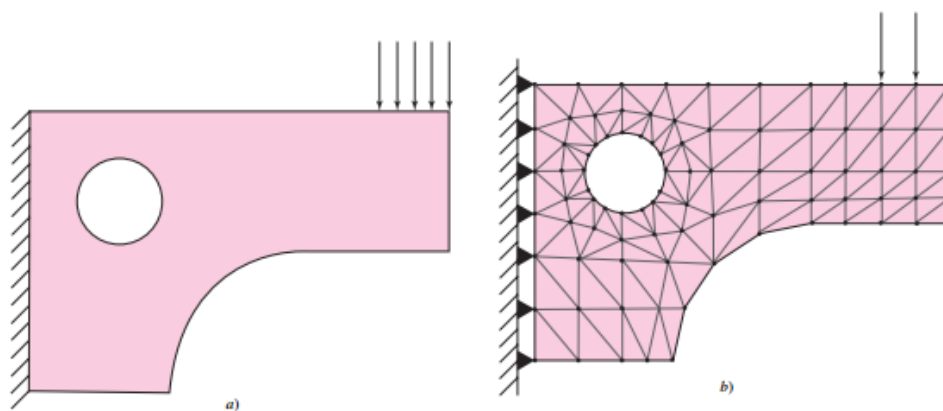
Un componente mecánico real es una estructura elástica continua, el FEA discretiza la estructura subdividiéndola en pequeñas subestructuras de tipo elástico definidas y finitas, se utilizan funciones polinomiales, en conjunto con operaciones matriciales, el comportamiento elástico continuo de cada elemento se desarrolla en términos del material y propiedades geométricas del elemento, las cargas se pueden aplicar a la superficie del elemento o en los nodos que interconectan con otros elementos. (Budynas, 2008)

Los nodos constituyen una parte fundamental ya que en ellos se establecen las condiciones fronteras y se aplican las fuerzas de contacto o cuerpo, estos poseen grados libertad (DOF por sus siglas en inglés), los DOF son los movimientos independientes de rotación y traslación que pueden realizarse se pueden realizar localmente, una vez definido cada nodo localmente se ensamblan los elementos de forma global relacionando los nodos que se interconectan entre sí formando la matriz global del sistema. (Budynas, 2008)

Sin embargo, dado que el método del elemento finito es una técnica numérica que pasa del dominio continuo al dominio discreto los errores no se pueden evitar. Los errores pueden ser:

- Errores computacionales: que se deben a errores de redondeo provenientes de la unidad de punto flotante del procesador y las implementaciones de métodos de integración numérica utilizados. (Budynas, 2008)
- Errores de conversión discreta: estos se deben a la geometría y distribución del desplazamiento de una estructura real varía continuamente, al igualar la geometría continua con la discreta se introducen errores debidos a las aproximaciones matemáticas realizadas en los elementos. (Budynas, 2008)

Figura 89. Discretización de elemento mecánico. a) Elemento continuo b) Elemento discretizado



(Budynas, 2008)

Para el análisis de elementos finitos es importante lograr una discretización buena del elemento continuo, la red de elementos y nodos que discretizan una región se denomina malla, para que un elemento proporcione un análisis certero es necesario obtener la densidad de mallas correcta en el elemento analizado, existen diferentes métodos para la generación de mallas de elementos continuos: manual, semiautomática o completamente automatizada. (Budynas, 2008)

En la actualidad la mayor parte de los distribuidores de software se han concentrado en desarrollar algoritmos que generen las mallas de un elemento de forma automática, y en algunos casos creando algoritmos autoadaptables que se modifican según la geometría y condiciones del elemento. (Budynas, 2008)

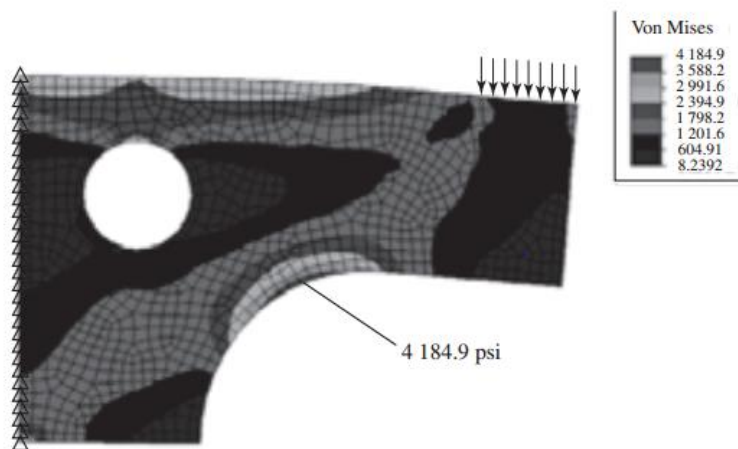
Para realizar la discretización de una región se tienen diversos esquemas que dependen del tipo de elementos analizados, para elementos elásticos planos los límites se definen mediante una serie de líneas geométricas internas y externas; para estructuras de paredes delgadas la geometría se define por medio de representaciones de superficies tridimensionales; y para estructuras sólidas las mallas se construyen

empleando técnicas de geometría sólida constructiva (CSG) o representación de frontera, estos producen enmallado en forma de tetraedros. (Budynas, 2008)

Después de obtener la malla que discretiza al elemento es necesario aplicar las cargas de la estructura de forma correcta, existen dos formas para especificarlas: nodal y por carga de elementos, aunque la carga de elementos se aplica a los nodos empleando cargas nodales equivalentes. La fuerza neta o momento puede aplicarse a un solo nodo, siempre que el elemento soporte los grados de libertad asociados con la fuerza o momento. (Budynas, 2008)

Las cargas de elementos incluyen cargas estáticas debidas a la gravedad, efectos térmicos, cargas superficiales y cargas dinámicas provocadas por la aceleración constante y rotación en estado estacionario. (Budynas, 2008)

Figura 90. Análisis de esfuerzo utilizando generación de mallas automática



(Budynas, 2008)

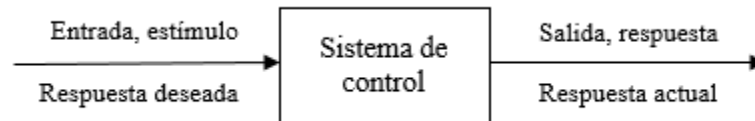
O. SISTEMAS DE CONTROL

La teoría de control juega un papel fundamental en la ingeniería y el avance de la ciencia ya que el control automático se ha convertido en una parte importante e integral en los sistemas de vehículos espaciales, en sistemas robóticos, en los procesos modernos de fabricación y en cualquier operación industrial que requiera control de una variable física como humedad, temperatura, presión, flujo, entre otras. (Ogata, 2010)

Un sistema de control consiste en subsistemas y procesos (plantas) ensambladas para alcanzar un objetivo deseado en la salida con un rendimiento deseado, en respuesta a una entrada específica. (Nise, 2011)

Las principales medidas de rendimiento de un sistema de control son: la respuesta transitoria y el error en estado estable. (Nise, 2011)

Figura 91. Esquema simplificado de un sistema de control



Los sistemas de control nos permiten mover equipos y sistemas con una precisión que de otra forma no podría ser alcanzada, por lo tanto, las principales razones por la que estos son utilizados son:

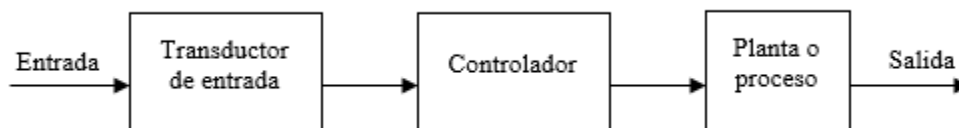
1. Amplificación de potencia.
2. Control remoto o control a distancia del sistema.
3. Formas convenientes para las entradas.
4. Compensación antes perturbaciones del sistema. (Nise, 2011)

Existen dos diferentes configuraciones para sistemas de control: a lazo abierto (open loop) y lazo cerrado (closed loop). (Nise, 2011)

1. **Sistemas a lazo abierto.** Es la configuración genérica de los sistemas, está conformada por un subsistema transductor de entrada, que convierte la entrada del sistema a una señal procesable por un controlador; y el controlador que maneja el proceso o planta del sistema. Regularmente la entrada es llamada referencia y la salida es denominada variable de control. (Nise, 2011)

La principal característica de los sistemas de lazo abierto es que no pueden compensar perturbaciones que afecten al sistema, es decir, no puede corregirse ante perturbaciones en la señal de control (ruido) o perturbaciones en la salida. Por lo tanto, los sistemas de lazo abierto son gobernados únicamente por la entrada. (Nise, 2011)

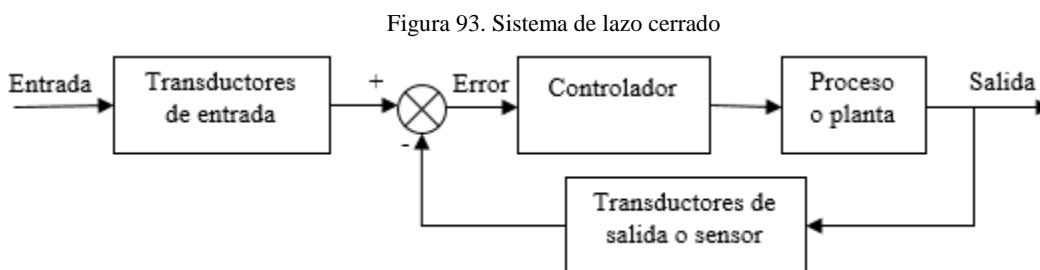
Figura 92. Sistema de control de lazo abierto



2. **Sistemas de lazo cerrado.** Las desventajas presentadas por los sistemas de lazo abierto, la sensibilidad ante perturbaciones y el problema de corregir perturbaciones, son resueltas por la configuración de lazo cerrado. Esta configuración es conformada por un transductor de entrada que convierte la entrada a

una señal interpretable por el controlador, también posee un transductor de salida o sensor que mide la respuesta de la salida y la convierte en una señal interpretable por el controlador. (Nise, 2011)

En los sistemas de lazo cerrado se alimenta al controlador con la señal de error de actuación, que se obtiene de la diferencia entre la entrada y la señal de retroalimentación (señal de salida o función de la señal de salida), a partir de esta señal de error el controlador reajusta la planta con el fin de reducir el error y llevar a la planta al valor deseado. Por lo tanto, los sistemas de control de lazo cerrado compensan las perturbaciones con la respuesta de salida, retroalimentando y comparándolo con la señal de entrada, actuando sobre la planta si el valor de salida no es el deseado. (Nise, 2011) (Ogata, 2010)



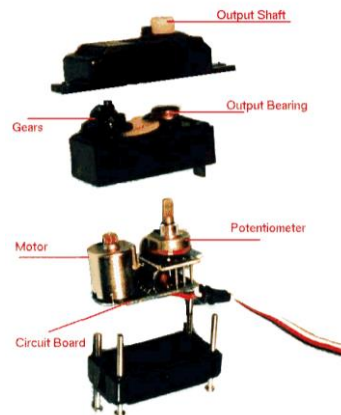
P. PRINCIPIOS BÁSICOS DE UN SERVO MOTOR

Un servo motor es básicamente un motor DC (en algunos casos especiales un motor AC) junto con otros componentes de propósito especial. Dentro de un servo se encuentra un pequeño motor DC, un potenciómetro, un arreglo de engranajes y circuitería electrónica. La circuitería en conjunto con el potenciómetro hacen posible que el servo rote acorde a lo que se desea. Normalmente, un motor DC rota a una velocidad alta, pero el torque generado no es suficiente para mover siquiera una pequeña carga. Es aquí donde el sistema de engranajes dentro de servo entra en acción, el mecanismo de engranes toma en su entrada la rotación a alta velocidad del motor, y genera en su salida una rotación más lenta que la original, pero más práctica y extensamente aplicable (Electrical4u, 2011).

En la posición inicial del eje del servo motor, la perilla del potenciómetro se encuentra en su límite inferior, de tal manera que la señal que genera es igual a cero. La salida de este potenciómetro se encuentra conectada a una de las terminales de entrada de un detector amplificador de error. Al aplicarse una señal eléctrica a la entrada del detector amplificador de error se crea una diferencia entre las dos señales, la señal proveniente del potenciómetro y la otra proveniente de una fuente externa. Esta diferencia es amplificada por el detector de error y actúa como el voltaje de alimentación del motor DC, por lo que el motor inicia a rotar en la dirección deseada. Mientras el eje del motor rota, la perilla del potenciómetro lo hace también, pues este se encuentra acoplada con el eje del motor con ayuda del arreglo de engranajes. Mientras la posición de la perilla del potenciómetro cambia, crece la señal en la salida del potenciómetro y cuando el eje del motor

llega a la posición deseada, el potenciómetro genera en su salida, una señal de igual magnitud a la de la señal externa. Al cumplirse esta condición, no existirá señal de salida desde el amplificador hacia el motor, y debido a que la señal de entrada del motor es cero en la posición deseada, el motor para de rotar (Electrical4u, 2011).

Figura 94. Estructura interna de un servo motor



(Rhode Island School of Design, 2016)

Q. ACTUADORES UTILIZADOS

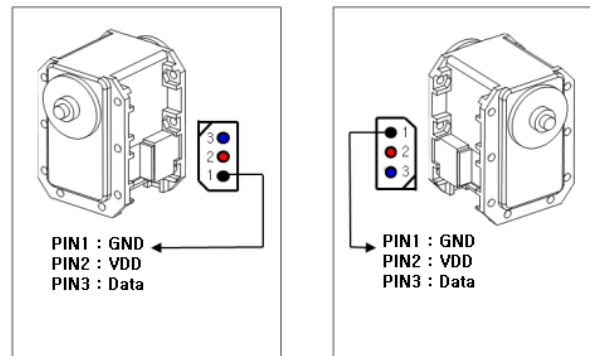
1. Dynamixel MX-106T. Dynamixel es una línea de actuadores de alto rendimiento desarrollados por la marca coreana ROBOTIS. Estos actuadores cuentan con conectividad a red, completa programabilidad y retroalimentación (ROBOTIS, 2013).

Toda la línea de actuadores Dynamixel cuentan con un motor con circuito de potencia, una caja reductora, un controlador y un circuito interno para poder implementar comunicación serial en red. Por lo que es posible conectar varios actuadores en una misma línea de red y alimentación (ROBOTIS, 2013).

Dynamixel ofrece una variada línea de motores servos de distintos tamaños y diferentes características dinámicas. Entre los actuadores con mayor torque de esta marca se encuentra el MX-106T.

La serie MX de Dynamixel cuenta con dos conectores de 3 pines en cada actuador, la asignación de pines para estos conectores se puede observar en la Figura 95.

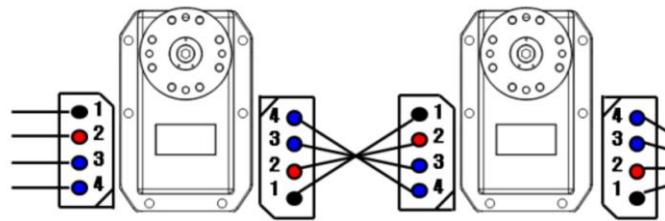
Figura 95. Asignación de pines para conectores de la serie MX de Dynamixel



(ROBOTIS, 2013)

Como ya se dijo, es posible controlar y alimentar un grupo de actuadores haciendo uso de una sola línea de comunicación y alimentación. En la Figura 96, se puede observar la manera en que estos actuadores se conectan en serie.

Figura 96. Conexión en serie de actuadores de la serie MX de Dynamixel



(ROBOTIS, 2013)

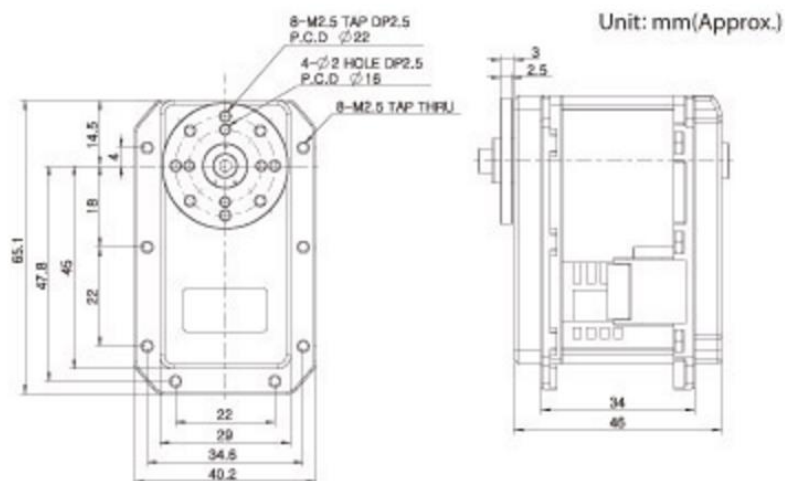
a. Características físicas y dinámicas. Utilizando la hoja de datos del fabricante se obtuvieron las características físicas y dinámicas de estos motores. En el Cuadro 4 se pueden observar las dimensiones, rangos de temperaturas y voltajes a los que estos motores funcionan, así como otras características físicas. En la Figura 97 se puede observar un diagrama de las dimensiones de los motores Dynamixel.

Cuadro 4. Características físicas de los Dynamixel MX-106T

Peso	153 g
Voltaje de alimentación	10 V a 14.8V (Voltaje recomendado: 12V)
Temperatura de funcionamiento	-5°C a 80°C
Corriente en espera	100 mA
Material	Engranaje metálico, cuerpo plástico
Dimensiones	40.2 mm x 65.1 mm x 46 mm

(ROBOTIS, 2013)

Figura 97. Diagrama con dimensiones de los Dynamixel MX-106T



(ROBOTIS, 2013)

En el siguiente cuadro se pueden observar las características dinámicas de estos motores.

Cuadro 5. Características dinámicas de los Dynamixel MX-106T

Rango de grados	0° a 360° y modo continuo
Torque de arranque	8 N·m a 11.1 V, 4.8 A
	8.4 N·m a 12 V, 5.2 A
	10 N·m a 14.8 V, 6.3 A
Velocidad máxima sin carga	41 rpm a 11.1 V
	45 rpm a 12 V
	55 rpm a 14.8 V

(ROBOTIS, 2013)

2. **MG996R.** El motor MG996R es un servo desarrollado y construido por la marca taiwanesa Towerpro, la cual se especializa en motores para carros, helicópteros y botes a escala. Esta versión de la serie MG ofrece un PCB rediseñado y un control por medio de circuitos integrados que permiten al motor ser más preciso que sus antecesores (TOWERPRO, 2014).

a. **Características físicas y dinámicas.** Las características físicas y dinámicas de estos motores pueden observarse en el Cuadro 6 y 7 respectivamente. En la Figura 98 se encuentra un diagrama con las dimensiones de los MG996R.

Cuadro 6. Características físicas de los Towerpro MG996R

Peso	55 g
Voltaje de alimentación	4.8 V a 7.2 V
Temperatura de funcionamiento	0°C a 55°C
Corriente máxima	2.5 A
Material	Engranaje metálico, cuerpo plástico
Dimensiones	40.7 mm x 19.7 mm x 42.9 mm

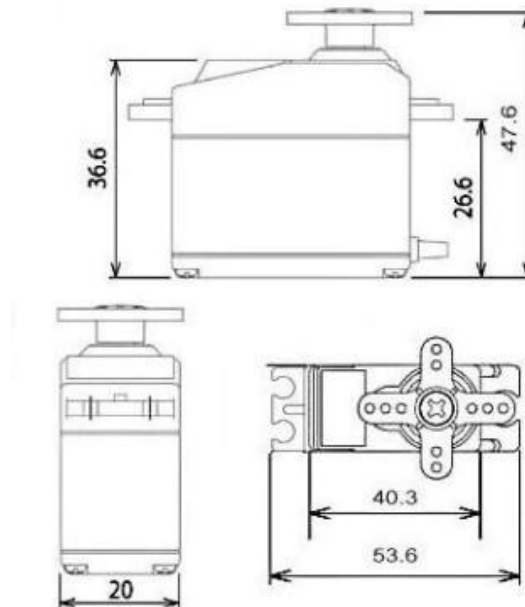
(TOWERPRO, 2014)

Cuadro 7. Características dinámicas de los Towerpro MG996R

Rango de grados	0° a 120°
Torque de arranque	9.4 kgf·cm a 4.8 V
	11 kgf·cm a 6 V
Velocidad máxima sin carga	0.17 s/60° a 4.8 V
	0.14 s/60° a 6 V

(TOWERPRO, 2014)

Figura 98. Diagrama con dimensiones de los Towerpro MG996R



(TOWERPRO, 2014)

R. COMUNICACIÓN SERIAL

La comunicación serial es el protocolo de bajo nivel más común para comunicar dos o más dispositivos. Normalmente, uno de los dispositivos es una computadora, mientras que el otro es un modem, impresora, otra computadora, o un instrumento científico como un osciloscopio o un generador de funciones.

Como su nombre sugiere, el puerto serial envía y recibe bytes de información en forma serial, un bit en cada momento. Estos bytes son transmitidos usando formato binario o un formato de texto (Axelson, 1998).

1. **Estándar de la interfaz del puerto serial.** La interfaz del puerto serial para conectar dos dispositivos está especificada por el estándar TIA/EIA-232C publicado por la Asociación de Telecomunicaciones Industriales.

El estándar original de la interfaz de puerto serial fue dada por el RS-232, *Recommended Standar number 232*, por sus siglas en ingles. El término RS-232 todavía es usado popularmente, y es muchas veces usado cuando se refiere a una comunicación serial que sigue el estándar TIA/EIA-232.

RS-232 define estas características del puerto serial:

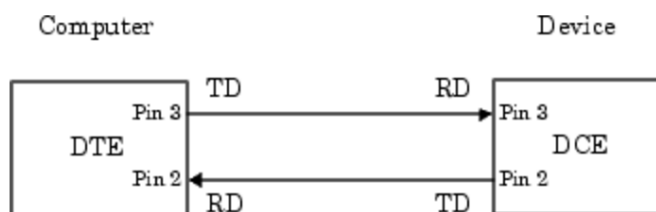
- La tasa máxima de transferencia de bits y el largo de cables.
- Los nombres, características eléctricas y funciones de las señales.
- Las conexiones mecánicas y la asignación de pines.

La comunicación es lograda usando tres pines: El pin de transmisión, el pin de recepción y el pin de tierra. Existen otros pines disponibles para el control del flujo de datos, pero no son estrictamente requeridos. Otros estándares como el RS-485 definen funcionalidades adicionales como tasas más altas de trasferencia de bits, cables más largos y conexiones de hasta 256 dispositivos (MathWorks, 2016).

2. **Conexión serial entre dos dispositivos.** El estándar RS-232 define a los dos dispositivos conectados con un cable serial como el *Data Terminal Equipment* (DTE) y el *Data Circuit-Terminating Equipment* (DCE). Esta terminología refleja el origen del RS-232, el cual inició como un estándar para la comunicación entre una computadora y un modem.

En la mayoría de los casos una computadora es considerada el DTE, mientras que los dispositivos periféricos como un modem o impresora son considerados DCE. Muchos de los instrumentos científicos funcionan como DTE (Axelson, 1998).

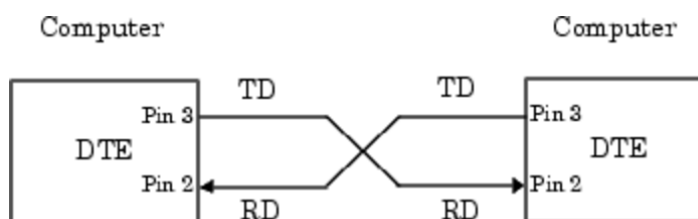
Figura 99. Conexión con cable recto entre un DTE y un DCE



(Mathworks, 2016)

Si se conectan dos DTE o dos DCE usando un cable serial recto, los pines TD y RD de cada dispositivo estarán conectados entre sí. Por lo que, para conectar dos dispositivos del mismo tipo, se debe de utilizar un cable cruzado. Como se puede observar en la siguiente figura, se utiliza un cable cruzado para conectar los pines TD con los RD (Axelson, 1998).

Figura 100. Conexión con cable cruzado de dos DTE



(Mathworks, 2016)

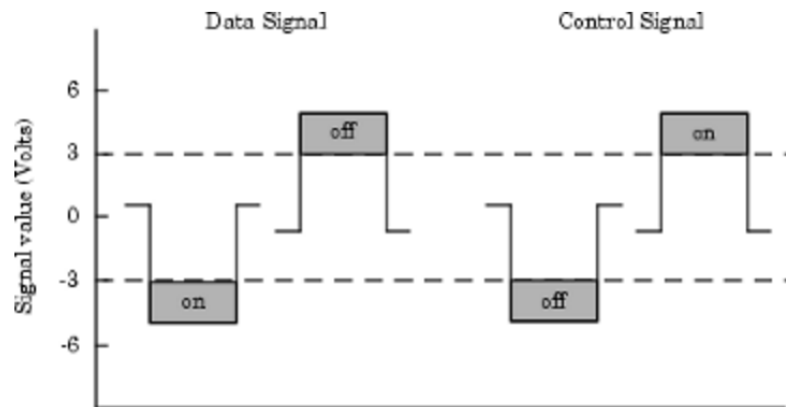
3. Estados de señal. Las señales pueden estar ya sea en estado activo o en estado inactivo. Un estado activo corresponde al valor binario 1, mientras que un estado inactivo corresponde al valor binario 0. Una señal en estado activo normalmente se describe como estado lógico 1, encendido, verdadero, o una marca. Una señal en estado inactivo normalmente se describe como un estado lógico 0, apagado, falso o un espacio (IOTech, 1991).

Para señales de datos, el estado encendido ocurre cuando la señal de voltaje recibida es menor que $-3V$, mientras que el estado apagado ocurre para voltajes mayores a $3V$. Para señales de control, el estado encendido ocurre cuando la señal de voltaje recibida es mayor a $3V$, mientras que el estado apagado ocurre para voltajes menores a $-3V$. Los voltajes entre $-3V$ y $3V$ son considerados la región de transición, y es aquí donde el estado de la señal es indefinido (IOTech, 1991).

Para colocar la señal en estado encendido, el dispositivo de control disminuye el valor de voltaje en los pines de datos y aumenta el voltaje en pines de control. Por el contrario, para colocar la señal en estado apagado, el controlador aumenta el valor de voltaje en pines de datos y disminuye el voltaje en pines de control (IOTech, 1991).

La siguiente figura muestra los estados encendidos y apagados para una señal de datos y una de control.

Figura 101. Estados de una señal de datos y una señal de control



(Mathworks, 2016)

La mayoría de dispositivos que utilizan puerto serial soportan comunicación *full-duplex*, esto significa que pueden enviar y recibir datos al mismo tiempo. Por lo tanto, pines individuales son utilizados para transmitir y recibir datos. Los pines TD, RD y tierra son usados para estos dispositivos. Sin embargo, algunos tipos de dispositivos soportan solamente comunicación *half-duplex* o en una sola dirección. Para estos dispositivos se utilizan sólo los pines TD y tierra (IOTech, 1991).

El pin TD lleva la información transmitida desde el DTE hacia el DCE. El pin RD lleva la información que es recibida por el DTE desde el DCE.

4. Formato de datos seriales. El formato de los datos seriales incluye un bit de inicio, entre cinco a ocho bits de datos y un dato de parada. Un bit de paridad y un bit de parada adicional pueden ser incluidos en el formato también. (IOTech, 1991)

Figura 102. Fomato de datos seriales



(Mathworks, 2016)

5. Comunicación síncrona y asíncrona. El estándar RS-232 soporta dos tipos de protocolos de comunicación: síncrona y asíncrona. Usando el protocolo síncrono, todos los bits transmitidos son

sincronizados con una señal de reloj. Los dos dispositivos se sincronizan al inicio uno con el otro, y continuamente envían caracteres para mantenerse sincronizados. Incluso cuando no se está enviando ninguna información, un flujo constante de bits permite a cada dispositivo saber dónde se encuentra el otro en cualquier instante de tiempo. Por lo que todo bit enviado es información o algún bit de control. La comunicación síncrona permite velocidades más altas de transferencia de información que los métodos asíncronos, porque los bits adicionales usados para marcar el principio y final de cada byte de información no son requeridos. Usando el protocolo asíncrono, cada dispositivo utiliza su propio reloj interno, lo que resulta en bytes enviados en tiempos arbitrarios. Por lo que, en lugar de usar el tiempo para la sincronización de bits, se utiliza el formato de datos. En particular, la transmisión de datos es sincronizada utilizando el bit de inicio de una palabra, mientras uno o dos otros bits indican el final de la palabra. Los requerimientos necesarios para enviar estos bits adicionales causan que la comunicación asíncrona sea más lenta que la comunicación síncrona. Pero cuenta con la ventaja de no dar más carga al procesador pues no es necesario manejar bits de control. La mayoría de puertos seriales operan con comunicación asíncrona (IOTech, 1991).

6. **Transmisión de bits de información.** Por definición, los datos seriales son transmitidos uno por uno. El orden en el que los bits son transmitidos es:

- a. El bit de inicio es transmitido con un valor 0.
- b. Los bits de datos son transmitidos. El primer bit de datos corresponde al bit menos significativo, mientras que el último bit de datos corresponde al bit más significativo.
- c. El bit de paridad (si es definido) es transmitido.
- d. Uno o dos bits de parada son transmitidos, ambos con un valor de 1.

El *baud rate* es el número de bits transmitidos por segundo. Los bits transmitidos incluyen al bit de inicio, los bits de datos, el bit de paridad (si definido), y los bits de parada (IOTech, 1991).

Como se especificó anteriormente, la mayoría de puertos seriales operan asíncronamente. Esto significa que el byte transmitido debe de ser identificado con bit de inicio y parada. El bit de inicio indica cuándo el byte de datos va a iniciar; el bit o bits de parada indican cuando el byte ha sido transferido. El proceso de identificar bytes con el formato de datos seriales sigue los siguientes pasos:

- a. Cuando un puerto serial no está transmitiendo datos, este se encuentra encendido.
- b. Cuando los datos empezarán a transmitirse, el puerto serial cambia a apagado debido al bit de inicio.
- c. El puerto serial se enciende de nuevo debido al bit o bits de parada. Esto indica el final del byte.

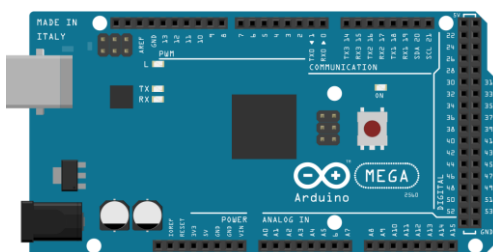
Los bits de datos transmitidos a través de un puerto serial pueden representar comandos de un dispositivo, lecturas de sensores, mensajes de error, etc. Los datos pueden ser transmitido como datos binarios o como datos ASCII. La mayoría de puertos seriales usan entre cinco a ocho bits de datos. Los datos binarios son típicamente transmitidos en ocho bits. Datos basados en texto son transmitidos en siete u ocho bits. Si los

datos están basados en el formato ASCII, un mínimo de siete bits son requeridos debido a que hay 2^7 o 128 distintos caracteres disponibles. Si se utiliza un octavo bit, este debe de tener un valor de 0. Si los datos están basados en el formato ASCII extendido, ocho bits son necesarios debido a que hay 2^8 o 256 distintos caracteres disponibles (IOTech, 1991).

S. ARDUINO MEGA 2560

Arduino Mega 2560 es un microcontrolador basado en el ATmega2560. Cuenta con 54 pines de entrada y salida (de los cuales 15 pueden ser usados como PWM), 16 entradas analógicas, 4 puertos seriales UART, un oscilador de cristal de 16 MHz, conexión USB, entrada de alimentación externa, *header* ICSP y botón de reinicio. El ATmega2560 es desarrollado por la marca Atmel y es un microcontrolador de 8 bits con 16, 32 o 64 KB de memoria flash programable. (ARDUINO, 2016).

Figura 103. Arduino Mega



(ARDUINO, 2016)

Cuadro 8. Especificaciones técnicas del microcontrolador Arduino Mega

Microcontrolador	ATmega2560
Voltaje de operación	5V
Voltaje de entrada (recomendado)	7-12V
Voltaje de entrada (limite)	6-20V
Puertos de entrada y salida digitales	54
Puertos analógicos	16
Corriente DC en cada pin I/O	20 mA
Memoria flash	256 KB
SRAM	8 KB
EEPROM	4 KB
Velocidad de reloj	16 MHz
Dimensiones	101.52 mm x 53.3 mm

(ARDUINO, 2016)

1. **Dynamixel for Arduino.** *Dynamixel for Arduino* es una librería desarrollada por Austin Palmer y actualizada por Josué Alejandro Savage. Hace posible controlar y configurar motores Dynamixel por medio de un microcontrolador Arduino. Esta librería permite comunicarse con los motores Dynamixel

de distintas formas en diferentes pines del Arduino. La comunicación se realiza a través del puerto serial UART.

La librería cuenta con distintos tipos de instrucciones, instrucciones para configurar, para monitorear e instrucciones para realizar acciones. En los siguientes cuadros se encuentra una lista de estas instrucciones y su respectiva descripción.

Cuadro 9. Instrucciones para realizar acciones

Instrucción	Descripción
Begin(baudRate, DATACONTROL)	Inicializa la comunicación serial.
Ping(ID)	Envía una solicitud de status al servo.
Reset(ID)	Regreso al servo a su configuración de fábrica.
setID(ID, newID)	Cambia el número de ID de un servo.
setBD(ID, baudRate)	Cambia el baudrate de un servo.
Move(ID, Position)	Mueve el actuador a la posición indicada.
Movespeed(ID, Position, Speed)	Mueve el actuador a la posición y velocidad indicada.
moveRW(ID, Position)	Guarda la instrucción que mueve el actuador a la posición indicada.
movespeedRW(ID, Position, Speed)	Guarda la instrucción que mueve el actuador a la posición y velocidad indicada.
Action()	Ejecuta la instrucción almacenada en el servo.
setEndless(ID, Status)	Habilita o deshabilita el modo de movimiento continuo.
Turn(ID, Side, Speed)	El servo se mueve hacia la izquierda o derecha, a la velocidad indicada sólo si se encuentra configurado en modo continuo.

(Savage Electronics, 2013)

Cuadro 10. Instrucciones para realizar configuraciones

Instrucción	Descripción
LEDStatus(ID, Status)	Enciende el LED del servo.
setTempLimit(ID, Temperature)	Configura una temperatura máxima a la que el servo funcionará.
setAngleLimit(ID, CW, CCW)	Configura un ángulo máximo de operación en dirección y en contra de las agujas del reloj.
setVoltageLimit(ID, minVoltage, maxVoltage)	Configura un voltaje mínimo y máximo para el funcionamiento del servo.
setMaxTorque(ID, Maxtorque)	Configura un torque máximo en el actuador.
setSRL(ID, SRL)	Configura el <i>Status Return Level</i> del servo.
setRDT(ID, RDT)	Configura el <i>Return Delay Time</i> del servo.
setLEDAAlarm(ID, LEDAlarm)	Configura la alarma en el LED del servo.
setShutdownAlarm(ID, shutdownAlarm)	Configura la alarma de apagado del servo.
setPunch(ID, Punch)	Configura la corriente máxima del servo.

(Savage Electronics, 2013)

Cuadro 11. Instrucciones para monitoreo

Instrucción	Descripción
Moving(ID)	Revisa si el servo está en movimiento.
RWStatus(ID)	Lee el registro REG_WRITE del servo.
lockRegister(ID)	Bloquea 24 a 35 archivos del servo.
readTemperature(ID)	Lee la temperatura interna del servo.
readVoltage(ID)	Lee el voltaje de entrada del servo.
readPosition(ID)	Lee la posición en la que el actuador se encuentra.
readSpeed(ID)	Lee el RPM del servo.
readLoad(ID)	Lee la corriente usada por el servo.

(Savage Electronics, 2013)

2. **Interfaz serial de Arduino.** La comunicación serial en los pines TX/RX utiliza niveles lógicos TTL (5V). Serial es utilizado para comunicación entre el Arduino y una computadora u otro dispositivo. Todos los microcontroladores Arduino cuentan con al menos un puerto serial (conocido también como UART o USART). Este se comunica por medio de los pines digitales 0 (RX) y 1 (TX) así como vía USB hacia la computadora (ARDUINO, 2016).

El Arduino Mega tiene tres puertos seriales adicionales. Serial1 en los pines 19 (RX) y 18 (TX), Serial2 en los pines 17 (RX) y 16 (TX), Serial3 en los pines 15 (RX) y 14 (TX). Si se desea utilizar estos pines para comunicarse con una computadora, se necesita de un adaptador USB-Serial adicional, ya que estos no están conectados al adaptador USB-Serial integrado en el Arduino Mega. Para utilizarlos para comunicarse con un dispositivo TTL serial externo, se debe de conectar el pin TX al pin RX del dispositivo, el RX al pin TX del dispositivo, y la tierra del Arduino Mega a la tierra del dispositivo externo (ARDUINO, 2016)

T. MATLAB

MATLAB es un lenguaje de alto nivel y un ambiente interactivo para realizar computación numérica, visualización y programación. Es posible analizar datos, desarrollar algoritmos y crear modelos y aplicaciones usando MATLAB. El lenguaje, las herramientas y las funciones matemáticas integradas permiten tener distintos enfoques y llegar a una solución de forma más rápida que utilizando hojas de cálculo o lenguajes de programación tradicional, como C/C++ o Java.

MATLAB puede ser utilizado para un vasto rango de aplicaciones, incluyendo procesamiento de señales y comunicación, procesamiento de imagen y video, sistemas de control, realizar mediciones y pruebas, finanza computacional y biología computacional (MATLAB, 2014).

Las especificaciones clave de MATLAB son:

- Lenguaje de alto nivel para computación numérica, visualización y desarrollo de aplicaciones.
- Ambiente interactivo para realizar una exploración iterativa, diseño y resolución de problemas.
- Funciones matemáticas para algebra lineal, estadística, análisis de Fourier, filtrado, optimización, integración numérica, y resolver ecuaciones diferenciales ordinarias.
- Gráficos integrados para la visualización de datos y herramientas para crear gráficas personalizadas.
- Herramientas de desarrollo para mejorar la calidad del código, su mantenimiento y maximizar el rendimiento.
- Herramientas para construir aplicaciones con interfaces gráficas personalizadas.
- Funciones para integrar los algoritmos basados en MATLAB con aplicaciones externas y lenguajes como C, Java, .NET y Microsoft Excel.

U. REGULADORES DE VOLTAJE

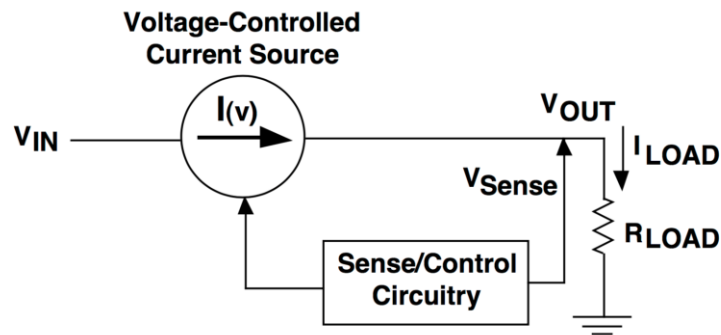
El regulador lineal es la pieza básica en la mayoría de las fuentes de alimentación usadas en la electrónica. El regulador lineal es tan fácil de usar que es virtualmente infalible, y su precio normalmente es tan bajo que es usualmente uno de los componentes más baratos usados en un ensamble electrónico. (Simpson, 2011)

Todo circuito electrónico es diseñado para operar a un voltaje específico, que usualmente se asume es constante. Un regulador de voltaje provee este voltaje DC constante y contiene circuitería que continuamente mantiene el voltaje de salida al valor diseñado, independientemente de cambios de corriente en la carga o del voltaje de entrada (asumiendo que la corriente de la carga y el voltaje de entrada se encuentran dentro del rango específico en el que el componente puede operar) (Simpson, 2011).

1. **Regulador lineal básico.** Un regulador lineal funciona usando una fuente de corriente, controlada por voltaje para forzar un voltaje fijo en la terminal de salida del regulador.

El circuito de control debe monitorear el voltaje de salida, y ajustar la fuente de corriente (como lo requiera la carga) para mantener el voltaje de salida en el valor deseado. El límite diseñado de la fuente de corriente define la corriente máxima de la carga que el regulador puede suministrar pudiendo mantener la regulación (Simpson, 2011).

Figura 104. Diagrama de funcionamiento de un regulador lineal



(Simpson, 2011)

El voltaje de salida es controlado usando una retroalimentación, la cual requiere algún tipo de compensación para asegurar la estabilidad. La mayoría de los reguladores lineales cuentan con un compensador interno, y son completamente estables sin necesidad de componentes externos. Sin embargo, algunos reguladores, requieren una capacitancia externa conectada desde la terminal de salida a tierra para asegurar la estabilidad del regulador (Simpson, 2011).

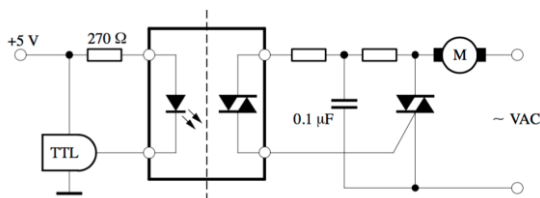
Otra característica de cualquier regulador lineal es que requieren de un tiempo finito para corregir el voltaje de salida después de un cambio en la corriente demandada por la carga. Este atraso en tiempo define la característica llamada respuesta transiente, la cual es una medida de cuán rápido el regulador regresa a un estado estable después de un cambio en la carga (Simpson, 2011).

V. OPTOACOPLOADORES

En un circuito eléctrico, un optoacoplador asegura total aislamiento eléctrico, incluyendo aislamiento de potencia, como sería en el caso de un transformador.

En la práctica esto significa que el circuito de control se encuentra a un lado del optoacoplador, por ejemplo, el lado emisor, mientras que el circuito de carga es localizado en el otro lado, el lado receptor. Ambos circuitos estarían entonces, eléctricamente aislados por el optoacoplador (Temic Semiconductors, 1996).

Figura 105. Aplicación básica de un optoacoplador



(Temic Semiconductors, 1996)

Las señales del circuito de control son transmitidas de manera óptica al circuito de carga, por lo que se encuentran libres de efectos retroactivos. En la mayoría de los casos, esta transmisión óptica es realizada con rayos de luz cuyas longitudes de onda se encuentran entre el rango rojo a infrarrojo, dependiendo de los requerimientos aplicables al optoacoplador (Temic Semiconductors, 1996).

La longitud de onda de la señal a transmitir puede variar desde una señal de voltaje DC hasta una señal con una frecuencia en la banda de los MHz. Un optoacoplador es comparable con un transformador o un relé. Además de tener dimensiones más pequeñas en la mayoría de los casos, las ventajas de los optoacopladores con respecto a los relés son las siguientes: asegura tiempos considerablemente más cortos de conmutación, no tiene contactos mecánicos y no es propenso a interferencia causada por arcos. Gracias a todas estas ventajas, los optoacopladores son sobresalientemente más convenientes para circuitos usados en microelectrónica así como en procesamiento de datos y sistemas de comunicaciones (Temic Semiconductors, 1996).

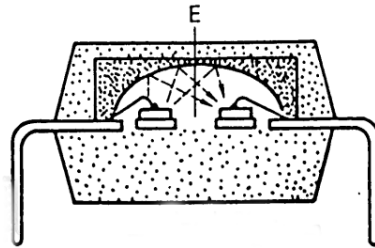
1. **Diseño de optoacopladores.** Un optoacoplador debe de satisfacer con cinco requerimientos esenciales:

- Buen comportamiento aislante.
- Alta tasa de transferencia de corriente.
- Baja degradación
- Baja capacitancia de acople.
- No tener funciones descontroladas por influencias de campo externas.

Estos factores son esencialmente dependientes del diseño, los materiales usados y los chips correspondientes usados para el emisor/receptor (Temic Semiconductors, 1996).

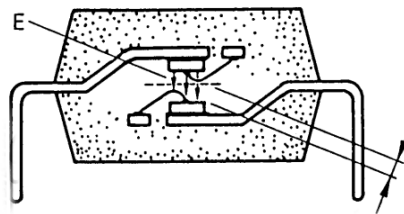
Dos diseños comunes en el que se fabrican los optoacopladores utilizados hoy en día son los optoacopladores con diseño en línea y cara a cara.

Figura 106. Chip con diseño de transmisor y receptor en línea



(Temic Semiconductors, 1996)

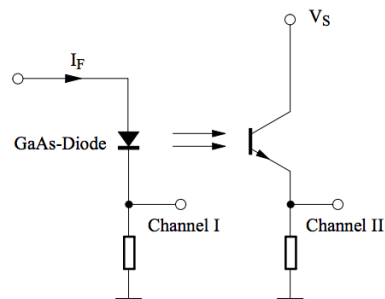
Figura 107. Chip con diseño de transmisor y receptor cara a cara



(Temic Semiconductors, 1996)

2. Características de conmutación. Todo dispositivo electrónico genera un cierto retardo entre su señal de entrada y salida, así como cierta distorsión en la amplitud de salida. El siguiente circuito muestra cómo se pueden medir las señales de entrada y salida para ser analizadas en un osciloscopio.

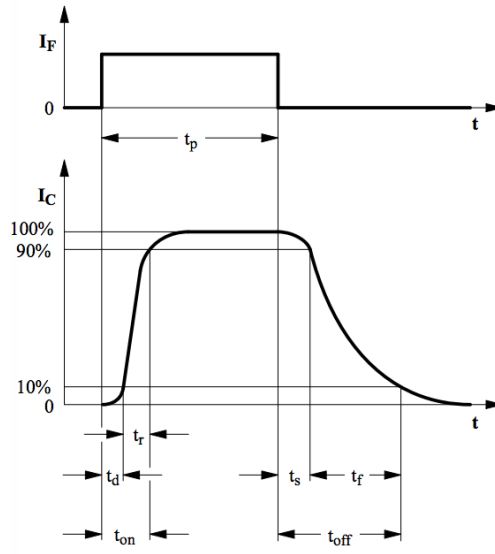
Figura 108. Circuito de un optoacoplador



(Temic Semiconductors, 1996)

El comportamiento usual de las señales de entrada y salida en un optoacoplador se puede observar en la siguiente figura.

Figura 109. Señal de entrada y salida en optoacoplador



(Temic Semiconductors, 1996)

Donde t_p es la duración del pulso, t_d es el tiempo de atraso, t_r es el tiempo de subida, t_{on} el tiempo para encender, t_s el tiempo de almacenamiento, t_f el tiempo de caída y t_{off} el tiempo para apagarse.

W. RESPUESTA HUMANA A SALUDOS SOCIALES

Mientras las capacidades de las computadoras incrementan, el campo de interacción humano robot provee de más posibilidades para integrar robots en la rutina diaria del humano. En muchos campos, incluyendo salud, construcción, manufactura, educación y servicios públicos, la habilidad de los robots para integrarse socialmente dentro del ambiente será clave para su aceptación. Para lograr esta integración social, investigadores en HRI (así como literatura popular y películas) han generalmente sugerido que el diseño del comportamiento de un robot debe de ser modelado según el comportamiento humano. La idea es que, si es hecho bien, los humanos puedan usar sus talentos sociales naturales y expectativas para reconocer el comportamiento robótico y en última instancia interactuar con el robot (Heenan, *et al.*, 2014).

En la actualidad los robots no cuentan con un comportamiento que les permita iniciar una interacción sin problemas con humanos. Esto se debe en parte a las complejas y subconscientes reglas que los humanos creen deben de ser seguidas para poder iniciar una interacción con un sujeto social de manera que esta sea natural y apropiada (Heenan, *et al.*, 2014).

1. **La Ciencia Social de los saludos.** Adam Kendon define los saludos como la unidad de interacción social usualmente observada cuando dos personas están presencia de la otra, esto incluye un distintivo intercambio de gestos o afirmaciones que un individuo le hace a otro directa y explícitamente, para hacerle saber que lo ha visto (Kendon, 1990).

Kendon afirma que los saludos y la forma en la que las personas los hacen, son vitales para manejar la relación entre ambos, en relación a la confirmación de la amistad, el grado de familiaridad, estatus social y sentido de pertenencia. Además, también sirve como el precursor que lleva a la interacción entre ambas personas (Heenan, *et al.* 2014).

Kendon observó y grabó personas mientras se saludaban, analizó los videos para identificar los comportamientos no verbales de las personas. Lo que sigue es una breve descripción de las observaciones de su equipo de trabajo, orientadas hacia la cultura occidental. En esencia, Kendon encontró que un intercambio típico entre dos individuos que desean saludarse sigue una estructura que en su mayoría se conforma por comunicación no verbal, como observar, saludos de lejos, acercamientos, saludos cercanos y finalmente una transición hacia la interacción.

2. **Observación y la decisión de saludar.** Antes de que un saludo pueda iniciar, al menos una persona debe de dirigir su mirada hacia la otra (como un vistazo rápido, por haber escuchado una voz). Esa persona (o ambas) debe de percibir que la otra persona es alguien que el o ella desea saludar. Adicionalmente, esa persona evaluaría qué tan disponible la otra persona se encuentra para recibir un saludo. La decisión de saludar también es influenciada por el deseo de uno por interrumpir, la importancia de la interacción esperada, etc. Basado en estos y otros factores, la persona puede entonces decidir si iniciar el saludo, o esperar, o seguir adelante (Heenan, *et al.* 2014).

3. **Distancia del saludo.** La interacción inicia con un saludo a distancia, luego de que uno o ambos participantes se vieron el uno al otro y al menos uno de ellos identifica un deseo por iniciar una interacción. Si uno de los participantes no se ha dado cuenta de la presencia del otro, este último llamará la atención hacia su persona por medio de la vocalización de un nombre, o una sutil acción, como lo es carraspear. Si este paso no es necesario, existe aún una acción observable pero tácita tomada por ambos participantes, orientan su cuerpo en dirección de cada uno de ellos e intercambian miradas en señal de reconocimiento de que se ambos desean interactuar. Estos saludos típicamente solo toman lugar si el individuo iniciador tiene una especial obligación o el derecho de saludar al otro. Un saludo a distancia puede no ser necesario para continuar a la siguiente fase de la interacción. Por ejemplo, dos personas pueden reconocerse rápidamente el uno al otro con solo caminar cerca, pero no iniciar en una interacción (Heenan, *et al.* 2014).

Kendon describe una serie de otros comportamientos físicos que las personas tienen a realizar para indicar su saludo a distancia.

- Saludos con la mano: Varía muchas veces, pero es común en saludos a distancia. En todos los casos, la mano es levantada y la palma abierta y orientada hacia la persona que está siendo saludada. Qué tanto la mano es levantada, y si es agitada varía acorde a la distancia entre los individuos. También puede ser usado para comunicar emoción.
- El movimiento brusco de cabeza: Ocurre cuando la cabeza es inclinada hacia atrás de manera rápida, y luego traída para adelante. Usualmente es acompañado por una vocalización, como “hola”.
- Bajar la cabeza: También es común, en este caso la cabeza es inclinada hacia abajo, mantenida por un momento en esa posición y luego levantada. Esto es típicamente acompañado por una versión menor del saludo con la mano, en el que el brazo es levantado levemente pero no es sacudido de lado a lado.
- Inclinarse la cabeza: Es similar a bajar la cabeza, pero la cabeza es inmediatamente levantada después de bajarla. Es usualmente observado en saludos de gente pasando, y no es seguido por un acercamiento o un saludo cercano.
- Sonreír: Lo que puede continuar con la siguiente fase a describir.

4. El acercamiento. Asumiendo que el saludo no es un simple saludo a distancia terminal, los dos individuos acercan las distancias entre ellos. Kendon nota que, en sus términos, “qué tan lejos llega uno fuera de su camino” mientras se mueven en dirección e otro tiene una significancia comunicativa dependiendo de factores de ambiente, status y contexto. Durante el acercamiento, un número de comportamientos sutiles pero importantes son observados (Heenan, *et al.* 2014).

- Cambios en la orientación facial: Aunque las personas tienden a verse entre sí mientras se saludan a distancia para señalar que una interacción es deseada, tienden a desviar la mirada durante el acercamiento final. Pueden también fijar su vista hacia otro lado justo ante de la siguiente fase.
- Cuerpo cruzado: Las personas pueden cruzar sus brazos sobre su cuerpo.
- Acicalar: Las personas pueden ajustar su cabello, ropa o sus accesorios como un acto de auto aseo.

5. **Acercamiento final.** Las personas exhiben otro conjunto de comportamientos mientras se mueven cada vez más cerca del otro individuo (3 metros o menos). Durante el acercamiento normalmente desvían la mirada, pero al momento del acercamiento final se mirarán el uno al otro, especialmente durante la transición al saludo cercano. Otros comportamientos pueden incluir:

- **Presentación de palmas:** Comúnmente orientan sus manos abiertas con las palmas hacia aquellos que desean saludar. Esto no parece ser formalizado ni intencional, pero es un comportamiento observado.
- **Sonreír:** Una persona normalmente sonreirá, si es que no estuviera sonriendo aún.
- **Fijar la cabeza:** Las personas alteran la forma en la que sostienen su cabeza, aunque la postura de la cabeza varía considerablemente. Ejemplos incluyen la cabeza erecta, inclinada hacia delante o atrás, y cabeza inclinada hacia un lado.

6. **Saludo cercano.** Esta fase de la interacción es la más formalizada, generalmente ocurre cuando el acercamiento alcanza los 1.6 metros o menos. En este punto, un conjunto de saludos puede ocurrir (Heenan, *et al.* 2014).

- **El saludo cercano sin contacto:** Los participantes se detienen cara a cara e intercambian saludos verbales sin señales no verbales adicionales. Esta fase sigue siendo distinta, la gente desvía la mirada notablemente durante la última parte del acercamiento y pasan a una postura conversacional luego del saludo cercano sin contacto.
- **Saludo de manos:** Varían en largo e intensidad, influenciados significativamente por la formalidad de la ocasión. Son muy comunes en saludos entre hombres, pero poco comunes en saludos entre mujeres.
- **Abrazos:** Son también observados en saludos humanos, aunque esto depende de la relación entre los dos individuos.
- **Otros saludos cercanos:** Muchos dependen de la cultura, cómo inclinarse, besos mejilla a mejilla, etc.

Estos saludos muestran variedad, todos comparten algo en común. Primero, mientras los individuos se ven cara a cara directamente durante el acercamiento final, usualmente no mantienen esta orientación cuando el saludo cercano es completado. Segundo, las personas afinan la posición relativa de su cuerpo, aunque en una variedad de formas (Heenan, *et al.* 2014).

X. SENSORES DE DETECCIÓN

1. Gestos

a. Cámaras RGB. Una cámara RGB entrega los componentes básicos del color (red, green, blue) en tres diferentes canales. Sin embargo, en la naturaleza existen un número infinito de colores, en el rango electromagnético, variando entre ultravioleta e infrarrojo. Esto trae un problema para los fabricantes de cámaras, mientras más sensores de color se utilizan, menos luz es posible capturar por cada color, es más caro construir nuevos mecanismos y más complejas se vuelven las operaciones para volver a juntar los resultados. Por suerte, la evolución ha tratado este tema desde hace varios años (NI, 2015).

Figura 110. Ejemplo cámara RGB



(NI, 2015)

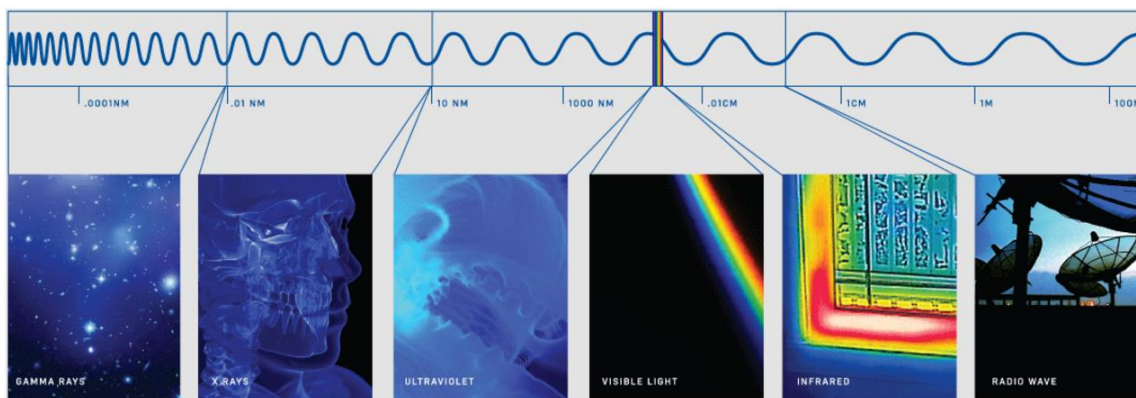
Los humanos y muchos animales utilizan tres distintos “sensores” para aproximar los colores presentados en el ambiente. Investigadores han demostrado que la elección de esos sensores es óptima para diferenciar distintos objetos en la naturaleza. Nuestros ancestros se vieron en la necesidad de aprender a ver a color para poder sobrevivir. El ojo humano posee tres distintos sensores de color que son un ejemplo de triestímulo, pero se refiere a este sistema como sistema visual humano (HVS- Human Visual System) (Pro Shooters LLC, s.f.).

Como tan sólo se cuenta con tres sensores en un sistema RGB y es necesario reconocer un sinnúmero de colores, es necesario calcular la combinación exacta de colores primarios para representar cada color en específico. Otro factor a tomar en cuenta es que los sensores, por sí solos, no son capaces de distinguir entre el rango de longitud de onda al que pertenece cada color; pero utilizando los otros sensores y midiendo la cantidad de cada color en el ambiente es posible determinar el color expuesto. Este proceso conlleva a crear muchas posibles fuentes de error. Las cámaras en específico, son propensas a cuatro errores relacionados con la manera de determinar el color: balance de blancos, metamerismo, luz no visible (IR) y definición de distintos colores (Pro Shooters LLC, s.f.).

b. **Cámaras IR.** Una cámara IR es un dispositivo que detecta energía infrarroja (calor) y la convierte en una señal electrónica, que puede ser procesada para poder producir una imagen térmica y hacer cálculos de temperatura del ambiente. El calor detectado por la cámara IR se puede cuantificar y medir de una forma muy precisa, lo que puede permitir no sólo controlar el rendimiento térmico, sino también identificar y evaluar la intensidad relativa de los problemas relacionados por el calor (FLIR, 2016).

1) **Infrarrojo.** La visión humana está limitada a una pequeña porción del espectro electromagnético. La energía térmica tiene una longitud de onda mayor a la luz visible. Más larga por lo que el ojo humano no es capaz de percibirla, al igual que las ondas de radio, entre otras. Con las imágenes térmicas, la porción del espectro que somos capaces de ver incrementa considerablemente, nos ayudan a “ver” y “medir” energía térmica emitida por un objeto. A diferencia de la luz visible, en el mundo infrarrojo, todo aquello con temperatura mayor al cero absoluto emite calor. Incluso objetos muy fríos, como cubos de hielo, emiten infrarrojo. Otro aspecto importante a mencionar es que la luz visible no afecta al mundo térmico, por lo que es posible ver bien tanto en ambientes en total oscuridad como en ambiente demasiado iluminados (FLIR, 2016).

Figura 111. Espectro electromagnético



(FLIR, 2016)

Cuanto mayor sea la temperatura del objeto, mayor es la radiación IR emitida. El infrarrojo permite ver lo que los ojos no pueden. Las cámaras de termografía infrarroja producen imágenes radiaciones de calor y proporcionan capacidades precisas de medición de temperatura sin contacto alguno. Casi todo se calienta antes de empezar a fallar, por lo que las cámaras infrarrojas son extremadamente rentables, son herramientas valiosas de diagnóstico en muchas aplicaciones. Y a medida que la industria se esfuerza por mejorar la eficiencia de fabricación, gestión de energía, mejorar la calidad del producto, y mejorar la seguridad de los trabajadores, surgen continuamente nuevas aplicaciones para las cámaras infrarrojas (FLIR, 2016).

c. APDS-9960. Posee avanzadas características de detección de gestos, detección de proximidad, sensor digital de luz ambiental y sensor de color. Viene en una presentación empaquetada de 3.94 mm largo X 2.36 mm ancho X 1.33 mm de alto. Incorpora un LED IR y un driver LED calibrado de fábrica para la compatibilidad “drop-in” con huellas existentes (Avago Technologies, 2015).

Figura 112 APDS-9960



(Avago Technologies, 2015)

La detección de gestos utiliza cuatro fotodiodos direccionales para detectar energía IR reflejada (originada por el LED integrado) para convertir la información de movimiento físico (e.g. velocidad, dirección o distancia) a información digital. La arquitectura del “gesture engine” cuenta con activación automática (basada en los resultados de proximidad), sustracción de luz ambiental, cancelación de la interferencia entre señales, convertidores duales de datos de 8 bits, ahorro de energía por retardo de inter conversión, 32-dataset FIFO, e interrupciones en corrida del bus de comunicación I2C. El “gesture engine” acoge un rango de requerimientos de gestos de dispositivos móviles: gestos simples, como arriba, abajo, derecha, izquierda, pero también pueden ser detectados gestos más complejos. El consumo de potencia y el ruido son minimizados por el “timing” ajustable del LED IR (Avago Technologies, 2015).

La característica de detección de proximidad provee mediciones de distancia (e.g. distancia entre la pantalla del dispositivo y la oreja del usuario) por detección del fotodiodo de energía IR reflejada (originada por el LED integrado). Eventos que detecta y realiza son interrupciones en corrida, y cuando la proximidad se detecta más baja o más alta que los valores establecidos. La intensidad del LED IR es ajustada de fábrica para eliminar la necesidad de calibración en la aplicación final. Los resultados de proximidad son mejorados por la sustracción automática de luz ambiental. La característica de detección de color provee datos de intensidad de luz roja, verde, azul y blanca. Cada canal tiene un filtro UV e IR y un convertidor de datos dedicado produciendo 16 bits de datos simultáneos. Esta arquitectura permite a las aplicaciones medir con precisión la luz ambiental y color, lo cual permite al dispositivo calcular la temperatura de color y controlar la luz de la pantalla (Avago Technologies, 2015).

1) Características

- Sensor de luz de ambiente y colores RGB, sensor de proximidad y detección de gestos en un módulo óptico
- Sensor de luz de ambiente y colores RGB
 - Filtros UV e IR
 - Ganancia e integración de tiempo programables
 - Alta sensibilidad – idealmente adecuado para operar detrás de un vidrio oscuro
- Sensor de proximidad
 - Ajustado para dar lecturas consistentes
 - Rechazo de luz ambiente
 - Compensación de desvío
 - Driver programable para la corriente de LED IR
 - Bit indicador de saturación
- Sensor de gestos complejos
 - Cuatro separados diodos sensitivos hacia diferentes direcciones
 - Rechazo de luz ambiente
 - Compensación de desvío
 - Driver programable para la corriente de LED IR
 - 32-dataset FIFO
 - Interrupción en corrida del bus de comunicación I2C
- Interfaz compatible modo rápido de bus I2C
 - Tasa de transferencia de datos hasta 400kHz
 - Pin dedicado de interrupción
- Empaque pequeño (3.94 X 2.36 X 1.35mm)
- Bajo consumo de potencia (Típicamente 1.0 μ A en modo “sleep”)

2) Aplicaciones

- Control de luz de pantalla
- Sensor correlacionado de temperatura de color
- Desactivar pantalla táctil de un celular
- Desactivar pantalla táctil de una cámara digital
- Reemplazo de un switch mecánico
- Detección de gestos
- Sensor de luz ambiental

d. **WiiMote.** Es conocido también como Wii Remote, utilizado como controlador de la consola de video juegos Wii. La consola Wii fue creada por la compañía Nintendo, conceptualizada en el 2001 y lanzada oficialmente al mercado en el 2005. Las dimensiones de la consola son 8.5" X 6" X 2". Cuenta con una unidad de discos que soporta discos ópticos de una o doble capa, además de ser compatible con discos de GameCube (consola anterior de Nintendo) (Tech FAQ, 2016).

Figura 113 Wii y Wii Remote



(Tech FAQ, 2016)

Una de las mayores diferencias entre Wii y otras consolas, es la implementación de un control Wireless. Puede ser utilizado como un puntero de mano y detector de movimiento en tres dimensiones. Los usuarios, con ayuda de este controlador, pueden controlar e interactuar con objetos dentro de la pantalla. Este controlador permite mejorar la interacción con el reconocimiento de gestos y señalización. El reconocimiento de gestos y señalización son complementados con el uso de un acelerómetro y un sensor óptico (Tech FAQ, 2016).

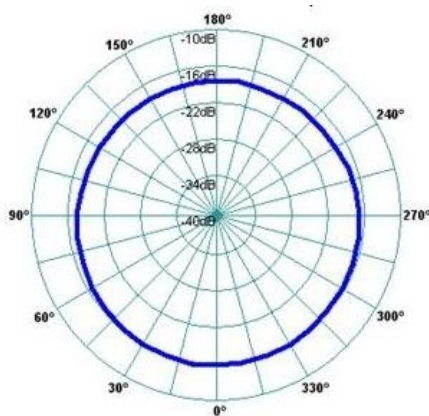
A diferencia de los controles tradicionales de generaciones anteriores, el Wii Remote es radicalmente distinto. A simple vista se mira como un ordinario control remoto de televisión y no cuenta con un protuberante joystick. El joystick fue sustituido por los movimientos del control completo ejecutados por el usuario, es decir, si el usuario necesita mover el puntero de izquierda a derecha en la pantalla solo es necesario mover el control de izquierda a derecha para ejecutar esta acción. Luego de realizado el movimiento, el control envía la señal a la consola. La consola compara los datos del movimiento con posible movimiento pregrabados y los interpreta a un movimiento en el juego (Tech FAQ, 2016).

2. Audio y voz

a. **Micrófonos direccionales.** La direccionalidad de un micrófono es la dirección o direcciones de donde el micrófono puede recibir sonido. El sonido puede venir hacia el micrófono de todas las direcciones posibles, del frente, atrás, o por los lados del micrófono, y el micrófono toma el sonido basado en las sus características de direccionalidad. Un micrófono puede llegar a recibir sonidos con una gran sensibilidad que vienen del frente del mismo, pero rechazar sonidos que vienen de otras direcciones. Otros micrófonos pueden llegar a recibir sonidos del frente y atrás pero no de los lados. Otros que pueden llegar a recibir sonidos de todos lados, existen muchas combinaciones de este tipo. Por lo que se puede decir que un micrófono direccional es aquel micrófono capaz de recibir o tomar en cuenta los sonidos provenientes de una o varias direcciones en específico. A continuación, se mostrarán algunos tipos de micrófonos direccionales existentes (Learning about electronics, s/a).

1) **Omnidireccionales.** Se conoce como micrófonos omnidireccionales a aquellos micrófonos que toman en cuenta el sonido proveniente de todas direcciones. No importa de qué lado del micrófono venga el sonido, frente, atrás, izquierda o derecha, en un rango de 360° , el micrófono toma el sonido con la misma sensibilidad (Learning about electronics, s/a).

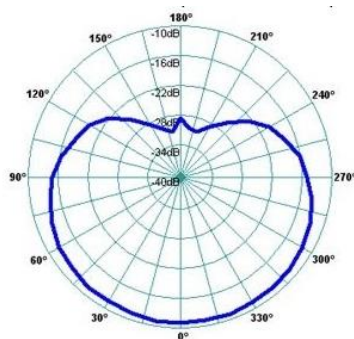
Figura 114. Respuesta polar micrófonos omnidireccionales



(Learning about electronics, s/a)

2) **Unidireccionales.** Los micrófonos unidireccionales son aquellos que sólo toman el sonido proveniente de una dirección en específico. Cuando se utiliza un micrófono unidireccional es importante tomar en cuenta en qué dirección está la fuente de sonido. Por ejemplo, cuando se utilizan auriculares con micrófono (headset) es necesario hablar del lado indicado para poder tener una ganancia aceptable, de lo contrario se obtiene una ganancia muy baja (Learning about electronics, s/a).

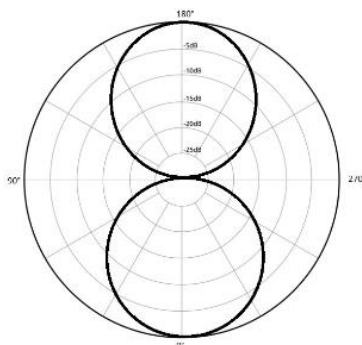
Figura 115. Respuesta polar micrófonos unidireccionales



(Learning about electronics, s/a)

3) **Bidireccionales.** Otro tipo de micrófonos direccionales son los micrófonos bidireccionales. Estos micrófonos son aquellos que toman el sonido proveniente de enfrente y detrás del mismo. El sonido proveniente de los lados lo recibe con una ganancia muy baja. Tiene dos lóbulos de recepción en dirección opuesta, con la misma sensibilidad de tal manera poder recibir los sonidos con la misma ganancia, aunque vengan de direcciones totalmente opuestas (Learning about electronics, s/a).

Figura 116. Respuesta polar micrófonos bidireccionales



(Learning about electronics, s/a)

3. **PlayStation Move & Eye.** La cámara PlayStation Eye y el control de movimiento PlayStation Move trabajan en conjunto para poder interpretar los movimientos realizados por el usuario y trasladarlos al juego con una precisión muy grande. La PlayStation Eye puede ser utilizado también en video chats. Las características principales de esta cámara son (Sony Computer Entertainment America LLC, 2014):

- Cuenta con 4 micrófonos incorporados por lo que proporciona una buena calidad de sonido
- Permite video chat de hasta 6 personas
- Es utilizada en el chat de los juegos y para interpretar comandos de voz
- 120 cuadros por segundo con una resolución de 320x240
- Cuenta con lentes para hacer zoom y así poder tener perspectiva cercana y de cuerpo completo

- Monitorea la posición de cada jugador

Figura 117. PlayStation Eye



(Lowe, 2010)

Este sistema utiliza datos de movimiento en tiempo real proveídos por los sensores dentro del control PlayStation Move, combinados con la información de posición en tres dimensiones brindada por el PlayStation Eye. El controlador cuenta con un tipo de orbe en la parte superior por medio del cual el sistema cuenta con tanta precisión. La cámara utiliza este orbe, que en la mayoría de los casos es iluminada con distintos colores de luz, para determinar la distancia ente los mismos. Conociendo el tamaño real del orbe es posible determinar la distancia a partir del tamaño percibido por la cámara (Lowe, 2010).

Figura 118. PlayStation Move



(Lowe, 2010)

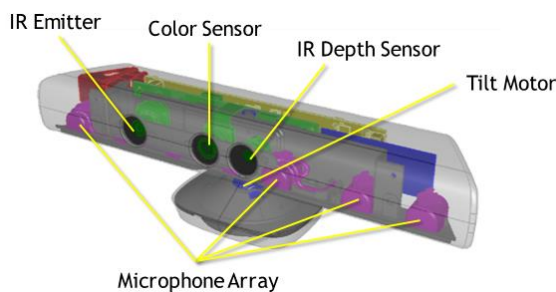
El controlador cuenta con sensores como un giroscopio que permite determinar el ángulo al que está sostenido el mismo, acelerómetros para determinar la velocidad de los movimientos y un sensor de campo magnético. Además de los tradicionales botones y joystick analógico para controlar la interfaz de la consola y conexiones Bluetooth 2.0 y USB 2.0 (Lowe, 2010).

Uno de los problemas con los que cuenta este sistema es la irregularidad en su desempeño dependiendo del ambiente en el que esté trabajando. Habitaciones cerradas tienden a tener una mejor respuesta que aquellas que cuentan con grandes ventanas o grandes entradas de luz externa. Esta luz afecta la comunicación entre el controlador y la cámara lo cual tiene como resultado una mala lectura de posición 3D. Este problema se puede solucionar fácilmente cerrando las cortinas o tapando la entrada de luz externa, pero no es la manera más óptima. Una solución puede ser incrementar la resolución y definición de la cámara (Lowe, 2010).

4. **Kinect for Windows.** Originalmente conocido como “Project Natal”, anunciado en 2009, el Kinect es un dispositivo controlador de videojuegos creado para la consola Xbox 360, con la diferencia de los demás controladores o controles que no es necesario entrar en contacto directo con él para poder ejecutar comandos en el sistema. Siendo capaz de detectar tanto movimiento como sonidos debido a los componentes que lo conforman, el Kinect vino a revolucionar la manera de interactuar con los videojuegos, sustituyó el control comúnmente conocido por algo que no es necesario conectar, ni cargarle las baterías, vino a cambiarlo por nuestro propio cuerpo (Abhijit, 2012).

Sin embargo, es importante mencionar que el Kinect no está dedicado únicamente para el control de la consola Xbox, también existe el Kinect para Windows creado para ayudar a los desarrolladores a crear aplicaciones mucho más apegadas a la realidad involucrando gestos y movimientos del cuerpo. La versión para Windows necesita un adaptador especial para ser conectado al tomacorriente para de esta manera recibir la corriente necesaria para funcionar adecuadamente. A continuación, se presentarán los principales componentes del Kinect (Abhijit, 2012):

Figura 119. Partes Kinect for Windows



(Microsoft, 2016)

a. **Emisor infrarrojo (IR).** El emisor infrarrojo es el componente encargado de proyectar rayos infrarrojos utilizados para realizar el análisis de profundidad. A simple vista parece una cámara común y corriente pero no es así, este emisor proyecta constantemente patrones de rayos infrarrojo con una longitud de onda de 830nm. Este tipo de luz es casi imperceptible para los humanos, tan solo es posible ver un pequeño punto rojo en el emisor (Giorio, 2013).

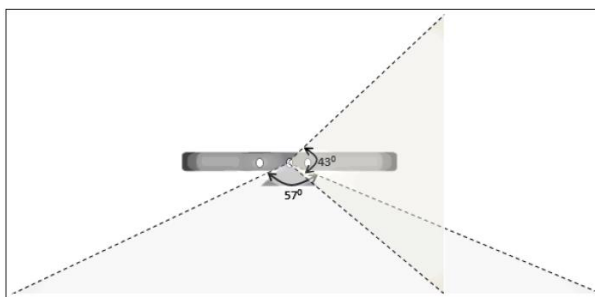
El patrón proyectado consta de 3x3 sub-patrones y cada uno compuesto de 211x165 rayos, 633x495 rayos en total. Cuando el patrón emitido choca contra un objeto es distorsionado, el sensor de profundidad IR es el encargado de analizar dicha distorsión y determinar la distancia a la que se encuentra el objeto (Giorio, 2013).

b. **Sensor de profundidad IR.** El sensor de profundidad IR es un sensor monocromático CMOS con un filtro pasa infrarrojo, es decir, no deja pasar la luz visible. Este es el componente encargado de capturar y analizar los datos de profundidad. Si el patrón infrarrojo es emitido hacia una superficie plana, el sensor de profundidad conoce la manera de cómo debería de recibir los rayos emitidos; en el caso que algunos de los rayos no regresen de la forma esperada se interpreta como que un objeto perturbó el recorrido de los mismos y de esta manera se sabe que hay un objeto y a qué distancia. Es importante mencionar que la presencia de la luz solar o bien cualquier luz con longitud de onda cercana a 830nm afecta el desempeño correcto del sensor (Borenstein, 2012).

El Kinect cuenta con dos modos distintos para el tema de profundidad: modo predeterminado y modo cercano. El rango de distancia para el modo predeterminado es de 0.8 hasta 4m, pero para asegurar un funcionamiento óptimo se recomienda disminuir el rango de 1.2 a 3.5m. Para el modo cercano, el rango es de 0.4 hasta 3m, pero se recomienda utilizarlo entre 0.8 y 2.5m (Borenstein, 2012).

c. **Cámara RGB.** Esta es la cámara encargada de capturar los datos de video a color a una velocidad de 30 cuadros por segundo a una resolución de 640x480 pixeles, en modo normal. La resolución puede llegar hasta a 1280x960 pixeles a una velocidad de 12 cuadros por segundo. El rango de vista es de 43° vertical por 57° horizontalmente, el vertical puede ser modificado haciendo uso del motor de inclinación (Abhijit, 2012).

Figura 120. Rango de vista Kinect for Windows

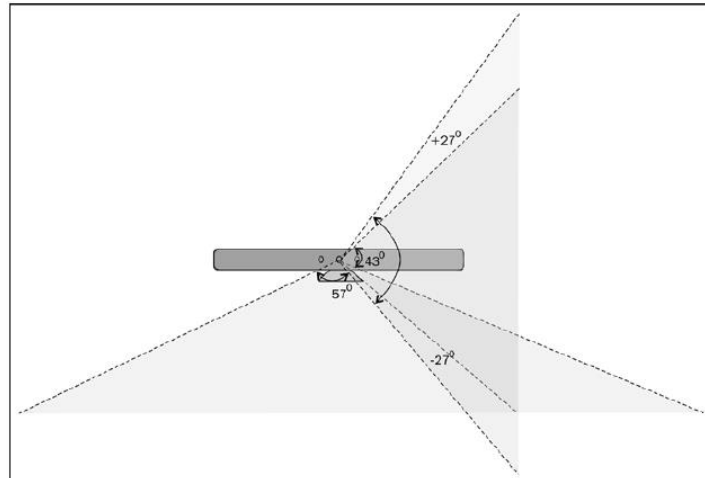


(Abhijit, 2012)

d. **Motor de inclinación y acelerómetro de tres ejes.** La base y el cuerpo del Kinect están conectados por un motor encargado de la inclinación de todo el cuerpo. Esta inclinación es utilizada para adaptar las cámaras y sensores y así poder capturar los datos correctamente; el rango de vista vertical puede llegar a ser modificado hasta $\pm 27^\circ$. La altura recomendada para posicionar el Kinect de manera para lograr una visión óptima es de entre 1 y 2 metros (Giorio, 2013).

La posición de todo el cuerpo es conocida debido al acelerómetro de ejes con el que cuenta el Kinect. Este acelerómetro está configurado con un rango de 2g y una precisión de 1° a 3° (Giorio, 2013).

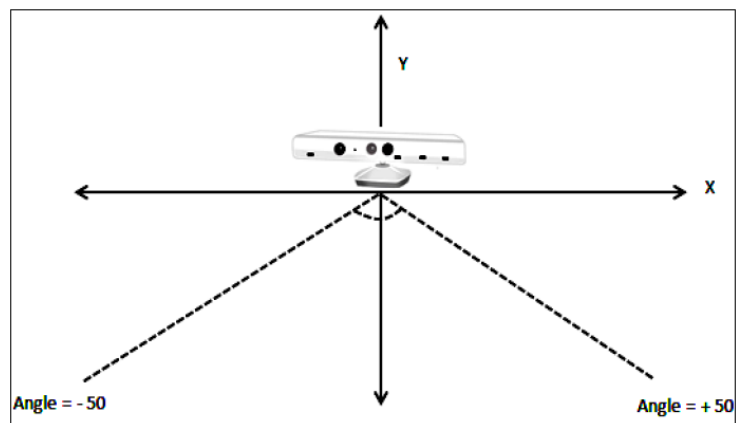
Figura 121. Rango de vista con inclinación Kinect for Windows



(Abhijit, 2012)

e. Arreglo de micrófonos. El Kinect también cuenta con un arreglo de cuatro micrófonos, con un ADC de 24 bits, distribuidos a lo largo de todo el cuerpo. Además de la obvia función de poder capturar sonidos, los micrófonos están distribuidos de esta manera para poder usarlos en conjunto y lograr ubicar la fuente de sonido. Utilizando varios micrófonos también es posible hacer un reconocimiento de voz más efectivo debido a la supresión del ruido y cancelación del eco. La entrada de audio tiene un rango de 100° y permite cancelar hasta 20dB de ruido ambiental (Abhijit, 2012).

Figura 122. Rango de entrada de audio Kinect for Windows



(Abhijit, 2012)

Y. IDE (ENTORNO DE DESARROLLO INTEGRADO)

Por sus siglas en inglés “Integrated Development Environment”, un entorno de desarrollo integrado es un software compuesto por varias herramientas de programación con el fin que el usuario pueda utilizar estas herramientas de una forma fluida y más fácil. Es posible que se oriente a un solo lenguaje de programación o puede ser compatible con varios. En la mayoría de los casos, un IDE consiste en un editor de código, un compilador y una herramienta para elaborar interfaces gráficas (Flores, 2013).

1. **SPYDER.** Es un ambiente interactivo de desarrollo de Python que provee características como MATLAB en un software simple y no tan pesado. También provee algunos widgets de Python listos para usar, un editor de código con resaltador de sintaxis y un analizador de características de código, editor de arreglos, editor de diccionario, la consola de Python entre otras características (PSF, 2016).

a. **Python.** Es un lenguaje de programación de alto nivel, orientado a objetos e interpretado con semántica dinámica. Su construido alto nivel, combinado con su dinámica escritura y su combinación dinámica, lo hace un atractivo desarrollar rápido de aplicaciones, así como para ser utilizado como lenguaje intermediario entre componentes existentes en un sistema. Python es simple y fácil de aprender enfatizando su sintaxis entendible, lo cual lo ha mantenido en uno de los lenguajes de programación más utilizados. Python soporta módulos y paquetes, que fomentan la modularidad del programa y su reúso. El intérprete de Python y sus extensivas librerías están disponible en forma fuente o binaria sin ningún tipo de costo y puede ser distribuido libremente (PSF, 2016).

A menudo, los programadores se enamoran de Python debido al incremento de la productividad que ofrece. A pesar de no tener una fase de compilación, el ciclo de depuración, edición y prueba es increíblemente rápido. Depurar un programa en Python es muy fácil: un error o una mala entrada nunca causa un “segmentation fault”. En lugar de eso, cuando el intérprete encuentra un error, levanta una excepción. Cuando el programa no reconoce la excepción, el intérprete imprime un seguimiento de la misma. Un depurador de nivel fuente permite una inspección de variables locales y globales, evaluación de expresiones arbitrarias, establecer puntos de quiebre, pasar por cada línea de código en su momento, entre otras. El depurador está escrito en el propio Python, testificando el poder introspectivo de Python. Por el otro lado, a veces la forma más rápida de depurar un programa es agregar algunos “print” en partes del código: el rápido ciclo de depuración, edición y prueba lo hace un simple acercamiento muy sencillo (PSF, 2016).

2. **Processing.** Iniciado por Ben Fry y Casey Reas, Processing es un entorno de desarrollo integrado y a la vez un lenguaje de programación creado para aprender a programar en el contexto de las artes visuales. Desde 2001, Processing ha promovido la unión entre software y arte, también entre lo visual y la tecnología. Existen decenas de miles de estudiantes, artistas, diseñadores, investigadores y aficionados que utilizan Processing para aprender y hacer prototipos. Entre sus beneficios se pueden mencionar: su

descarga es gratis y “open source”; posee programas interactivos con salidas 2D, 3D o PDF; integración de OpenGL; disponible para GNU/Linux, Max OS X y Windows; más de 100 librerías disponibles; y una buena documentación además de varios libros (Processing Foundation, s/a).

a. **SimpleOpenNI.** Es una librería disponible para Processing que permite utilizar la mayoría de las funcionalidades de OpenNI (OpenNI, s/a).

b. **OpenNI.** Es una librería creada por PrimeSense para trabajar con el Kinect por medio de Processing. Además de incluir drivers que permiten a los programadores acceder a información acerca del Kinect, PrimeSense incluyó software sofisticado que procesa las imágenes de profundidad para detectar a los usuarios y poder localizar la posición de las articulaciones en tres dimensiones. El nombre OpenNI, viene de “Natural Interaction”. OpenNI representó en su momento el mayor avance en la capacidad para la comunidad entusiasta de poder trabajar con el Kinect. Por primera vez, todos los datos que hacían al Kinect una grandiosa herramienta para crear proyectos interactivos llegaron a estar disponibles para proyectos creativos de programación (Borenstein, 2012).

Mientras otras librerías se preocupaban por crear aplicaciones para demostrar todo lo que se podía lograr con el Kinect, los usuarios de OpenNI se dedicaron a poner a disposición de todo el mundo la oportunidad de trabajar con el mismo. Información como la posición exacta de las articulaciones de los usuarios (cabeza, hombros, codos, muñecas, pecho, cadera, rodillas, tobillos y pies) durante todo el tiempo que se utiliza la aplicación. Se puede decir que esta información es el santo grial de las aplicaciones interactivas. Si se desea que el usuario sea capaz de controlar algo en una aplicación por medio del movimiento de sus manos o por su posición en el cuarto, lo mejor que se puede tener es la posición exacta de las articulaciones de interés (Borenstein, 2012).

Algunas características importantes a mencionar de OpenNI son (Fernandez, 2012):

- Rastreo de esqueleto
- Reconocimiento de hasta 20 articulaciones
- Retardo en milisegundos
- Es necesaria la calibración para trabajar con el Kinect
- Resolución con RGB de 800X600
- No trabaja con audio
- Disponible para plataformas Windows, OS X y Linux
- Seguimiento de manos
- Consume poco CPU
- Genera eventos cuando un usuario sale y entra a escenario
- Soporta lenguajes como Python, C, C++, C#, Java, Lisp, entre otros

3. **Microsoft Visual Basic.** Es un entorno de desarrollo integrado gratuito compatible con varios lenguajes de programación como C#, Visual Basic, F#, C++, HTML, JavaScript, Python, entre otros. Algunas de sus características más importantes son: su flexibilidad de crear aplicaciones para cualquier plataforma disponible; su gama de editores, depuradores y generadores de perfiles; entre otras (Microsoft 2016).

a. **C#.** Es un elegante y seguro lenguaje orientado a objetos que permite a los desarrolladores construir una variedad de seguras y robustas aplicaciones que corren en .NET Framework. Se puede utilizar C# para crear aplicaciones de cliente en Windows, servicios web XML, componentes distribuidos, aplicaciones cliente-servidor, aplicaciones de bases de datos entre muchas otras. Visual C# provee un avanzado editor de código, conveniente para el diseño de la interfaz de usuario, depurador integrado, y muchas otras herramientas para hacer fácil el desarrollo de aplicaciones basados en el lenguaje de C# y .NET Framework (Microsoft 2016).

La sintaxis de es altamente expresiva, aunque también es fácil y simple de aprender. La sintaxis, basada en signos de llave, de C# debe ser reconocida inmediatamente por aquellos familiarizados con C, C++ o Java. Las personas familiarizadas con estos lenguajes deberían poder empezar a trabajar de una forma óptima en poco tiempo. La sintaxis de C# simplifica varias de las complejidades de C++ y provee poderosas características como variables de tipo NULL, enumeraciones, delegados, expresiones lambda y accesos directos a memoria, que no se pueden encontrar en Java. C# soporta método y tipos genéricos, que proveen un tipo de incremento en seguridad y performance, e iteraciones, que permite implementaciones de clases de colecciones que definen el comportamiento de las iteraciones comunes que son fáciles de usar por el código de los clientes. Las expresiones Language-Integrated Quer (LINQ) hacen la consulta fuertemente tipada en una construcción de lenguaje de primera clase (Microsoft, 2016).

Como un lenguaje orientado a objetos, C# soporta los conceptos de encapsulación, herencia y polimorfismo. Todas las variables y métodos, incluyendo el método “Main” que es el punto de entrada de aplicación, son encapsulados en las definiciones de la clase. C# también facilita el desarrollo de componentes de software a través de varios constructores de lenguaje, incluyendo los siguientes (Microsoft, 2016):

- Firmas de métodos de encapsulación llamados delegados, que permite notificaciones de eventos de tipo seguridad
- Propiedades, que sirven como descriptores de acceso para variables miembro privadas
- Atributos, que proveen metadatos declarativos sobre tipos en tiempo de ejecución
- Comentarios en línea de la documentación XML
- Language-Integrated Query (LINQ) que provee funciones de consulta integradas en una gran variedad de orígenes de datos

Z. NUI (NATURAL USER INTERFACE)

Por sus siglas en inglés “Natural User Interface”, se entiende como una interfaz humano-computador que permite al usuario interactuar de una manera natural e intuitiva con algún sistema a través de movimientos y gestos. Las NUI’s son creadas a partir de dos principios (Giorio, 2013):

- La NUI tiene que ser imperceptible debido a sus intuitivas características, por ejemplo, la capacidad de un sensor para capturar gestos, la de un micrófono para capturar la voz o la de una pantalla táctil de capturar las acciones de las manos sobre ella. Estamos tan acostumbrados a utilizar estas interfaces que terminan siendo casi imperceptibles para nosotros
- La NUI está basada en elementos naturales, por ejemplo, movimientos del cuerpo o comandos de voz

Debido a los principios sobre los que se basan las NUI’s, son cruciales para incrementar y mejorar la accesibilidad del usuario al uso del sistema (Giorio, 2013).

1. **Rastreo de esqueleto (Skeleton Tracking).** Como se mencionó anteriormente, el Kinect es capaz de obtener datos de profundidad de todo el panorama en donde cada pixel contiene un valor que representa la distancia entre el sensor y el objeto frente a él. El rastreo de esqueleto se conforma principalmente del análisis de profundidad, procesamiento interno y algoritmos de visión a color. Usando el rastreo de esqueleto, el Kinect es capaz de rastrear el cuerpo humano y varias de las articulaciones en el mismo. Usando el SDK del Kinect para Windows, es posible rastrear hasta seis jugadores y hasta 20 articulaciones para cada esqueleto; sin embargo, solo es posible rastrear a detalle las articulaciones de dos cuerpos, para el resto de cuerpos tan solo es capaz de indicar su posición en general. Para poder rastrear a detalle todos los cuerpos sería necesario más capacidad de procesamiento (Abhijit, 2012).

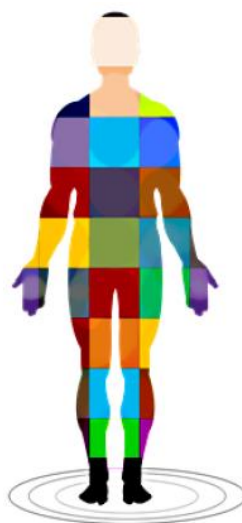
El rastreo de esqueleto no consta solamente de darle seguimiento a las articulaciones mediante la lectura de la información de los jugadores; se rastrea el movimiento completo del cuerpo. El reconocimiento en tiempo real de la posición del cuerpo humano es difícil y desafiante debido a las sin fin de posibles posturas corporales que se pueden llegar a tener (considerando tan solo una parte del cuerpo en específico, esta parte puede moverse en diferentes direcciones y formas), tamaño de las partes corporales, vestuario de las personas, altura y entre otros factores (Abhijit, 2012).

Para superar los problemas anteriormente mencionados y realizar un seguimiento de articulaciones independiente de la postura corporal, el Kinect utiliza un “rendering pipeline” en el cual hace coincidir los datos recibidos (los datos de profundidad) con datos de muestra. El algoritmo de reconocimiento de postura humana usa varios modelos que varían con diferentes tamaños, alturas, ropa y otros factores. Los datos de muestra son tomados de modelos con diferentes posturas, tipo de cabello, ropa y desde diferentes posturas y

ángulos. Los datos aprendidos se etiquetan a qué parte del cuerpo pertenecen y de manera que al hacer la coincidencia poder identificar cada una de las partes del cuerpo. El proceso de “rendering pipeline” procesa los datos en varios pasos para rastrear las partes del cuerpo humano a partir de los datos de profundidad (Abhijit, 2012).

El Kinect, a partir de los datos de profundidad, puede identificar el rango de píxeles ocupado por el cuerpo humano frente a él. En los primeros pasos del proceso de “rendering pipeline”, se identifica el objeto del cuerpo humano siendo tan solo una silueta frente al Kinect. Para empezar a reconocer que la silueta identificada efectivamente es un cuerpo humano se inicia el proceso de hacer coincidir los datos obtenidos con los datos de muestra a una velocidad muy alta de proceso. El siguiente paso es identificar cada una de las distintas partes del cuerpo humano, por lo que se hace una segmentación del mismo. Cada uno de los píxeles recibidos pasan a través de un algoritmo conocido como “Decision Forrest”, el cual es el encargado de hacer la segmentación completa del cuerpo como se muestra en la siguiente figura (Abhijit, 2012):

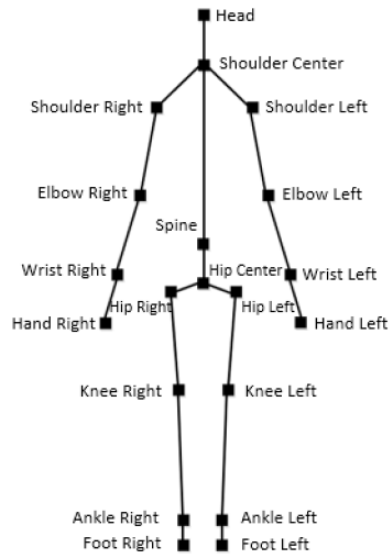
Figura 123. Segmentación de cuerpo humano



(Abhijit, 2012)

Una vez identificadas todas las partes del cuerpo, es momento de identificar la posición de las articulaciones del mismo. Teniendo identificada la posición de todas las articulaciones y el movimiento de las mismas, el Kinect es capaz de identificar el movimiento del cuerpo completo. La posición se mide en tres coordenadas (x , y , z) en donde “ x ” y “ y ” definen la posición en un plano 2D y “ z ” identifica la distancia desde el Kinect hasta la articulación. En modo normal, es posible identificar 20 articulaciones en el cuerpo tal cual como se muestra en la siguiente figura (Giorio, 2013):

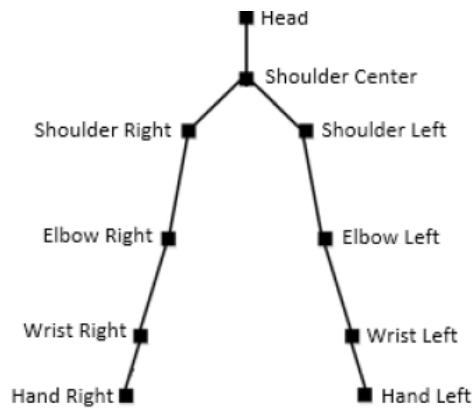
Figura 124. Articulaciones reconocidas en modo normal



(Giorio, 2013)

También existe el modo sentado para un esqueleto en donde se reconocen tan solo 10 articulaciones. A continuación, se muestra el resultado de este modo (Giorio, 2013):

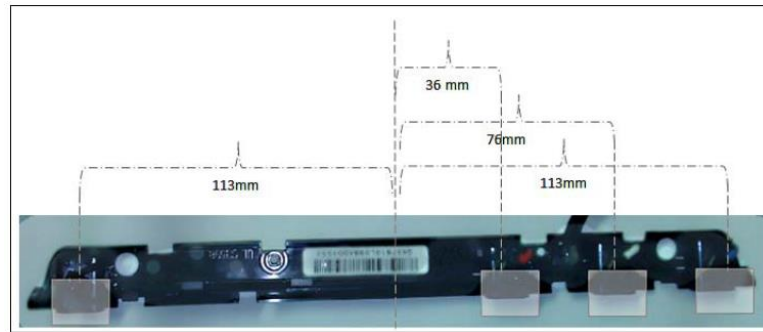
Figura 125. Articulaciones reconocidas en modo sentado



(Giorio, 2013)

2. Reconocimiento de audio. El Kinect consiste en un arreglo de micrófonos con varias características importantes de audio. El arreglo de micrófonos consiste en cuatro micrófonos separados, viendo hacia abajo, ubicados en la parte baja del cuerpo del Kinect, distribuidos linealmente, tres del lado derecho y uno del lado izquierdo. La distribución de micrófonos se puede observar en la siguiente figura (Abhijit, 2012):

Figura 126. Arreglo de micrófonos Kinect for Windows



(Abhijit, 2012)

Este arreglo permite al Kinect capturar una mejor calidad de sonido y proporciona un procesamiento de señal incorporado, que incluye supresión de ruido y cancelación de eco; identificar la dirección del origen del sonido; y basado en el sonido escuchado en cada uno de los micrófonos, automáticamente se puede identificar la dirección de donde viene el sonido y escuchar específicamente por uno de los micrófonos suprimiendo otros sonidos que no son de interés (Abhijit, 2012).

Una vez definido la dirección del origen del sonido, el Kinect es capaz de cambiar dicha dirección mientras el origen del sonido se mueve. Esto permite que se le pueda hablar al Kinect sin necesidad de estar en un lugar en específico. El Kinect cuenta con un sistema de procesamiento de audio incorporado que se encarga de todas las características del procesamiento de audio. Otro aspecto importante del arreglo de micrófonos es que permite el reconocimiento de voz enfocándose únicamente en una dirección particular e ignorando otros posibles orígenes de sonido en el entorno (Abhijit, 2012).

a. **Procesamiento de audio.** El Kinect cuenta con su propio sistema de procesamiento de audio integrado para filtrar los datos de audio. Cuando el origen y la posición del sonido son reconocidos, el sistema de procesamiento de audio une las señales de todos los micrófonos y produce una señal de sonido de alta calidad. Como el Kinect es capaz de reconocer voz humana, el sistema de procesamiento de audio también cuenta con un filtro que suprime todas aquellas frecuencias que están fuera del rango de frecuencias de la voz humana, logrando con esto filtrar el ruido, remover el eco y producir una voz amplificada. El sistema de procesamiento de audio utiliza varios procesadores de señales digitales (DSP-Digital Signal Processor) que contienen algoritmos para producir un mejor reconocimiento de voz, independientemente de las situaciones (Abhijit, 2012).

Algunos componentes clave del sistema de procesamiento de audio son: la cancelación de eco acústico (AEC-Acoustic Echo Cancellation), “BF-Beam Former”, localizador de origen de sonido (SSL-Sound Source Localizer), supresor de ruido (NS-Noise Suppression) y el controlador automático de ganancia (AGC-Automatic Gain Controller). Al combinar el “beam former” y el localizador de origen de sonido, el Kinect

logra ser un buen micrófono direccional logrando escuchar en una dirección en particular. La cancelación de eco acústico es utilizada para remover sonidos producidos por altoparlantes. El supresor de ruido, como su nombre lo indica, suprime todos aquellos sonidos que no son deseados. El controlador automático de ganancia se sitúa al final del sistema de procesamiento de audio y es utilizado como un amplificador para el sonido entrante (Abhijit, 2012).

b. **Reconocimiento de voz.** Uno de los aspectos más importantes de las NUI es el reconocimiento de voz. Las aplicaciones de reconocimiento de voz permiten a los usuarios decir cualquier comando a un micrófono e inmediatamente la computadora o el dispositivo ejecuta una acción determinada. Los micrófonos del Kinect actúan como un excelente dispositivo de entrada para las aplicaciones comandadas por voz. Este arreglo de micrófonos provee una mucho mejor calidad en la captura de audio que con un solo micrófono gracias a las características antes mencionadas de supresión de sonido, cancelación de eco y la capacidad de escuchar a una dirección en particular con ayuda de la localización de origen de sonido (Abhijit, 2012).

El objetivo del proceso de reconocimiento de voz es convertir comandos vocales dichos por el usuario en acciones ejecutadas por una aplicación. El proceso de reconocimiento voz es realizado por un motor de reconocimiento de voz (“speech recognition engine”) que analiza la voz de entrada comparándola con una gramática predeterminada. El alcance del “speech recognition engine” es verificar si la voz de entrada corresponde a un comando válido. Un comando válido es uno que satisface las reglas de semántica y sintaxis definidas por la gramática. Un comando válido reconocido por el “speech recognition engine” es convertido en una acción ejecutable por la aplicación (Giorio, 2013).

A continuación, se enumerarán las operaciones realizadas para el reconocimiento de la voz del usuario (Giorio, 2013):

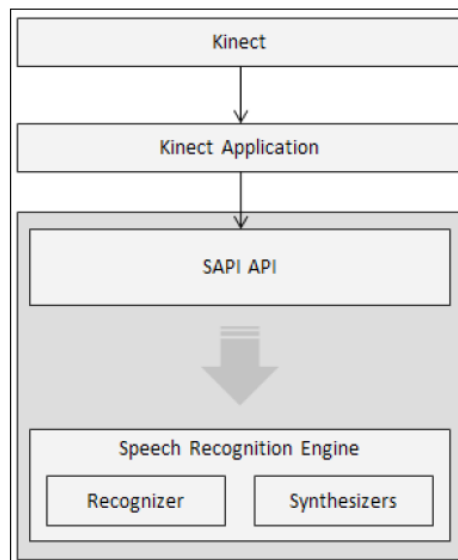
1. Los micrófonos capturan el audio y se convierte la señal analógica en una señal digital, esta señal ya puede ser entendida por la computadora
2. En el siguiente paso, la señal de audio digitalizada es enviada al “speech recognition engine” para reconocer el audio
3. El modelo acústico del “speech recognition engine” es el encargado de analizar el audio y convertir el sonido en un número de elementos básicos de voz; estos elementos son llamados fonemas. Los fonemas son las unidades de la voz que son utilizados para coincidir con la voz. El modelo acústico es uno de los componentes más importantes del “speech recognition engine”. Este también incluye algoritmos de aprendizaje interno
4. El modelo de lenguaje es el segundo mayor componente del “speech recognition engine”. El modelo de lenguaje analiza el contenido de la voz y trata de coincidir la palabra por medio de combinaciones de fonemas con un diccionario digital interno. Entonces lo que hace es, combina

los fonemas creados por el modelo acústico con una palabra y la compara con el diccionario interno

5. Si la palabra existe en el diccionario, el “speech recognition engine” reconoce lo que se ha querido decir

c. Microsoft Speech Application Programming Interface (SAPI). El SDK de Kinect utiliza la librería “Microsoft Speech Library” para el reconocimiento de voz. El instalador del SDK instala el “Microsoft Kinect Speech Recognition Language Pack (En-US) con todos los otros componentes requeridos. La SAPI trabaja como un intermediario y provee una interfaz entre la aplicación y el “speech recognition engine” (Abhijit, 2012).

Figura 127. Función SAPI en reconocimiento de voz



(Abhijit, 2012)

Para desarrollar cualquier aplicación habilitada por voz, utilizando el Kinect, es necesario realizar los siguientes pasos (Abhijit, 2012):

1. Habilitar el “speech audio source”
2. Iniciar la captura de los datos de audio
3. Identificar el reconocedor de voz
4. Definir la gramática para el reconocedor de voz
5. Iniciar el reconocedor de voz
6. Adjuntar el “speech audio source” al reconocedor
7. Registrar el controlador de eventos para el reconocimiento de voz
8. Manejar los distintos eventos invocados por el “speech recognition engine”

3. **SDK de Kinect for Windows 1.8.** Por sus siglas en inglés “Software Development Kit”, el kit de desarrollo de software para el Kinect for Windows fue creado con el objetivo de que investigaciones académicas y programadores particulares fueran capaces de poder desarrollar nuevas interfaces con el Kinect. El SDK incluye: driver para usar el Kinect for Windows en una computadora con Windows 7, Windows 8, Windows 8.1 o Windows Embedded Standard 7; interfaces de programación de aplicaciones (API) e interfaces del dispositivo (Microsoft 2016).

a. **Requerimientos**

Cuadro 12. Requisitos SDK

HARDWARE	SOFTWARE
Procesador de 32-bit (x86) o 64-bit (x64)	Visual Studio 2010 o 2012
Dual-core 2.66-GHz o más rápido	.NET Framework 4 o 4.5
Bus USB 2.0 dedicad	Microsoft Speech Platform SDK v11
2GB RAM	
Kinect for Windows	

(Microsoft 2016)

b. **Características.** Algunas características importantes a mencionar del SDK son las siguientes (Fernandez, 2012):

- Rastreo de esqueleto
- Reconocimiento de hasta 20 articulaciones
- Retardo en milisegundos
- No necesita calibración del Kinect
- Seguimiento predictivo
- Resolución de cámara RGB de hasta 1024x768
- Grabación de audio
- Cancelación de audio
- Reconocimiento de voz
- Compatible con Windows
- Múltiples sensores
- Soporta lenguajes como C++, C#, Visual Basic utilizando Visual Studio
- Amplia documentación

AA. ¿QUÉ ES UN ACTUADOR NEUMÁTICO FLEXIBLE?

Un actuador neumático es un elemento de trabajo que transforma la energía neumática provista por aire comprimido, en trabajo mecánico. Generalmente, utilizar un actuador neumático trae como ventaja la rapidez

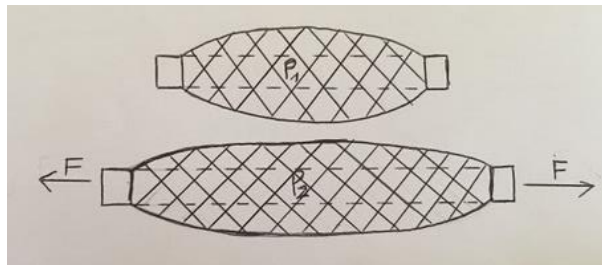
de reacción a costas de una instalación especial para el funcionamiento. De igual forma, los actuadores neumáticos tradicionales como un cilindro neumático, adiciona un peso considerable en la aplicación en el que se esté utilizando.

Sin embargo, existe un actuador en la rama de la neumática desarrollado por J. L. McKibben en los años 50, que es barato y mucho más ligero por los materiales de los que está construido. Un actuador McKibben consiste en un tubo interno flexible, cubierto por una malla flexible compuesta por fibras no flexibles tejidas a un ángulo, con un extremo sellado y el otro extremo conectado a un sistema neumático que lo acciona. Por las características anteriores y las inherentes de cualquier actuador neumático, un actuador McKibben es ideal en aplicaciones donde el peso total es crítico, una fuerza considerable debe ser generada por ellos y que no se requiera mucha exactitud en las posiciones derivadas del movimiento de los mismos. Esto encaja perfectamente con el desarrollo de robots bípedos donde se busca una manera de simular una caminata humana natural (Björn 2003:14-16) (Wisse 2007: 25-26).

El actuador neumático flexible que se utilizó en este trabajo, está basado en el actuador descrito por McKibben.

1. **Deducción del modelo matemático.** Un actuador neumático flexible es básicamente un volumen cubierto por fibras tejidas en una malla que se expande radialmente y se contrae axialmente cuando se aplica aire a presión. De esta manera, el actuador neumático flexible genera una fuerza unidireccional para tirar de cargas longitudinalmente (Figura 128).

Figura 128. Funcionamiento básico de un actuador neumático flexible.



Para poder encontrar la fuerza teórica que puede ejercer el actuador se usará la Ley de la conservación de la energía y se harán las siguientes idealizaciones con el objetivo de simplificar el análisis:

- La fuerza de fricción entre la malla externa y el tubo de silicón interno, es despreciable.
- La presión inicial y final de funcionamiento son constantes.
- El sistema neumático no afecta de manera significativa el tiempo de reacción del actuador. Es decir, el tiempo que le toma al microcontrolador mandar la señal de comando a la electroválvula y el tiempo que le toma a la misma abrirse, no influye en el funcionamiento del actuador.

- La viscosidad y densidad del aire no influye en los resultados del modelo.
- Las propiedades físicas de los materiales utilizados, no influyen de manera significativa.

El trabajo de entrada (W_{in}) sucede cuando el aire comprimido empuja la superficie interna del tubo de silicón y hace que se expanda de manera radial reduciendo su largo total. Esto se traduce a la siguiente formula:

$$dW_{in} = P * dV \quad (1)$$

Donde P , es la presión relativa interna del actuador neumático flexible y dV , es el cambio en el volumen interno del mismo.

El trabajo de salida (W_{out}) ocurre cuando el actuador regresa a su largo original y se reduce su volumen. Podemos expresar este comportamiento de la siguiente manera:

$$dW_{out} = -F * dL \quad (2)$$

Donde, F , es la fuerza axial de tensión y, dL , es el desplazamiento axial.

Desde el punto de vista de la conservación de la energía, la entrada debe ser igual a la salida si un sistema no tiene perdidas y no guarda energía alguna (Çengel 2011:2). Entonces,

$$dW_{out} = dW_{in} \quad (3)$$

De la sustitución de la ecuación 1 y 2 en la ecuación 3, obtenemos

$$-F * dL = P * dV \quad (4)$$

Despejando para la fuerza F .

$$F = -P * \frac{dV}{dL} \quad (5)$$

Ahora, para poder estimar el valor de dV / dL , el tubo interno del actuador es modelado como un cilindro perfecto (Figura 129) donde L es la longitud del cilindro; θ , es el ángulo entre una fibra de la malla y el cilindro; D , es el diámetro del cilindro; y b , es la longitud de una fibra de la malla.

Figura 129. Modelo teórico de un actuador neumático flexible.

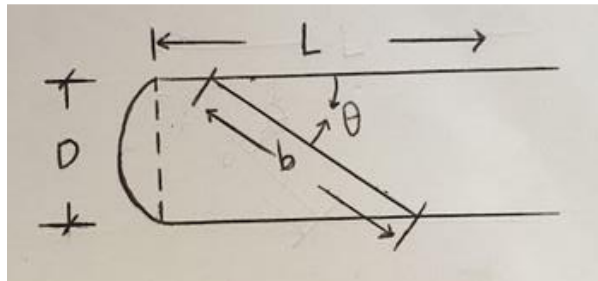
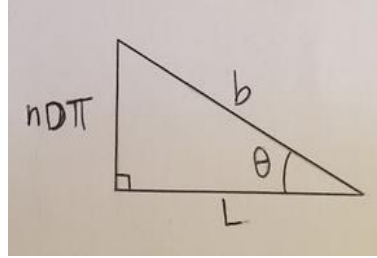


Figura 130. Triángulo recto resultante de la modelación teórica.



Del triángulo formado por una fibra de la malla y el largo y diámetro del cilindro (Figura 130) podemos expresar la longitud, L , el número de vueltas de una fibra, n , y la longitud, b , con medidas constantes.

$$L = b * \cos \theta \quad (6)$$

$$b = D * \pi * \sin \theta \quad (7)$$

El volumen del cilindro será

$$V = \frac{l}{4} * \pi * D^2 * L = \frac{b^3}{4 * \pi} * (\sin \theta)^2 * \cos \theta \quad (8)$$

Substituyendo la ecuación 8 en la ecuación 5, obtenemos

$$F = -P * \frac{dV}{dL} * \frac{d\theta}{dL} = \frac{P * b^2 * (3 * (\cos \theta)^2 - 1)}{4 * \pi} \quad (9)$$

A partir de este punto podemos escoger en términos de qué, queremos que dependa la generación máxima de fuerza del actuador: el ángulo, θ , de la malla; el diámetro, D , del tubo interno del actuador; la presión de operación, P , del actuador; y el largo, L , del actuador.

La función dependiente del ángulo, θ , de la malla externa y la presión de operación P , quedaría de la siguiente manera al sustituir la ecuación 6 en la ecuación 9

$$F(\theta, P) = \frac{P * \pi * (D * \sin \theta)^2 * (3 * (\cos \theta)^2 - 1)}{4 * \pi} \quad (10)$$

La función dependiente del diámetro, D , del tubo interno del actuador y la presión de operación P , quedaría de la siguiente manera al sustituir la ecuación 6 en la ecuación 9

$$F(D, P) = \left(\frac{P * \pi * (D * \sin \theta)^2}{4} \right) * \left(\frac{3 * L^2}{(D * \pi * \sin \theta)^2} - 1 \right) * (1/n) \quad (11)$$

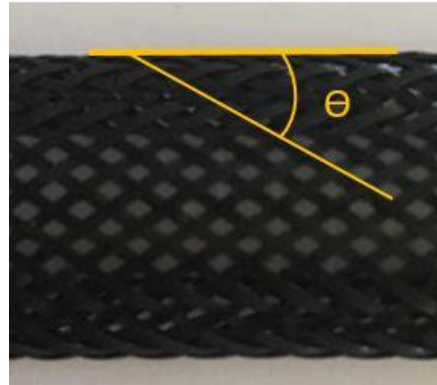
Y finalmente, conociendo la ecuación 6 y sustituyéndola en la ecuación 9, obtenemos la ecuación matemática que describe la fuerza generada por un actuador neumático flexible en función de su longitud y su presión de operación P .

$$F(L, P) = \left(\frac{P * b^2}{4 * \pi} \right) * \left(3 * \frac{L^2}{b^2} - 1 \right) * (1/n) \quad (12)$$

La ecuación 12 se utilizará como herramienta para la comprobación del modelo matemático del que derivan las ecuaciones anteriores.

Para dejar la ecuación 12 en términos de variables de diseño, es decir, que el usuario pueda definir únicamente la longitud, L , y la presión de operación, P , encontramos el valor exacto del término b , utilizando la ecuación 7. Cuando se utiliza la malla externa mostrada en la Figura 131 y conociendo que el tubo interno de silicón en uso tiene un diámetro, D , de 0.0127 m , estimando el ángulo θ de la malla a 41° , el valor de la variable, b , es de 0.02618 m . Por medio de ensayo y error, se definió el número de vueltas, n , con un valor de 100 .

Figura 131. Ángulo formado entre una fibra de la malla externa y la formada por el tubo interno.



Entonces la ecuación final para predecir la fuerza que generará un actuador neumático flexible que se estará utilizando de ahora en adelante, es la siguiente:

$$F(L, P) = \left(\frac{0.000685 * P}{4 * \pi * 100} \right) * \left(3 * \frac{L^2}{0.000685} - 1 \right) \quad (13)$$

2. **Funcionamiento del sistema de pruebas.** El sistema de pruebas utilizado para la caracterización dinámica de un actuador neumático flexible, consiste en una cámara de ensayos destructivos (Figura 132), un sistema neumático (Figura 133), un interruptor, un microcontrolador, un sensor de fuerza, un compresor y varias cargas de diferentes pesos.

Figura 132. Cámara de ensayos destructivos.

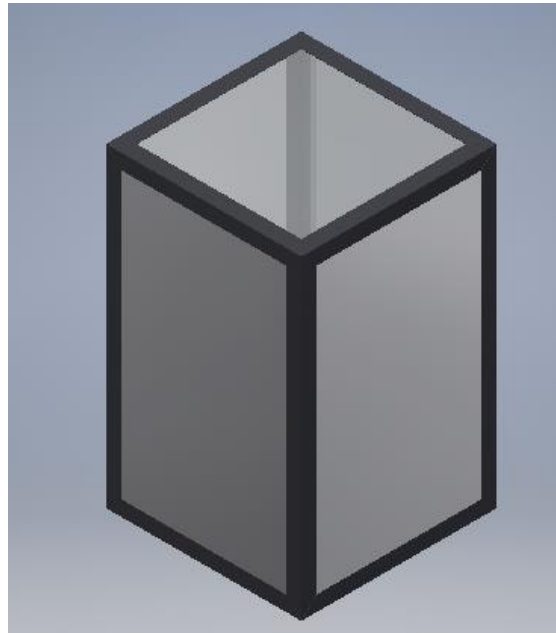
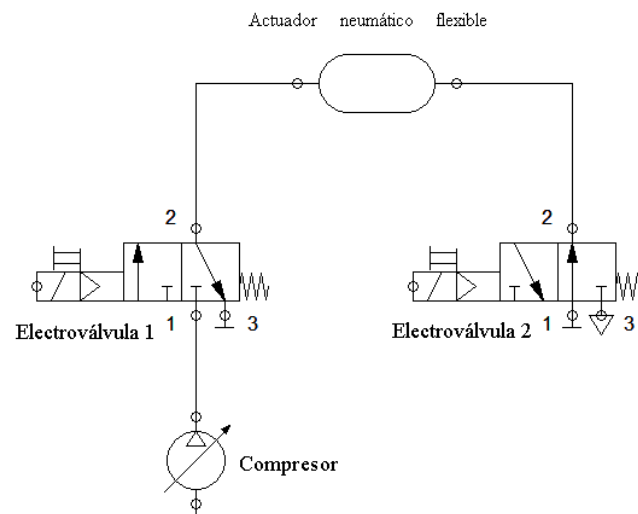


Figura 133. Sistema neumático empleado en todos los ensayos de funcionamiento.



El microcontrolador empleado es un “Adafruit METRO” que se comunica de forma serial con un computador. Un interruptor fotoeléctrico tipo *E3Z-R8I* que se encuentra adherido dentro de la cámara de ensayos destructivos (Figura 134) le envía una señal al microcontrolador cada vez que el actuador en uso, al ser activado, interrumpe un haz de luz (Figura 135).

Figura 134. Configuración del interruptor fotoeléctrico en la cámara de ensayos destructivos.

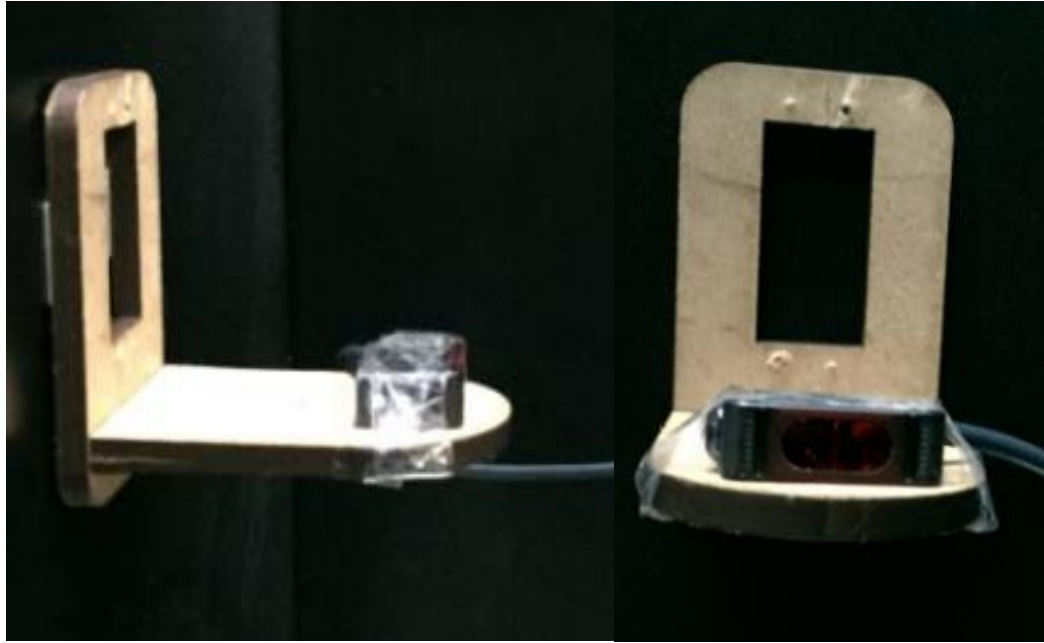


Figura 135. Sistema completo para el interruptor fotoeléctrico.



Una vez recibida esta señal, el microcontrolador guarda el tiempo de operación registrado junto con el peso, la presión de operación y la longitud del actuador. Por último, todos los datos guardados son exportados a un archivo de Excel por medio del programa de uso libre “CoolTerm”.

El sistema neumático consiste en dos electroválvulas 3 vías 2 posiciones, normalmente cerrada (figuras 134 y 135) gobernadas por el mismo microcontrolador “Adafruit METRO”. La comunicación entre estos dos componentes fue a través de los relevadores incluidos en el “Relay Shield v3.0” de la empresa SeedStudio (Figura 136) para proteger al microcontrolador de los voltajes manejados en las electroválvulas.

Figura 136. Electroválvulas empleadas para el sistema neumático.

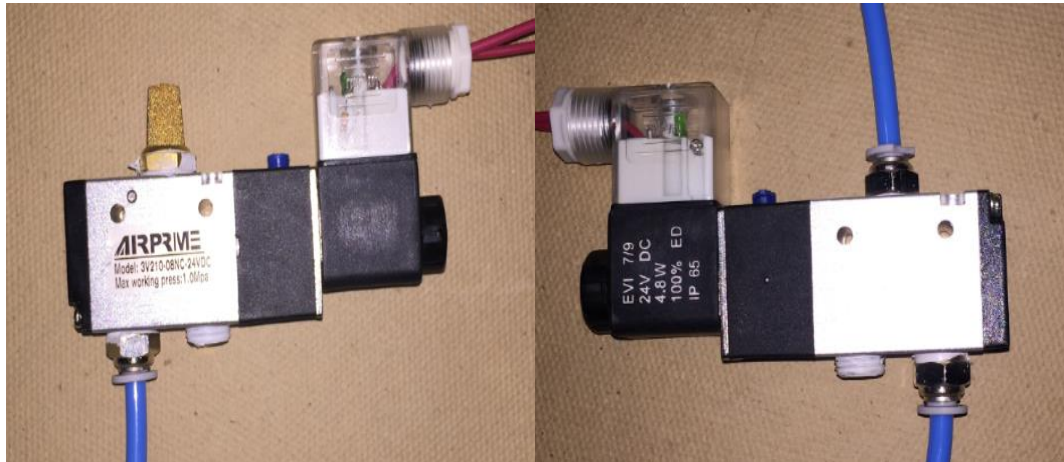


Figura 137. Escudo de relevadores para la protección del microcontrolador.



El programa escrito para el desarrollo de los tres ensayos disponibles (tiempo, carga y destructivo), se describe a grandes rasgos con los diagramas de flujo mostrados en las figuras 138, 139 y 140. Si se desea conocer a detalle el programa, consultar los anexos.

Figura 138. Lógica para los ensayos de tiempo.

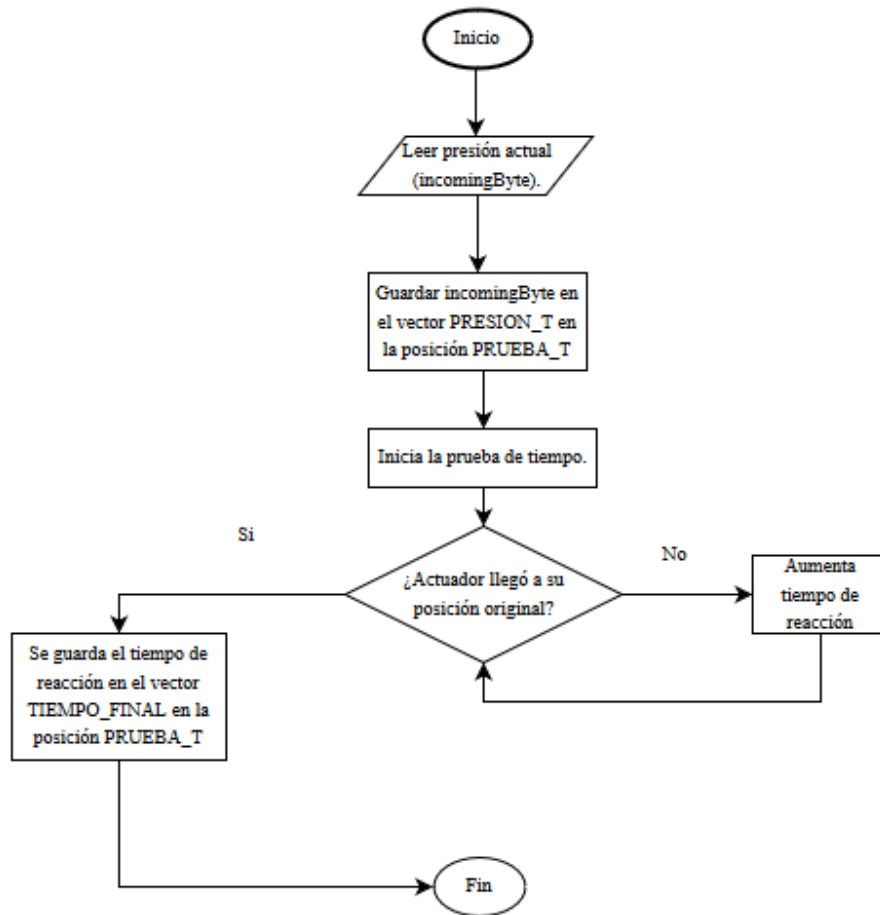


Figura 139. Lógica para los ensayos destructivos.

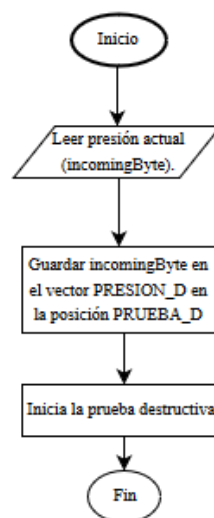
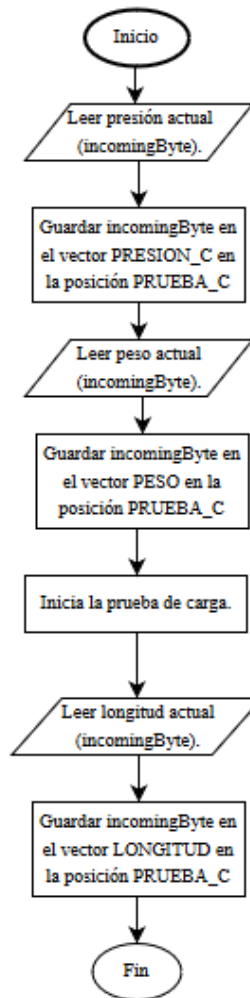


Figura 140. Lógica para los ensayos de carga.



Para las mediciones de fuerza, se utilizó un sensor de fuerza “PASCO” modelo *CI-6746*. Este sensor se comunica por medio de un conector “DIN” de 8 pines a una interfaz móvil “PASCO Xplorer GLX”.

Figura 141. Sensor de fuerza “PASCO”.



V. ANTECEDENTES

Se hicieron dos visitas al parque Xetulul de la empresa privada IRTRA, ambas guiadas por el gerente del mismo; la primera visita fue de introducción, en ella el gerente presento al grupo sus deseos de lo que buscaba del proyecto y en donde lo tenía pensado ubicar. La atracción ya es la primera en Guatemala que tiene tematizado toda el área, el arquitecto del proyecto buscó innovar y recreo el Castillo de San Felipe en ella.

Cuenta que la idea de tematizar la atracción creció y pronto estaba buscando darle movimiento a los personajes que habitaban el área; el gerente en sus viajes a otros países vino con la intención de innovar con animatrónicos en el parque, específicamente para el Castillo de San Felipe. Debido al alto precio de esta tendencia actualmente en el mercado, busco otros caminos y acudió a la Universidad Del Valle de Guatemala.

Se identificó el área y salieron varias propuestas de él en el momento, aunque nosotros llevábamos ya la intención de hacer un estudio de mercado para que no fuéramos nosotros ni el gerente el que decidiera que les gustaba, sino que fueran los mismos usuarios del juego los que decidieran que es lo que más les atrae.

Se hizo un informe del estudio de mercado y se empezó con las propuestas que salieron del mismo para empezar con el objetivo de crear un animatrónico; las propuestas debían ser presentadas con un presupuesto con cotizaciones del mercado en Guatemala.

La segunda visita fue la presentación a el gerente de Xetulul y sus ingenieros mecánicos y eléctricos del parque para que estos en base a sus experiencias dijeran su opinión acerca de las propuestas y que puntos mejorarían o cambiarían; para luego ellos presentaran las propuestas en la reunión gerencial y nos dieran una respuesta concreta sobre lo presentado anteriormente.

La propuesta del pirata animatrónico se quedó como un prototipo para la Universidad, para empezar a dejar una base sólida de esta tecnología para que las demás generaciones la mejoren y desarrollen nuevas ideas

La colaboración IRTRA y Universidad Del Valle abre las puertas a Guatemala para que este empiece a desarrollar tecnologías que son tendencias en el mercado y así crecer económicamente y tecnológicamente posicionarnos.

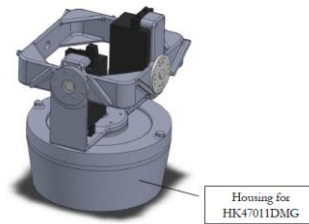
A. CABEZAS ANIMATRÓNICAS/ROBÓTICAS

En la actualidad la robótica y la animatrónica son disciplinas que se han desarrollado de una manera exponencial. Día a día surgen nuevos proyectos con este tipo de enfoque, que enriquecen las fuentes de

información disponible para todo aquel que quiera iniciar un proyecto de esta índole. A continuación, se muestran proyectos que brindaron un marco de referencia para el diseño y construcción del animatrónico.

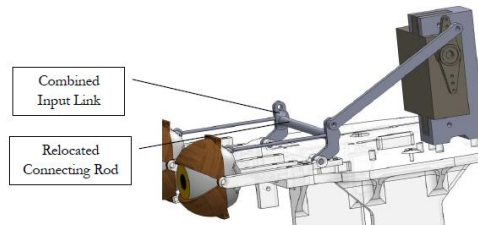
1. Cabeza animatrónica desarrollada por la Worcester Polytechnic Institute. Este proyecto tuvo como objetivo diseñar una cabeza animatrónica que fuera programada utilizando reconocimiento facial. El proyecto fue desarrollado por estudiantes de la Worcester Polytechnic Institute. Los estudiantes desarrollaron por completo los mecanismos del animatrónico, los cuales se muestran a continuación.

Figura 143. Mecanismo utilizado para la movilización del cuello.



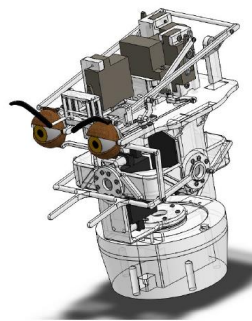
(Fitzpatrick, 2010)

Figura 144. Mecanismo en el cuello utilizado.



(Fitzpatrick, 2010)

Figura 145. Ensamblaje final.

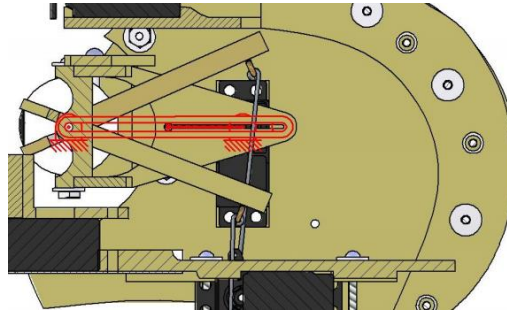


(Fitzpatrick, 2010)

2. Cabeza animatrónica desarrollada por la Universidad de San Buenaventura.

Proyecto realizado por estudiantes de la Universidad de San Buenaventura de Bogotá, que tuvo como objetivo principal construir un animatrónico de movimiento facial.

Figura 146. Mecanismo utilizado para movilizar el ojo.



(Hernández, Universidad de San Buenaventura, 2007)

Figura 147. Proceso de construcción de la máscara del animatrónico.



(Hernández, Universidad de San Buenaventura, 2007).

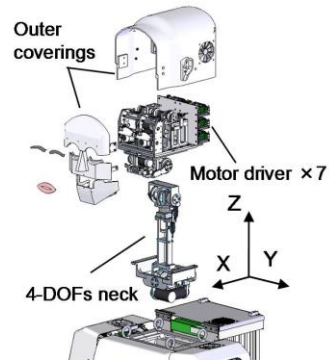
3. Kobian. Kobian es un robot que es capaz de expresar hasta siete emociones. Kobian fue desarrollado en la Universidad japonesa de Waseda.

Figura 148. Robot Kobian.



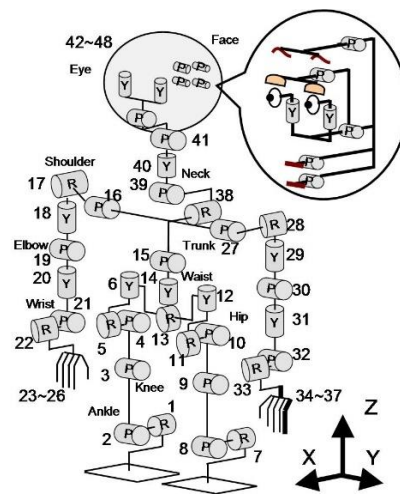
(Takanishi Laboratory, 2010)

Figura 149. Robot Kobian.



(Takanishi Laboratory, 2010)

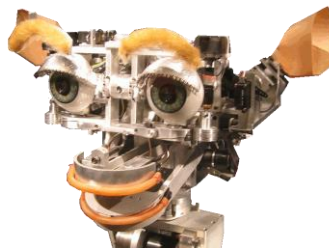
Figura 150. Grados de libertad del robot Kosbian.



(Takanishi Laboratory, 2010)

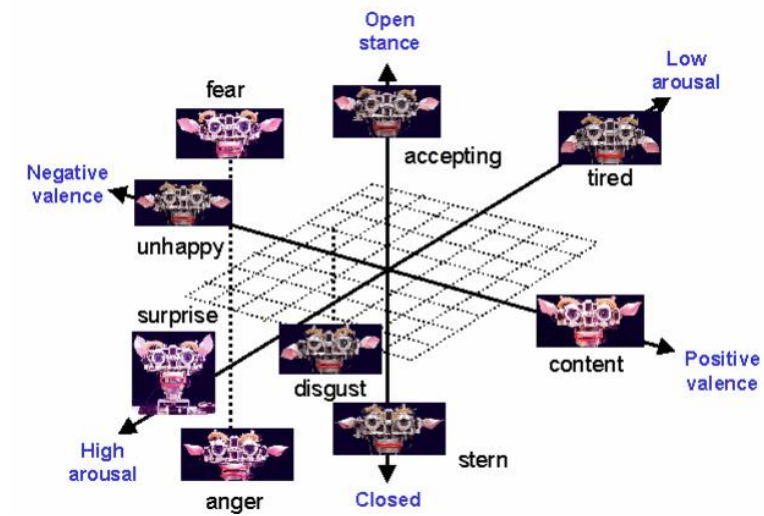
4. **Kismet.** Kismet es un robot que solo posee cabeza, creado por la Dr. Cynthia Breazeal en el Instituto de Massachusetts de Tecnología (MIT). El robot fue creado para simular con el mayor realismo posible emociones humanas.

Figura 151. Robot Kismet.



(Tena, Universidad de Cádiz, 2006)

Figura 152. Algunas emociones transmitidas con el robot Kismet.



(Tena, Universidad de Cádiz, 2006)

5. Cabeza animatrónica diseñada en la University of Skövde. Este fue un proyecto que involucró el diseño de mecanismos para el cuello y movimiento de los ojos, desarrollado por Ana Ortiz como trabajo de graduación.

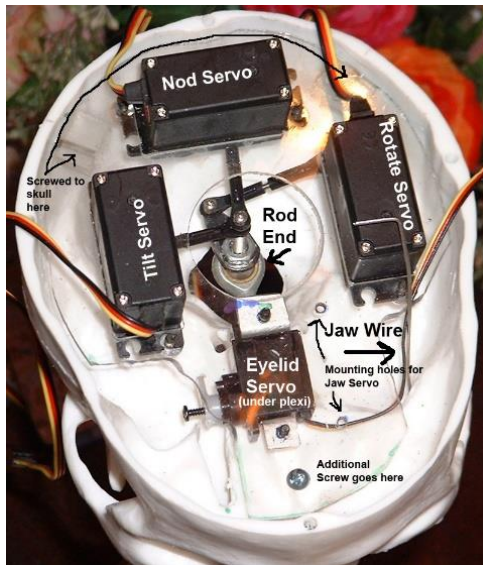
Figura 153. Mecanismo de cuello y ojos luego de ser ensamblados.



(Lanzagorta, 2012)

6. **3 Axis Skull.** Existen varias fuentes en internet acerca de cómo construir una calavera con movimiento en el cuello y la boca. La más conocida es la “3 Axis Skull”. Incluso existen varios sitios en donde se pueden adquirir estas calaveras por un precio aproximado de \$400.³

Figura 154. Construcción de una 3 Axis Skull.



(Rewindshow, 2016)

Figura 155. Calaveras animatrónicas.



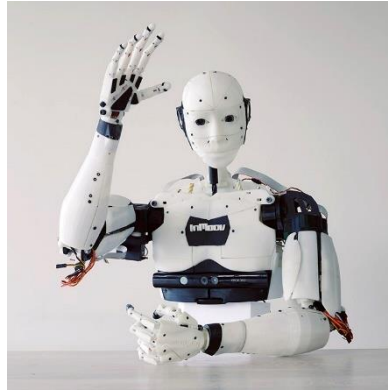
(Rewindshow, 2016)

7. **InMoov.** InMoov es un animatrónico open-source diseñado por Gael Langevin. El proyecto ofrece todos los archivos stl para que cualquier persona pueda descargarlos y fabricarlos con ayuda de una impresora 3D.

³ Dato obtenido de <http://www.monsterguts.com/store/home.php?cat=272>

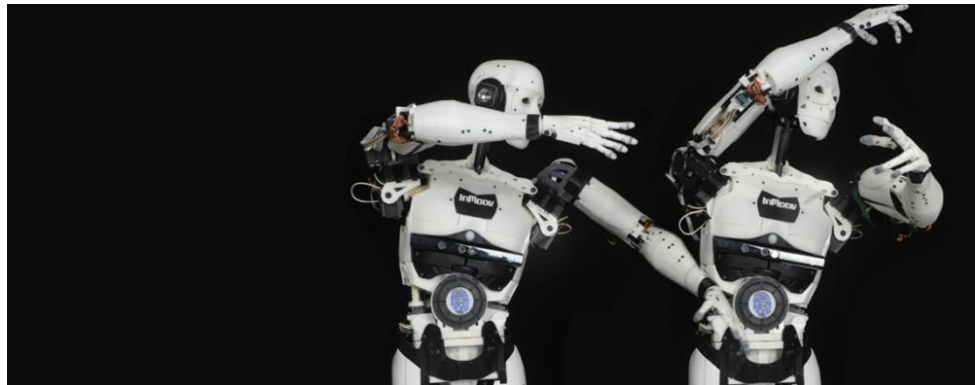
En la página oficial del proyecto también se pueden encontrar los controladores y motores recomendados a utilizar por parte del fabricante. Cabe destacar que las piezas fueron diseñadas para ser ensambladas y movilizadas con los motores elegidos por Gael Langevin.

Figura 156. InMoov.



(Langevin, 2016)

Figura 157. InMoov.



(Langevin, 2016)

B. OTROS PROYECTOS

Existen varios proyectos y sitios web en los que varios usuarios ofrecen diseños realizados por ellos mismos en lo que se refiere a animatrónicos. A continuación, se muestran algunos de ellos.

Figura 158. Mecanismo de ojos diseñado por el usuario Micropuller de Thingiverse. ⁴

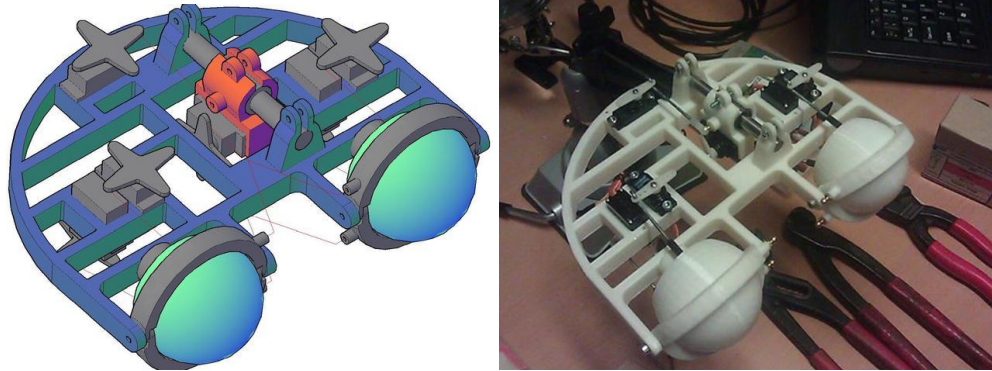


Figura 159. Mecanismo de ojos diseñado por Polymaker_3D, usuario de thigiverse. ⁵

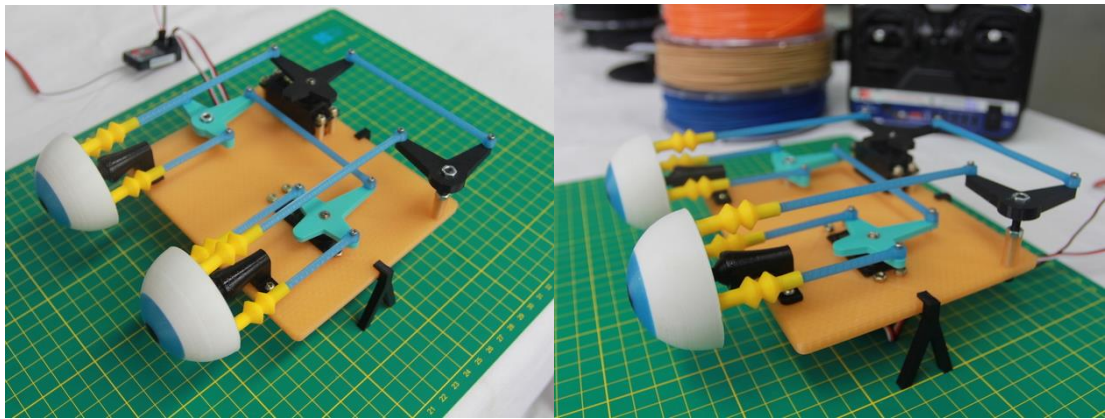
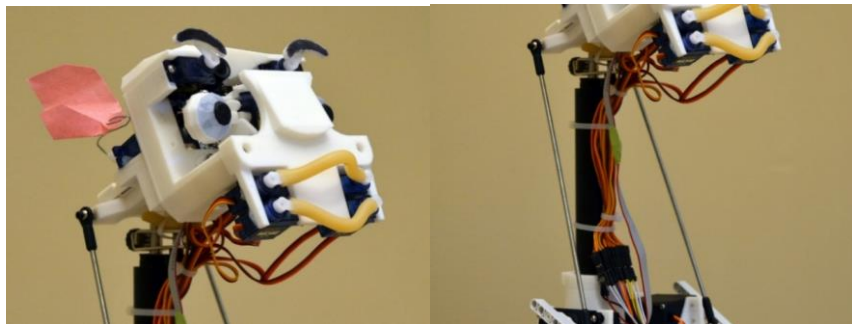


Figura 160. Robot emocional diseñado por el usuario [cjwu382](https://www.thingiverse.com/cjwu382) de Thingiverse. ⁶



⁴ Imagen obtenida de http://thingiverse-production-new.s3.amazonaws.com/renderers/82/4e/50/2d/9e/Animatronic_eye_model_preview_featured.jpg

⁵ Imagen obtenida de http://thingiverse-production-new.s3.amazonaws.com/renderers/dc/ac/19/10/88/IMG_4616_preview_featured.JPG

⁶ Imagen obtenida de <http://www.thingiverse.com/thing:384962>

Figura 161. Mecanismo de cuello diseñado por James Bruton.⁷



⁷ Imagen obtenida de <http://i0.wp.com/www.xrobots.co.uk/johnny5/YT03.jpg?resize=350%2C213>

VI. MÓDULO CALAVERA ANIMATRÓNICA

A. RESUMEN

Un animatrónico es toda máquina que emule el comportamiento de un ser viviente real o imaginario. El objetivo del megaproyecto del cual forma parte el módulo presentado en este trabajo es diseñar, fabricar e implementar animatrónicos con un costo menor a su precio de venta. El objetivo de este módulo de trabajo fue construir un animatrónico que imite el comportamiento de una calavera encerrada en un cofre pirata. Es menester indicar que el animatrónico se diseñó para una atracción del parque temático Xetulul, inspirada en el Castillo de San Felipe, un sitio turístico ubicado en el departamento Izabal, Guatemala. Para cumplir con el objetivo del proyecto se trabajó en tres áreas fundamentales: la mecánica del animatrónico, su etapa de alimentación y el control de los actuadores del animatrónico. En el área mecánica se diseñaron los mecanismos adecuados para representar los movimientos deseados en el animatrónico con los actuadores elegidos, para finalmente obtener un conjunto de mecanismos que en conjunto representan los movimientos de una calavera encerrada en un cofre pirata. En la etapa de alimentación se seleccionó la fuente de alimentación adecuada para todos los componentes del sistema, asegurando su correcto funcionamiento en todo momento; también formó parte importante de esta etapa el aislamiento de señales de potencia y señales de control para los actuadores del sistema. En el sub módulo de control se seleccionaron los componentes adecuados para manipular los actuadores del sistema, se programaron los controladores escogidos y se diseñaron trayectorias adecuadas para representar el movimiento de una calavera encerrada en un cofre. Finalmente fue necesario una etapa de acoplamiento entre los distintos sub módulos del proyecto, para obtener un animatrónico que imite una calavera encerrada en un cofre pirata. En la Figura 162 se muestra una fotografía del animatrónico terminado, sin haber sido tematizado.

Figura 162. Fotografía del animatrónico terminado.



B. INTRODUCCIÓN

Un animatrónico es toda máquina que emule el comportamiento de un ser viviente real o imaginario. La gama de seres que han sido representados en animatrónicos a través de la historia es muy grande. Existen animatrónicos que representan distintos animales, personajes históricos y de alguna película famosa, seres fantásticos e incluso mascotas o insignias de alguna marca. Por lo general un animatrónico cumple la función de entretener a los visitantes de algún sitio temático, como un restaurante o un parque, por lo que el animatrónico representa algún personaje acorde al ambiente en el que se encuentre. La complejidad y cantidad de movimientos del animatrónico dependerá de lo que se quiera representar y el realismo que se le desee impregnar. Este tipo de atracciones son ideales para sitios temáticos, ya que llaman la atención de la mayoría de personas y logran desarrollar una experiencia completa en los visitantes del sitio en el que se encuentre instalados.

Hoy en día la instalación de animatrónicos es una apuesta muy común, y existen compañías dedicadas únicamente al desarrollo de animatrónicos. La empresa más famosa dedicada al desarrollo de animatrónicos es Garner Holt Productions, uno de los principales distribuidores de los parques de Disney y Universal. En la Figura 163 se muestra a Garner Holt, fundador de Garner Holt Productions, con uno de los animatrónicos desarrollados por su empresa. Este tipo de industrias realizan animatrónicos con un realismo bastante grande, y la inversión que representa un animatrónico desarrollada por estas compañías beneficia a los grandes parques.

Figura 163. Garner Holt con un animatrónico desarrollado por Garner Holt Productions.



(WiseGeek, 2016)

Para parques más con menor presupuesto es imposible realizar una inversión en un animatrónico desarrollado por este tipo de compañías, por lo que buscan alternativas de menor precio. Garner Holt Productions desarrolla un animatrónico sencillo que imita a un pájaro parlanchín, cuyo precio asciende a \$12000⁸, cifras que hacen imposible la inversión de muchos compradores en grandes atracciones. Existen distribuidores de animatrónicos de segunda mano, que ofrecen precios razonables para las atracciones, tomando en cuenta el uso que ha adquirido la atracción.

El elevado precio de este tipo de atracciones tiene varias razones. El número de empresas dedicadas a este tipo de atracciones es limitado, por lo que no existen una variedad de opciones para las entidades que quieran adquirir un animatrónico. No obstante, existen desarrolladores de menor prestigio, como industrias de origen asiático, que ofrecen precios bastante cómodos para los compradores, sin embargo, la calidad de los animatrónicos no es la misma que la de los desarrollados por otras empresas.

Así mismo, abordando el problema desde otra perspectiva, manejar una compañía dedicada al desarrollo de animatrónicos se enfrenta a la venta de atracciones que tienen como cliente a un mercado reducido. El tiempo invertido en el desarrollo de este tipo de atracciones, la especialización de las personas dedicadas a su fabricación e instalación, la personalización de la máquina dependiendo del lugar en el que se vaya a encontrar y el número de clientes para este producto produce que este tipo de negocios no puedan ser rentables. Esta serie de factores son otra de las razones por las cuales las industrias manejan precios elevados para los animatrónicos.

Este problema es el que busca abordar el proyecto que se presentará a continuación. Xetulul es un parque temático perteneciente al Instituto de Recreación de los Trabajadores (IRTRA). El parque se caracteriza por brindarle una experiencia única en Guatemala a todos sus visitantes. El parque no tiene un tema en específico, ya que se encuentra tematizado con una gran variedad de tramas. Existen sectores inspirados en países de Europa, secciones con temática maya y algunos otros temas. El parque cuenta con una división que tiene atracciones inspiradas en una temática pirata, y el parque desea completar la experiencia con la incursión de animatrónicos. En esta parte del parque se encuentra una atracción inspirada en el Castillo de San Felipe, un sitio turístico ubicado en Izabal, Guatemala. El juego consiste en abordar un barco pirata, acompañado de otros tripulantes, y lanzar agua a otros barcos que se encuentren en el juego, procurando evitar ser mojado por otros barcos. En el tiempo en el que uno espera para poder ingresar a la atracción las personas recorren el interior del castillo, con algunos elementos piratas que hacen la experiencia del visitante más completa. En la Figura 164 se muestra el juego descrito anteriormente.

⁸ Dato obtenido de: <http://www.themeparktourist.com/news/20110929/4831/disney-animatronics-supplier-garner-holt-launches-new-product-line>

Figura 164. Atracción inspirada en el Castillo de San Felipe ubicada en Xetulul.



El parque desea instalar un animatrónico en el interior del castillo, por lo que en este punto es donde entra en juego este proyecto concretamente. El objetivo del proyecto es desarrollar un animatrónico de bajo costo para el parque temático Xetulul, que se encontrará instalado en el interior del castillo, e imitará a una calavera atrapada en un cofre pirata.

C. OBJETIVOS

1. General

- Diseñar, fabricar e implementar animatrónicos con un costo menor a su precio de venta.

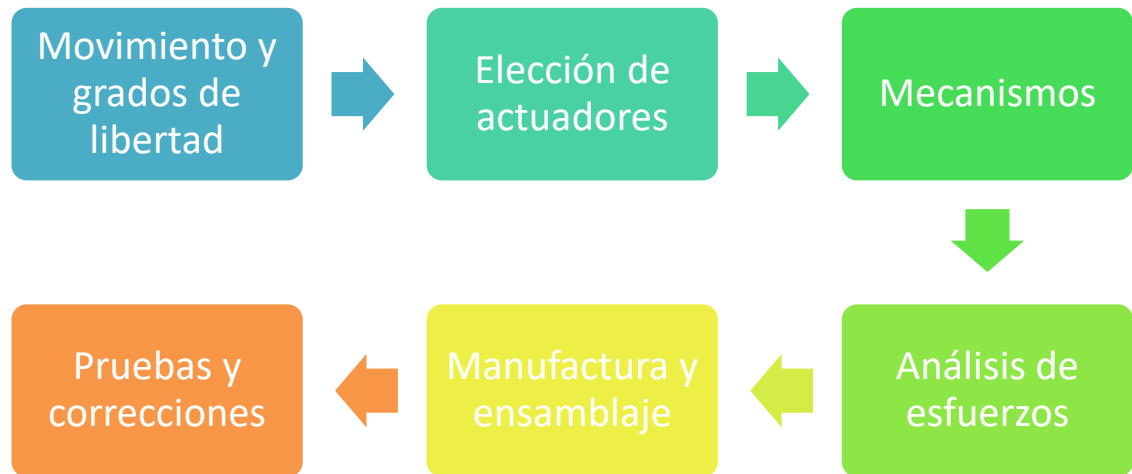
2. Específicos

- Diseñar, fabricar e implementar mecanismos que imiten los movimientos principales de una cabeza humana, siendo estos el movimiento de ojos, boca y cuello.
- Diseñar, fabricar e implementar un mecanismo capaz de emular la apertura/cierre de un cofre pirata.
- Diseñar, fabricar e implementar un mecanismo capaz de realizar la salida/entrada de la calavera animatrónica diseñada e implementada a un cofre pirata.
- Diseñar e implementar un sistema de control capaz controlar los mecanismos de la calavera animatrónico y los elementos que acompañan al animatrónico.
- Diseñar e implementar un sistema de potencia capaz de alimentar los actuadores de los mecanismos de la calavera animatrónico y los elementos que la acompañan, así como los elementos del sistema de control para los mecanismos.

D. MECÁNICA

1. **Metodología.** Este sub módulo del proyecto se enfocó en realizar todo lo relacionado con la mecánica del animatrónico. En el siguiente diagrama se puede observar el flujo de trabajo trazado para este sub módulo y las tareas a desarrollar.

Figura 165. Metodología utilizada en el sub módulo de la parte mecánica del animatrónico.



2. **Movimientos y grados de libertad.** Antes de diseñar la parte mecánica del proyecto, es necesario determinar los movimientos que serán representados en el animatrónico, y así establecer los grados de libertad de los mecanismos a utilizar. La elección de movimientos se realizó procurando mantener un costo reducido en la fabricación del animatrónico, sin descuidar el realismo que se desea impregnar en el animatrónico, ya que hay que tomar en cuenta que la principal función del animatrónico es entretener a los visitantes del parque.

Se realizó un estudio sobre animatrónicos existentes que tuvieran una temática pirata, para poder obtener una idea de la meta que se trazaría y realizar una propuesta a los dirigentes del parque temático Xetulul.

En los siguientes links se colocan los animatrónicos que se tomaron como referencia para la elección de movimientos del animatrónico a realizar:

- https://www.youtube.com/watch?v=jGKpl6v_UEs
- <https://www.youtube.com/watch?v=02EXBGUsiXg>
- <https://www.youtube.com/watch?v=JRUF1tsjrvq>
- <https://www.youtube.com/watch?v=xrxXP-7EBq8>

Figura 166. Calavera animatrónica desarrollada por SkullTroniX.

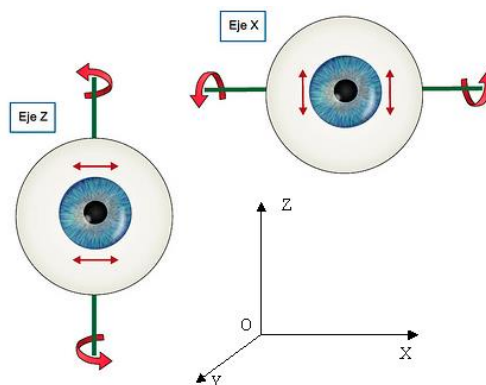


(WiseGeek, 2016)

a. **Movimiento de ojos.** Los grados de libertad del mecanismo para los ojos fueron determinados con base a los tipos de movimiento profundizados en el marco teórico. El ojo humano puede moverse en todas las direcciones respecto a un punto fijo, gracias a diferentes músculos. Una calavera solo posee parte ósea, por lo que carece de músculos, no obstante, se decidió colocar movimiento de ojos para aumentar la atracción en los visitantes del parque.

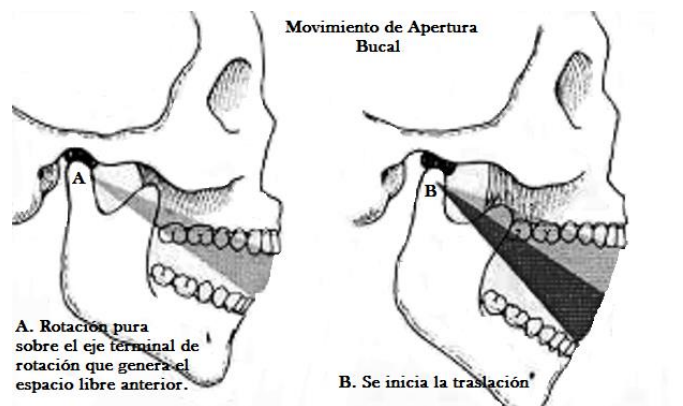
Se decidió colocar dos grados de libertad para el movimiento de ojos, ya que este permite la representación de una gran gama de movimientos de los ojos desarrollados en el marco teórico. En la Figura 167 se muestra el movimiento a representar con los ojos del animatrónico. Se decidió que el movimiento de los ojos sería independiente entre ambos ojos, para poder brindar un mayor realismo a muchos de los movimientos a realizar. Además, debido a que se construirá una calavera, la independencia de movimiento en los ojos permite la creación de rutinas que reflejen locura en los ojos del animatrónico, situación adecuada para la temática de la atracción.

Figura 167. Grados de libertad para cada ojo del animatrónico.



b. **Movimiento de boca.** Como se mencionó en la elección de movimientos oculares, una calavera no posee músculos, por lo que no es necesario el planteamiento de movimiento de labios. Únicamente es necesario realizar movimiento en la mandíbula de la calavera. La mandíbula tiene una articulación temporomandibular que le permite realizar cuatro tipos de movimientos. Luego de observar los distintos animatrónicos existentes de calaveras, se determinó que únicamente se colocaría el movimiento de apertura y cierre de mandíbula al animatrónico. En otras palabras, la boca tendría un grado de libertad.

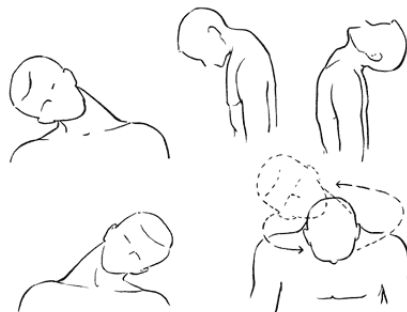
Figura 168. Movimientos de apertura y cierre de mandíbula.



(Sánchez J. , 2012)

c. **Movimiento de cuello.** El cuello humano cuenta con tres articulaciones en las vértebras cervicales que permiten el movimiento del cuello. El movimiento del cuello es un factor clave en el realismo del animatrónico. Se decidió colocar tres grados de libertad en el movimiento del cuello del animatrónico. Los tres grados de libertad le permiten al cuello realizar una rotación respecto a los tres ejes del marco de referencia del cuello, es decir, el animatrónico será capaz de girar respecto a cada uno de los ejes en el cuello. Los movimientos que se podrán representar con los grados de libertad elegidos son flexión, extensión, rotación e inclinación.

Figura 169. Movimientos a representar en el cuello del animatrónico.



(Sánchez J. , 2012)

d. **Movimiento del cofre.** Se decidió colocar dos grados de libertad en la apertura del cofre. Se tomó esta decisión para que el movimiento de apertura del cofre sea independiente a la salida de la calavera del mismo. En otras palabras, se construirá un mecanismo para abrir/cerrar el cofre y otro mecanismo para subir la calavera.

Figura 170. Movimiento de apertura/cierra del cofre.



3. **Elección de actuadores.** La elección de los actuadores que se encargarán de realizar el movimiento del animatrónico es un paso esencial en la realización del mismo. Con base a los actuadores se realizará el diseño de las piezas de los diferentes mecanismos, se elegirá la fuente de poder adecuada según los requerimientos de potencia de los actuadores, y se elegirá el controlador adecuado para realizar las trayectorias de movimiento. En primera instancia es necesario elegir el tipo de actuador a utilizar. En la siguiente Cuadro se muestra el estudio de caso de la elección de actuadores, según las necesidades del proyecto. El costo es un aspecto muy importante a tomar en cuenta, ya que uno de los objetivos principales del proyecto es desarrollar alternativas de bajo costo para la construcción de un animatrónico, por eso se le pondero con 0,25 de 1. El mantenimiento es un aspecto muy importante, ya que determinará la facilidad con que las piezas pueden ser cambiadas, el período de vida que tendrán los actuadores y la frecuencia con la que deben ser cambiadas las partes de los mecanismos del animatrónico. La instalación y ensamblaje hace referencia a la facilidad de acoplar los actuadores a una estructura y el costo de las piezas necesarias para el mismo. La alimentación enfatiza en los materiales y máquinas necesarias para el funcionamiento del actuador. En el caso de actuadores neumáticos hará referencia al compresor necesario para el funcionamiento de los pistones, por mencionar un ejemplo. Fuerza hace referencia a la capacidad que tienen los actuadores en el sentido de soportar una carga. Finalmente, control enfatiza en los materiales y controladores requeridos para manejar el actuador, su costo y facilidad de uso. Todos los aspectos ponderados en el estudio de caso se basaron en la investigación realizada en el marco teórico respecto a los tipos de actuadores.

Cuadro 13. Estudio de caso de elección de actuadores.

Se califica cada uno de los aspectos en una escala de 1-10 para cada actuador, y la calificación se multiplica por la ponderación de importancia de cada aspecto, que varía de 0-1 según su importancia, y se encuentra indicada entre un paréntesis.

Tipo de actuador	Costo (0.25)	Mantenimiento (0.2)	Instalación y ensamblaje (0.2)	Alimentación (0.2)	Control (0.1)	Fuerza - Torque (0.4)	Total
Eléctrico	9	10	7	10	9	7	8.9
Neumático	7	6	8	8	9	10	7.75
Hidráulico	7	5	8	8	9	10	7.75

Tomando como referencia el estudio de caso realizado, se eligió utilizar actuadores eléctricos para todos los movimientos del animatrónico. Existen una gran variedad de motores en el mercado, y la forma de manejar cada uno de ellos varía según su modelo y tipo de motor. Debido a que la necesidad de cada mecanismo es distinta, es imposible realizar una sola selección de un motor específico para todos los mecanismos del animatrónico, por lo que a continuación se detalla la elección de actuadores por movimiento.

a. **Movimiento de ojos.** Los ojos tienen dos grados de libertad por cada ojo, por lo que se requieren cuatro actuadores para el movimiento de los ojos. En la siguiente Cuadro se muestra el estudio de caso realizado para la elección de motores para el mecanismo de los ojos. Es muy importante su tamaño, ya que el espacio dentro del cráneo es bastante reducido. Así mismo su facilidad de montaje y ensamblaje determinarán la complejidad del mecanismo a realizar, por lo que es un aspecto a tomar en cuenta. Los demás aspectos ya fueron explicados con anterioridad, en la elección de tipo de actuadores. Las características de los motores presentados en el estudio de caso se muestran a detalle en el Anexo A, Anexo B y Anexo C.

Cuadro 14. Estudio de caso de elección de motores para el movimiento de ojos

Se califica cada uno de los aspectos en una escala de 1-10 para cada actuador, y la calificación se multiplica por la ponderación de importancia de cada aspecto, que varía de 0-1 según su importancia, y se encuentra indicada entre un paréntesis.

Motor	Costo (0,2)	Tamaño y peso (0,3)	Instalación y ensamblaje (0,2)	Alimentación (0,2)	Control (0,05)	Fuerza - Torque (0,4)	Total
Tower Pro Micro Servo	10	10	9	10	9	7	9.6
Tower Pro MG995	9	5	8	10	9	10	7.85
MABUC HI DC motor	7	9	7	10	8	9	8.35

Por tanto, se decidieron utilizar micro servos para realizar el movimiento de los ojos. Con base a esta decisión se pudieron diseñar las diferentes pizas del mecanismo de los ojos, así como de las otras etapas del proyecto, como la de potencia.

b. **Movimiento de boca.** La boca únicamente tiene un grado de libertad, por lo que únicamente es requerido un actuador para realizar el movimiento. Nuevamente se realizó un estudio de caso para seleccionar los motores. Los aspectos a evaluar fueron los mismos que en el caso de los ojos, sin embargo, por las necesidades del movimiento se realizó el estudio con diferentes actuadores. Las características de los motores presentados en el estudio de caso se muestran a detalle en el Anexo D, Anexo B, Anexo E y Anexo F.

Cuadro 15. Estudio de caso de elección de motores para el movimiento de boca.

Se califica cada uno de los aspectos en una escala de 1-10 para cada actuador, y la calificación se multiplica por la ponderación de importancia de cada aspecto, que varía de 0-1 según su importancia, y se encuentra indicada entre un paréntesis.

Motor	Costo (0.2)	Tamaño y peso (0.3)	Instalación y ensamblaje (0.2)	Alimentación (0.2)	Control (0.05)	Fuerza - Torque (0.4)	Total
HK 15268A	10	10	9	10	9	8	9.65
Tower Pro MG995	9	8	9	10	9	9	8.9
Nextrox DC Motor	7	8	7	10	8	9	8.05
Nema 17 Stepper Motor	7	5	7	10	7	10	7.15

Por tanto, se decidieron utilizar motores HK 15268A para realizar el movimiento de la boca. Con base a esta decisión se pudieron diseñar las diferentes pizas del mecanismo de la boca, así como de las otras etapas del proyecto, como la de potencia.

c. **Movimiento de cuello.** El cuello tiene tres grados de libertad, por lo que fue necesario la elección de tres actuadores para realizar los movimientos. En el cuadro se muestra el estudio de caso para la elección de actuadores del cuello. Los aspectos a evaluar fueron los mismos que en el caso de los ojos y la boca, sin embargo, por las necesidades del movimiento se realizó el estudio con diferentes actuadores. Las características de los motores presentados en el estudio de caso se muestran a detalle en el Anexo D, Anexo B, Anexo E y Anexo F.

Cuadro 16. Estudio de caso de elección de motores para el movimiento de cuello.

Se califica cada uno de los aspectos en una escala de 1-10 para cada actuador, y la calificación se multiplica por la ponderación de importancia de cada aspecto, que varía de 0-1 según su importancia, y se encuentra indicada entre un paréntesis.

Motor	Costo (0.2)	Tamaño y peso (0.3)	Instalación y ensamblaje (0.2)	Alimentación (0.2)	Control (0.05)	Fuerza Torque (0.05)	Total
HK 15268A	10	10	9	10	9	5	9.4
Tower Pro MG995	9	10	9	10	9	9	9.5
Nextrox DC Motor	7	9	7	10	8	9	8.35
Nema 17 Stepper Motor	7	6	7	10	7	10	7.45

Para este caso se decidió utilizar dos tipos de motores para realizar los distintos movimientos. Se decidió utilizar los servos Tower Pro MG995 para el movimiento respecto a los ejes x y, ya que son los que demandan mayor torque, y un HK 15258A para el movimiento de giro respecto al eje z.

d. **Movimiento de cofre.** En el movimiento del cofre se necesitan dos grados de libertad, uno para levantar la tapadera del cofre, y otro para levantar la calavera. En el Cuadro 17 se muestra el estudio de caso para la elección de actuadores del cofre. Los aspectos a evaluar fueron los mismos que en el caso de los ojos, la boca y cuello, sin embargo, por las necesidades del movimiento se realizó el estudio con diferentes actuadores. El estudio difiere respecto a los anteriores en el sentido de que la fuerza de los motores toma mayor relevancia, ya que el peso a soportar es mayor. Las características de los motores presentados en el estudio de caso se muestran a detalle en el Anexo D, Anexo B, Anexo E y Anexo F.

Cuadro 17. Estudio de caso de elección de motores para el movimiento de cofre.

Se califica cada uno de los aspectos en una escala de 1-10 para cada actuador, y la calificación se multiplica por la ponderación de importancia de cada aspecto, que varía de 0-1 según su importancia, y se encuentra indicada entre un paréntesis.

Motor	Costo (0.2)	Tamaño y peso (0.05)	Instalación y ensamblaje (0.1)	Alimentación (0.2)	Control (0.05)	Fuerza - Torque (0.4)	Total
HK 15268A	10	10	9	10	9	4	7.05
Tower Pro MG995	9	10	9	10	9	6	8.05
Nextrox DC Motor	7	9	7	10	8	6	7.35
Nema 17 Stepper Motor	7	6	7	10	7	10	8.75

En este caso de estudio se ve reflejado que la elección adecuada es el Nema 17 Stepper Motor. No obstante, por su costo se decidió desechar esta opción. Por tanto, se decidió utilizar cuatro servos motores

MG995 en paralelo para la apertura del cofre y otros cuatro en paralelo para levantar la calavera, y así compensar el torque ofrecido por los actuadores.

4. Mecanismos

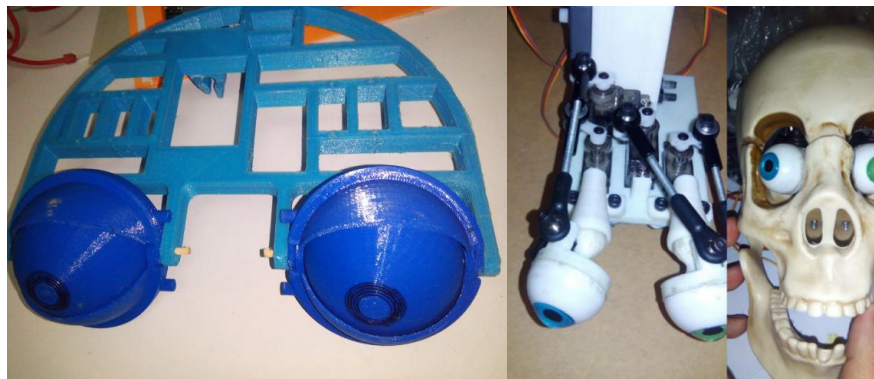
a. **Calavera a utilizar.** Antes de iniciar el diseño de cualquier mecanismo fue necesario determinar y adquirir o construir la calavera a la que le brindaría el movimiento. Para facilitar el desarrollo del proyecto se compró una calavera de cuatro piezas en Amazon, la cual se muestra en las siguientes ilustraciones. La calavera tiene las siguientes dimensiones: 8" x 5.25" x 7.5"

Figura 171. Calavera utilizada como base para el proyecto.



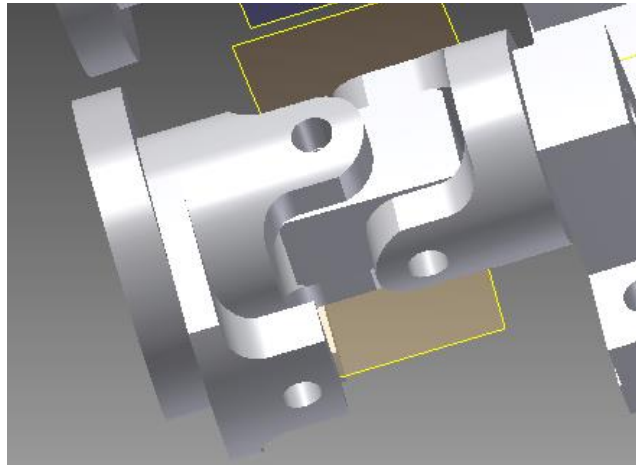
b. **Mecanismo de los ojos y boca.** Se decidió colocar en el mismo mecanismo las piezas para brindar movimiento a los ojos y a la boca. El diseño del mecanismo de los ojos estuvo basado en distintos modelos mencionados en los antecedentes del proyecto. Antes de llegar a un diseño final para el mecanismo de los ojos, se realizaron varias pruebas de mecanismos existentes.

Figura 172. Pruebas realizadas de diseños existentes de mecanismos de ojos.



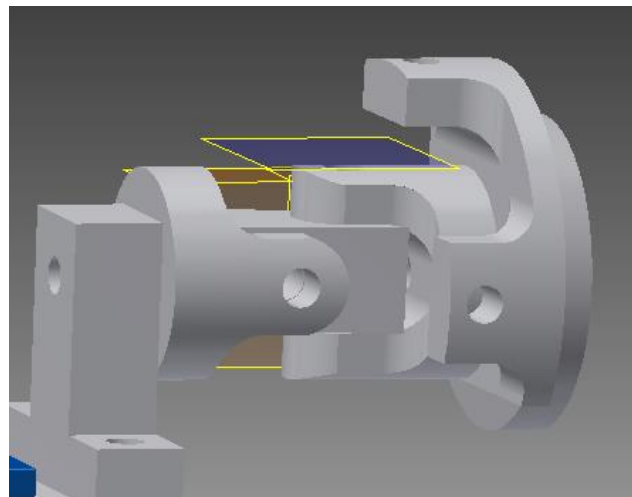
La realización de pruebas de mecanismos existentes ayudó a determinar la forma y el tipo de uniones a utilizar en el diseño final. Para realizar la movilización de los ojos se utilizó una unión universal, para poder brindar movilidad respecto a dos ejes de giro.

Figura 173. Unión universal utilizada para movilizar los ojos.



En la pieza en la que se encontrará el ojo se diseñaron dos orificios en los cuales se pudiera realizar una fuerza para provocar el movimiento del ojo. De esta manera la parte restante del diseño correspondería a colocar los servomotores en una ubicación adecuada para realizar el movimiento.

Figura 174. Unión universal utilizada para el movimiento de los ojos.



La calavera adquirida ya posee una mandíbula móvil, por lo que únicamente fue requerido diseñar una pieza para realizar palanca sobre la mandíbula con un servomotor, y así realizar el cierre/apertura de mandíbula. Se decidió colocar una sola base para los motores del mecanismo de los ojos y el mecanismo de la boca, para optimizar espacio.

Figura 175. Ubicación del servomotor encargado de la apertura/cierre de mandíbula.

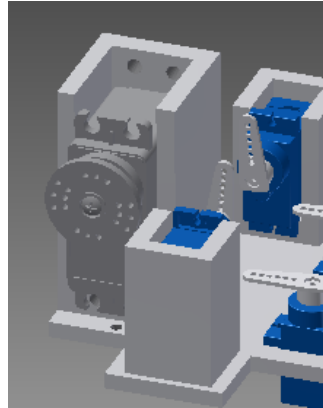
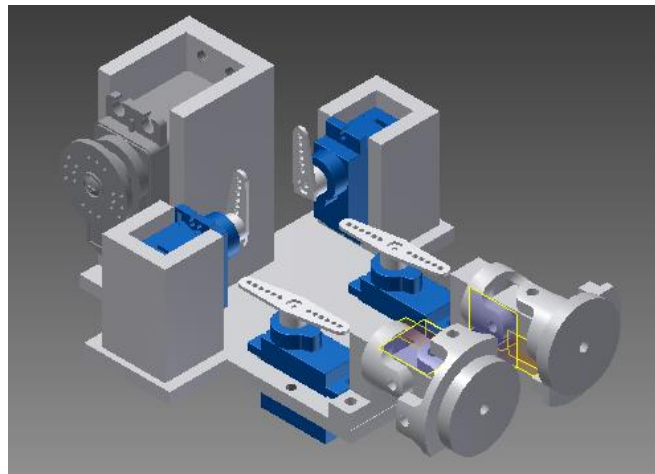


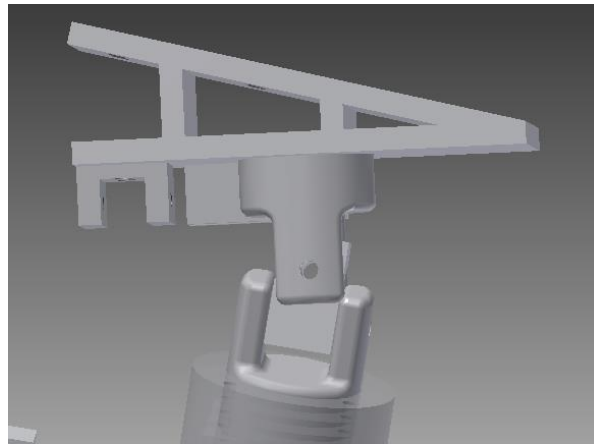
Figura 176. Mecanismo ensamblado de movimiento de ojos y boca.



Es importante mencionar que las piezas fueron diseñadas para encajar dentro del cráneo adquirido. Así mismo fue necesario colocar orificios en la base del mecanismo para poder fijar todo el ensamblaje al cráneo.

c. **Mecanismo del cuello.** El primer aspecto a tomar en cuenta en el diseño del cuello fue la toma de decisión acerca de colocar el mecanismo dentro del cráneo o fuera del mismo. Por el tamaño del mismo, se decidió realizar el mecanismo de movimiento fuera del cráneo. Para realizar los movimientos que realizar la imitación de inclinación y flexión/extensión del cuello se utilizó una unión universal. Se diseñó una base sobre la cual se pudiera fijar el cráneo y realizar el movimiento sobre el mismo.

Figura 177. Unión universal utilizada para realizar el movimiento del cuello.



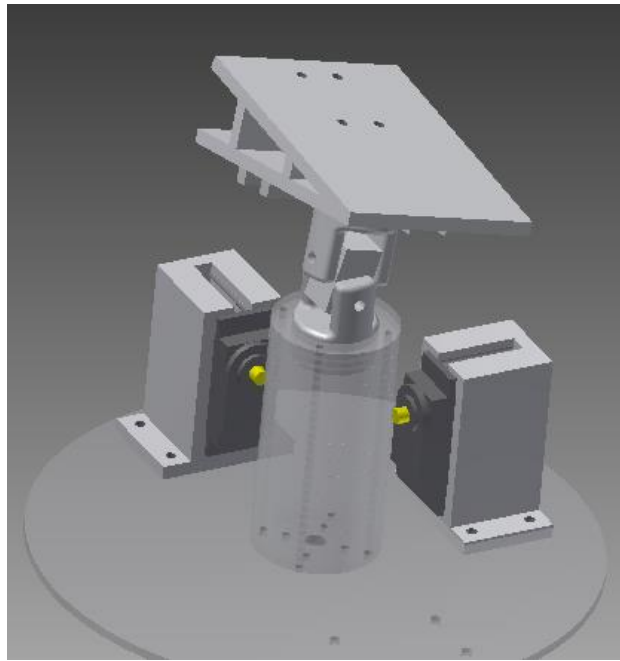
En la base para colocar el cráneo se colocaron piezas que permitieran ensamblar otras partes que transmitieran el movimiento de los motores. Cabe destacar que la base sobre la cual se colocó el cráneo fue diseñada con 30° de inclinación, ya que de esta forma se lograba obtener una posición inicial de la calavera en la que estuviera centrada.

Figura 178. Unión universal utilizada para realizar el movimiento del cuello.



Finalmente se diseñó la base en la cual se colocarían los motores y la unión universal, de manera que los servomotores pudieran provocar el movimiento deseado.

Figura 179. Mecanismo de movimiento de inclinación y flexión/extensión del cuello.



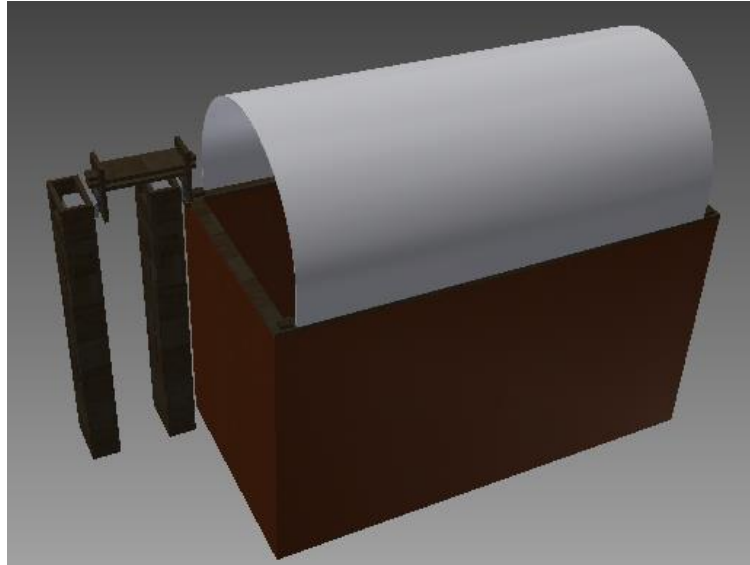
Para realizar el movimiento de rotación se decidió colocar un servomotor en la parte de debajo de la base del mecanismo de inclinación y flexión/extensión. Esto quiere decir que toda la base rotaría para realizar la emulación de la rotación.

Figura 180. Mecanismo final de movimiento del cuello.



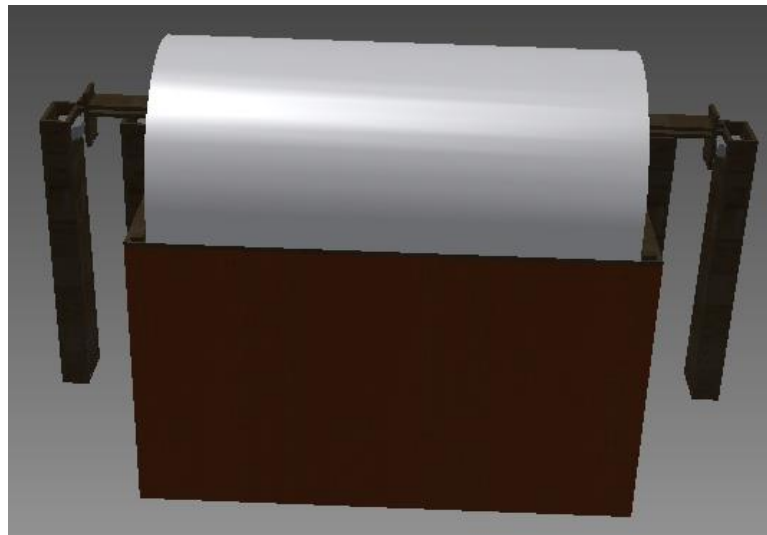
d. **Mecanismo de apertura/cierre del cofre.** El cofre sobre el cual se diseñó el mecanismo fue proporcionado por el IRTRA. No obstante, se les pidió que no realizaran la tapadera, ya que se debe procurar que la tapadera sea del peso adecuada para que los motores puedan soportar la carga, por lo que se decidió realizar la tapadera del peso adecuado para los motores y ensamblarla al cofre brindado por la Institución. Como se mencionó en la selección de actuadores, se realizó el diseño de tal forma que cuatro servomotores trabajaran en paralelo para poder realizar la apertura del cofre.

Figura 181. Mecanismo de apertura/cierre del cofre pirata



Se colocaron dos servomotores en cada extremo de la tapadera del cofre, para distribuir de la forma más uniforme posible la carga de los motores.

Figura 182. Mecanismo de apertura/cierre del cofre pirata



Existen varios tipos de mecanismos para transformar movimiento radial a movimiento lineal. Debido a la utilización de servomotores como actuadores, fue necesaria la implementación de uno de estos mecanismos para levantar la calavera. Se realizó un estudio de caso para determinar el tipo de mecanismo a diseñar. Los factores tomados en cuenta para la elección del tipo de mecanismo fue el tamaño del mismo, pérdida/aumento de potencia, simplicidad de la geometría de las piezas y la cantidad de piezas requeridas. La evaluación de los distintos aspectos se realizó con base al marco teórico relacionado a los tipos de mecanismos de transformación de movimiento radial a movimiento lineal.

Cuadro 18. Tipo de mecanismo para transformación de movimiento radial a movimiento lineal.

Se califica cada uno de los aspectos en una escala de 1-10 para cada actuador, y la calificación se multiplica por la ponderación de importancia de cada aspecto, que varía de 0-1 según su importancia, y se encuentra indicada entre un paréntesis.

Mecanismo	Tamaño (0,3)	Pérdida/aumento de potencia (0,3)	Cantidad de piezas requeridas (0,2)	Geometría de las piezas (0,2)	Total
Piñón-cremallera	9	6	9	9	8.1
Biela maniela	5	7	7	8	6.6
Tornillo-tuerca	9	10	9	6	8.7
Leva-émbolo	9	8	9	10	8.9
Cigüeñal	9	8	9	9	8.7
Tornillo sinfín-rueda dentada	9	10	9	6	8.7

Luego de realizar el estudio de caso se determinó que se utilizaría un mecanismo de leva-émbolo para levantar la calavera. Se realizó el diseño del mismo de tal forma que fuera ensamblado al mecanismo ya diseñado del cuello de la calavera.

Figura 183. Vista inferior del mecanismo de émbolos para subir la calavera.

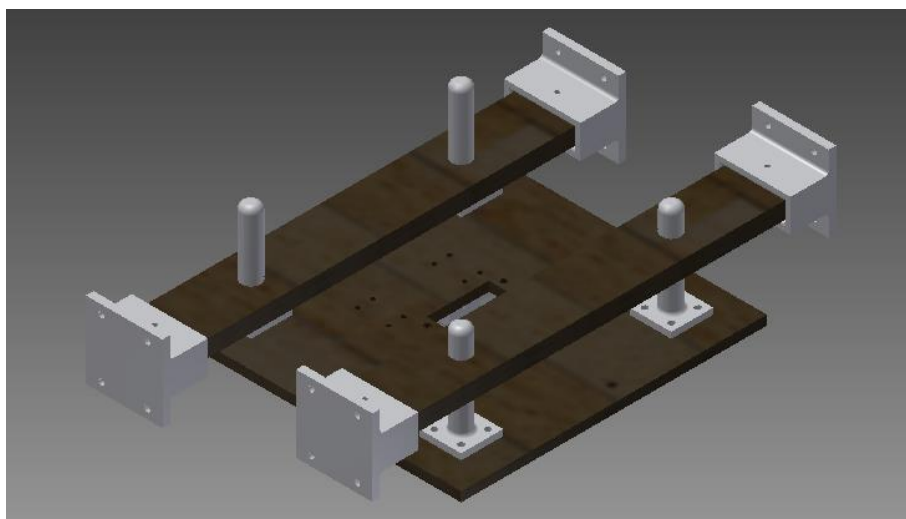


Figura 184. Vista superior del mecanismo de émbolos para subir la calavera.

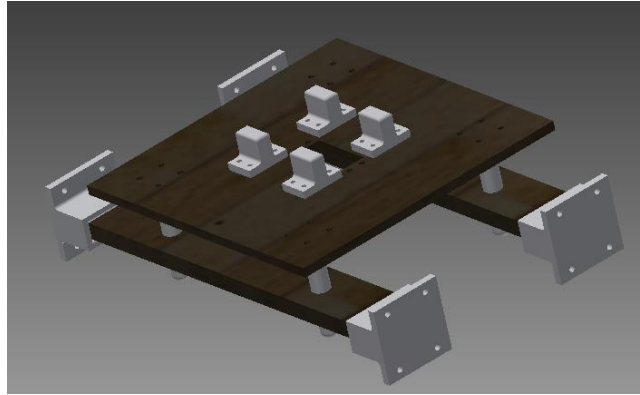


Figura 185. Mecanismo para subir la calavera ensamblado con mecanismo del cuello

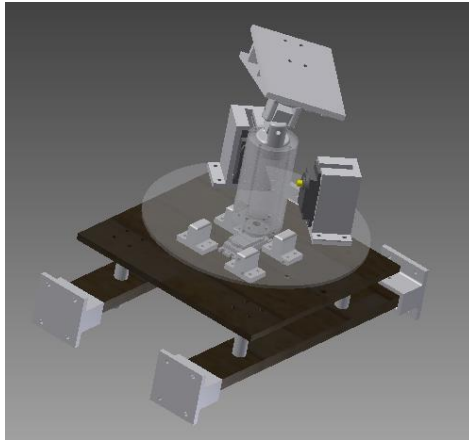
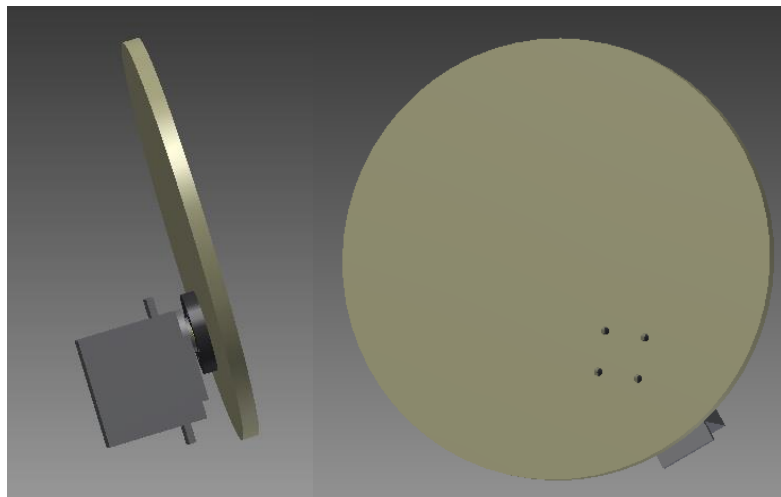


Figura 186. Servo montado a la excéntrica diseñada para subir la calavera..



e. **Mecanismo completo.** Luego de haber diseñado todos los mecanismos se realizaron las modificaciones pertinentes a las partes de cada mecanismo para que todos pudieran funcionar simultáneamente. Desde el proceso de diseño de cada movimiento se tomó en cuenta la simetría y tamaño de los demás mecanismos, por lo que las modificaciones realizadas en el acople de mecanismos fueron mínimas. En las siguientes ilustraciones se muestra el ensamblaje completo de los mecanismos.

Figura 187. Mecanismos acoplados.

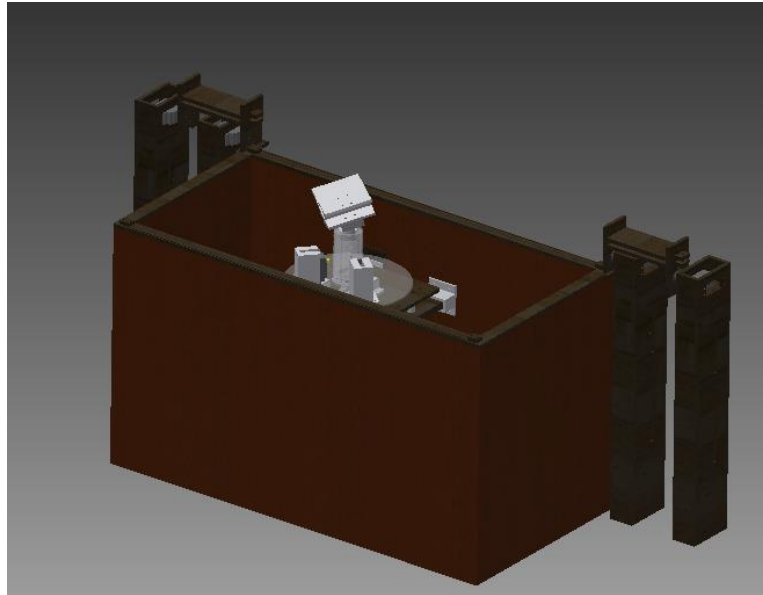


Figura 188. Mecanismos acoplados.



5. **Análisis de esfuerzos.** Es necesario determinar si los actuadores que se eligieron soportan la carga que exigen los mecanismos diseñados. Todos los mecanismos fueron diseñados utilizando el Software de diseño mecánico Inventor.

El software permite realizar un análisis de esfuerzos en los ensambles, para determinar la carga crítica que será exigida a un actuador. Se utilizó este análisis para determinar el torque máximo que requeriría un actuador para hacer funcionar los distintos mecanismos, y se realizó la comparación de los datos obtenidos con los datos técnicos de los motores. Es importante mencionar que a todos los datos obtenidos por Inventor se les fue aplicado un factor de seguridad, para sobredimensionar los mismos y asegurar el funcionamiento de los mecanismos con los actuadores seleccionados.

Se realizaron diferentes análisis en todos los mecanismos del sistema. Fue necesario colocar las fuerzas y cargas distribuidas de cada mecanismo, los puntos en los que se realizarían uniones con elementos de fijación (como tornillos), los puntos en los que se aplicaría soldadura u otro proceso de unión de piezas y otros aspectos.

Figura 189. Colocación de cargas distribuidas en el mecanismo del cuello.

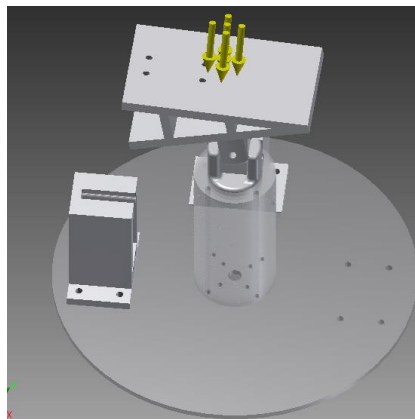
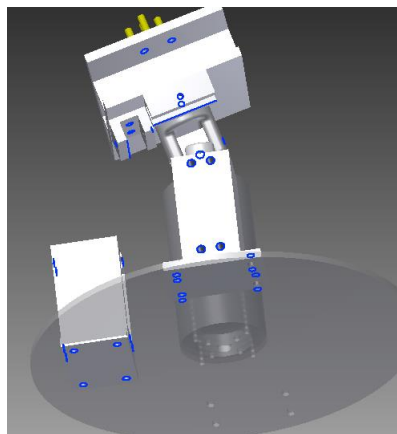


Figura 190. Colocación de uniones por elementos de fijación en el mecanismo del cuello.



Inventor realiza varios análisis sobre el ensamblaje en el que se desea trabajar. Dependiendo las uniones del ensamblaje, la geometría de las piezas y las cargas/fuerzas del sistema los mecanismos se verán sometidos a distintos esfuerzos. El software permite visualizar los puntos críticos de cada uno de los análisis, así como los esfuerzos a los que se verán sometidos. Inventor permite analizar los esfuerzos de Von Mises, las deformaciones máximas, el factor de seguridad, y otra información relevante para el estudio de los mecanismos del sistema.

Figura 191. Análisis de Von Mises realizado sobre el mecanismo del cuello.

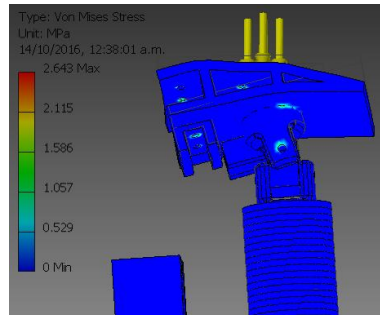


Figura 192. Análisis de deformación realizado sobre el mecanismo del cuello.

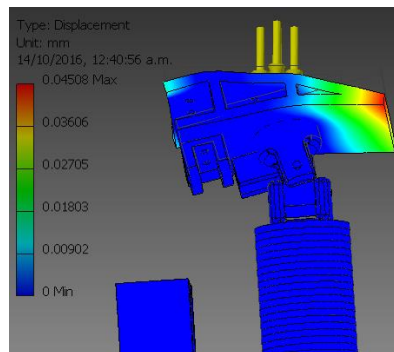
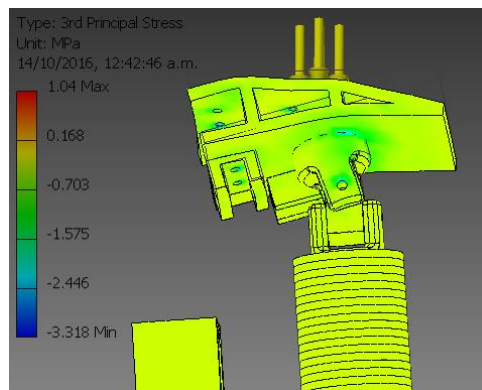


Figura 193. Análisis de Von Mises realizado en el mecanismo del cuello.



La elección de materiales de cada uno de los mecanismos se realizó con base a estos análisis, para asegurar su resistencia a los distintos movimientos. En el caso de los actuadores es importante analizar los puntos en los que el servomotor deberá actuar, para verificar que pueda realizar el movimiento sin ningún inconveniente. Se realizaron los diferentes análisis que realiza Inventor para todos los mecanismos, se analizaron los resultados y se determinó el torque máximo que sería exigido al actuador para realizar los distintos movimientos sobre el mecanismo respectivo. Es importante mencionar que Inventor no es un software diseñado para el análisis de esfuerzos, por lo que puede perder precisión respecto a algunos análisis respecto a otro tipo de software. Esta fue la razón principal a tomar en cuenta al multiplicar el torque máximo obtenido por inventor por un factor de seguridad, para asegurar el correcto funcionamiento de todos los actuadores.

En la siguiente Cuadro se observa el torque máximo exigido al actuador (dato obtenido con Inventor), el mismo dato luego de aplicar el factor de seguridad, el torque máximo que puede brindar el actuador elegido y finalmente el porcentaje de seguridad por cada actuador, es decir, qué porcentaje del torque máximo que se le puede exigir al actuador se tiene como intervalo de seguridad.

Cuadro 19. Análisis de torque exigido a los actuadores de los distintos mecanismos.

Actuador	Torque máximo (kgf*cm)	Torque máximo con factor de seguridad (1.25)	Torque máximo de actuador (kgf*cm)	Porcentaje de seguridad
Ojo Derecho Giro Z (Micro Servo)	0.9	1.125	1.8	37.50%
Ojo Derecho Giro Y (Micro Servo)	0.85	1.0625	1.8	40.97%
Ojo Izquierdo Giro Z (Micro Servo)	0.9	1.125	1.8	37.50%
Ojo Izquierdo Giro Y (Micro Servo)	0.85	1.0625	1.8	40.97%
Boca (HK15268A)	1.98	2.475	4	38.13%
Cuello Giro Z (HK15268A)	1.75	2.1875	4	45.31%
Cuello Giro Y (MG995)	6.9	8.625	12	28.13%
Cuello Giro X (MG995)	7.8	9.75	12	18.75%
Servo Cofre 1 (MG995)	7.1	8.875	12	26.04%
Servo Cofre 2 (MG995)	7.24	9.05	12	24.58%
Servo Cofre 3 (MG995)	7.1	8.875	12	26.04%
Servo Cofre 4 (MG995)	7.24	9.05	12	24.58%
Levantar Calavera 1 (MG995)	8.1	10.125	12	15.63%
Levantar Calavera 2 (MG995)	8.25	10.3125	12	14.06%
Levantar Calavera 3 (MG995)	7.97	9.9625	12	16.98%
Levantar Calavera 4 (MG995)	8.3	10.375	12	13.54%

Como se puede observar en los resultados obtenidos, todos los actuadores cumplen con los requerimientos de los mecanismos y en la mayor parte de los mismos se tiene un porcentaje de seguridad mayor al 25%. No obstante, todos poseen un porcentaje de seguridad mayor al 13%, que nos indica que los actuadores elegidos son los adecuados para el funcionamiento de los mismos.

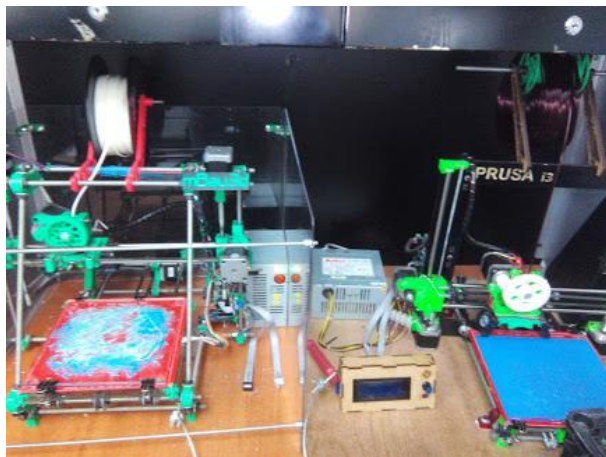
6. **Manufactura.** Desde el proceso de diseño fue importante tomar en cuenta el proceso de manufactura de las piezas de los distintos mecanismos. Todas las piezas fueron diseñadas procurando mantener su geometría lo más simple posible.

a. **Elección de procesos de manufactura.** La elección de procesos de manufactura se vio influenciada por la disposición de máquinas en la universidad. Los departamentos de Mecánica y de Electrónica de la universidad tienen a su disposición maquinaria adecuada para distintos procesos de manufactura. Se procuró realizar todas las piezas con un tamaño y geometría adecuada para los distintos procesos de manufactura disponibles en las instalaciones de la universidad. Con base a los procesos disponibles de manufactura, se modificó la geometría o tamaño de algunas piezas de los diseños, para poder realizar las piezas en determinado proceso.

1) **Impresión 3D.** La Universidad cuenta con cuatro impresoras 3D, dos pertenecientes al departamento de mecánica y dos pertenecientes al departamento de electrónica. Se decidió utilizar este tipo de proceso por la variedad de geometrías que se pueden alcanzar al fabricar las piezas.

Las impresoras 3D de la universidad están basadas en los modelos Prusa i2 y Prusa i3 disponibles en internet. Por el tipo de impresoras de la Universidad, se debió procurar mantener la geometría adecuada en las piezas, así como los tamaños indicados para su elaboración. Se establecieron parámetros máximos de diseño para las piezas a elaborar por este tipo de proceso, por lo que se estableció que el tamaño máximo que una pieza podría tener sería 15x15x15cm.

Figura 194. Impresoras 3D utilizadas para el proceso de manufactura.



Luego de realizar pruebas con la impresión de varias piezas, se determinó que la tolerancia aceptable de las piezas realizadas con impresión 3D es de 0.25mm. Según los datos de la universidad, la tolerancia de las impresoras es de 0.2mm, sin embargo, las piezas no tenían suficiente holgura con esta tolerancia, por lo que se decidió utilizar una tolerancia de 0.25mm. Este dato determinó las dimensiones finales de las piezas de los mecanismos que se realizarían por medio de este proceso de manufactura.

Una de las limitantes de este proceso de manufactura fue el tiempo de maquinado. A pesar de que el tiempo de fabricación depende de la geometría de una pieza y el material utilizado, para fabricar un cubo de 5x5x5cm se toma un tiempo aproximado de 1 hora y media, según las pruebas realizadas. Por esta razón se procuró minimizar la cantidad de piezas fabricadas por impresión 3D, y así mismo se buscó minimizar el tamaño de todas las piezas a fabricar por este proceso de manufactura.

Figura 195. Proceso de impresión 3D.

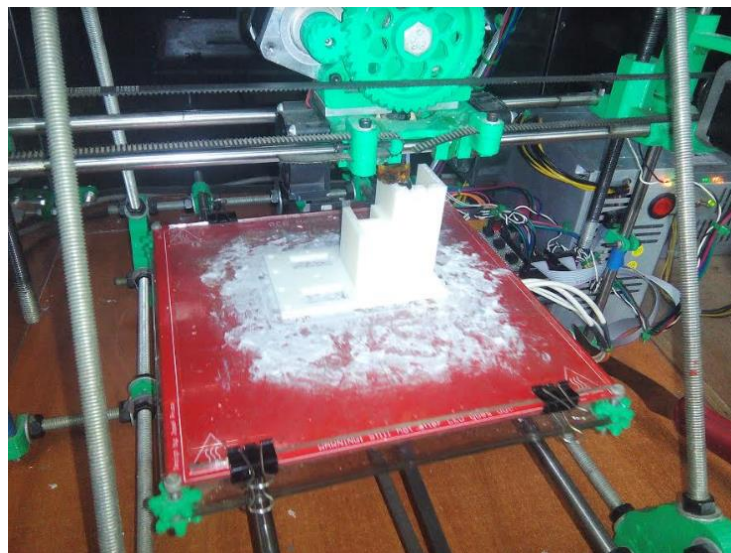


Figura 196. Piezas fabricadas por medio de impresión 3D.



2) Corte láser. El departamento de electrónica de la Universidad cuenta con una cortadora láser, por lo que se decidió utilizar este proceso de manufactura. Se procuró realizar la mayor cantidad de piezas por este proceso de manufactura, ya que tiene una velocidad de maquinado mayor al de impresión 3D. La cortadora del departamento es el modelo PLS4.75 de la empresa Universal Laser Systems.

Figura 197. Cortadora láser del departamento de electrónica de la Universidad.



Luego de realizar pruebas, se determinó que la tolerancia a manejar en el diseño de las piezas debía ser 0.05mm. La limitante de este proceso de manufactura es que solamente se pueden fabricar piezas planas, por lo que realizaron las modificaciones pertinentes para maximizar la cantidad de piezas fabricadas por corte láser.

El grosor máximo de corte de la máquina es de 10mm, mientras que su área de corte máximo es de 45x60cm.

Figura 198. Proceso de corte láser.



Figura 199. Piezas realizadas con corte láser.



b. Elección de materiales. La elección de materiales para las distintas piezas de mecanismos dependió del proceso de manufactura y de la pieza a maquinar.

1) Impresión 3D. Existen varios tipos de material para la impresión 3D. Los más utilizados son el PLA y el ABS. Se decidió realizar un estudio de caso para la elección de material de impresión 3D. Los aspectos a tomar en cuenta para la toma de decisión fue la resistencia a altas temperaturas, su facilidad de uso, rigidez, dureza, precio, y por último su resistencia química y a la abrasión.⁹

Cuadro 20. Estudio de caso de selección de material para proceso de impresión 3D.

Se califica cada uno de los aspectos en una escala de 1-10 para cada actuador, y la calificación se multiplica por la ponderación de importancia de cada aspecto, que varía de 0-1 según su importancia, y se encuentra indicada entre un paréntesis.

Material	Resistencia altas temperaturas (0,2)	Facilidad de uso (0,2)	Rigidez (0,2)	Dureza (0,2)	Precio (0,1)	Resistencia química y abrasión (0,1)	Total
ABS	9	8	9	9	10	9	8.9
PLA	7	10	8	7	10	8	8.2
HIPS	9	8	9	9	9	9	8.8
PET	7	8	8	7	9	8	7.7
Nylon	10	6	10	9	7	6	8.3

Tras realizar el estudio de caso, se decidió optar por la utilización de ABS para la impresión 3D para todas las piezas a fabricar por este proceso de manufactura. Se decidió utilizar ABS de color blanco para facilitar la tematización de las piezas de mecanismos que se pudieran observar en el ensamblaje final.

Figura 200. Rollo de ABS adquirido para proceso de impresión 3D.



⁹ Diseño basado en los datos brindados por <http://www.silicon.es/impresion-3d-que-materiales-usar-y-donde-comprarlos-50135>

No obstante, para realizar algunas pruebas se utilizaron piezas fabricadas con PLA perteneciente a la universidad. Todas las piezas que fueron impresas con PLA, cuando se realizaron pruebas bajo la luz del sol empezaban a sufrir alteraciones, contrario a lo ocurrido con las piezas de ABS. Esto apoya a la decisión tomada de utilizar piezas de ABS, ya que la temperatura del ambiente en las instalaciones del parque en el que estará ubicado el animatrónico son mayores a 25°.

Figura 201. Comparación entre piezas de PLA (rojas) y piezas de ABS (blancas)



2) Corte láser. La decisión se basó en la función que debía cumplir el mecanismo, y el medio en el que se encontraría. Para realizar la correcta selección se decidió realizar un estudio de caso, el cual se muestra en la siguiente Cuadro. Se decidieron utilizar los mismos aspectos evaluados en la selección de material para la impresión 3D. Es importante mencionar que la máquina de corte láser únicamente puede realizar cortes sobre materiales orgánicos, por lo que el estudio se realizó con estos mismos

Cuadro 21. Estudio de caso de selección de material para proceso de corte láser.

Se califica cada uno de los aspectos en una escala de 1-10 para cada actuador, y la calificación se multiplica por la ponderación de importancia de cada aspecto, que varía de 0-1 según su importancia, y se encuentra indicada entre un paréntesis.

Material	Resistencia altas temperaturas (0,2)	Facilidad de maquinado (0,2)	Rigidez (0,2)	Dureza (0,2)	Precio (0,1)	Resistencia química y abrasión (0,1)	Total
MDF	9	10	7	8	10	7	8.5
Playwood	9	9	6	7	10	7	7.9
Ertalon	10	9	9	9	5	10	8.9
Plastidur	10	9	9	9	6	10	9
Acrílico	10	9	8	8	7	9	8.6
Plexiglass	10	9	6	7	8	9	8.2

Contrario a selección de materiales del proceso de impresión 3D, para el corte láser se decidió utilizar diferentes materiales para los distintos mecanismos del proyecto. Según el estudio de caso realizado, el material apropiado para realizar el proceso de manufactura es el plastitur o el ertalón, no obstante, el precio del material es elevado. Por lo tanto, se decidió utilizar ertalón para las piezas que estarían sometidas a esfuerzos críticos. Según el análisis de esfuerzos realizado, los actuadores que deben soportar una mayor carga son los encargados de realizar la emulación del movimiento de salida de la calavera del cofre. Se decidió realizar las excéntricas del mecanismo de ertalón, ya que son las piezas que se verán sometidas a un mayor esfuerzo.

Se decidió seleccionar el acrílico como elemento de trabajo con este proceso de manufactura, ya que es un material que se puede tematizar con facilidad, además de ofrecer propiedades adecuadas para el ambiente en el que se encontrarían. Se decidió fabricar el mecanismo con piezas cortadas con acrílico. El acrílico es un material resistente a las condiciones de ambiente en el que se encontrará el animatrónico.

Finalmente se decidió utilizar MDF para el resto de piezas a maquinar que no se haya elegido utilizar ertalón o acrílico. A pesar de que el MDF tiene propiedades que lo hacen menos apropiado para el ambiente en el que se encontrará el animatrónico, su precio es considerablemente menor, por lo que se decidió utilizar este material para todas las piezas de “sacrificio”, es decir aquellas piezas diseñadas para ser reemplazadas con mayor frecuencia. El mecanismo encargado de realizar la apertura del cofre se realizó completamente de MDF, ya que se encontrará a la vista del público, y para las personas encargadas de ocultarlo será más fácil realizar su tarea.

Figura 202. Piezas fabricadas con MDF



Figura 203. Piezas fabricadas con acrílico.



7. **Ensamblaje.** El ensamblaje de todos los mecanismos fue realizado en las instalaciones de la universidad. Se utilizaron distintas herramientas para realizar correcciones finales a las piezas maquinadas. Algunas piezas requirieron rediseñar las piezas y volverlas a maquinar.

a. **Modificaciones a la calavera.** Antes de iniciar el proceso de ensamblaje fue necesario adecuar la calavera existente y a utilizar para poder realizar todo el ensamblaje. La calavera contaba con un circuito interno para encender los leds que poseía de fábrica y una bocina para realizar la emisión de sonidos, así como un espacio para colocar baterías.

Figura 204. Interior de la calavera luego de realizar las modificaciones sobre la misma.



Figura 205. Interior de la calavera luego de realizar las modificaciones sobre la misma.



También fue requerido realizar aberturas en el sitio en donde se encontrarían los ojos, ya que la calavera únicamente contaba con orificios del tamaño de un diodo led.

Figura 206. Exterior de la calavera luego de realizar las modificaciones sobre la misma.



b. Ensamblaje del mecanismo de los ojos y boca. Luego de realizar el maquinado de las piezas del mecanismo de los ojos y boca, se realizó el ensamblaje del mismo. Como elementos de fijación se utilizaron tornillos M3 y M4. Como elementos de transmisión de potencia de los motores se utilizaron barras dentadas M3 y juntas especiales para los servos. Fue necesario realizar los cortes necesarios sobre las barras dentadas para obtener el largo adecuado de las mismas.

Figura 207. Barras dentadas y juntas utilizadas para la transmisión de potencia.

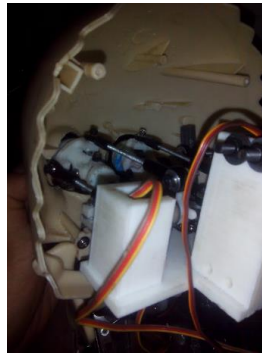


Figura 208. Mecanismo de ojos y boca luego de ser ensamblados, vista lateral.



Figura 209. Mecanismo de ojos y boca ensamblados, vista superior.



Figura 210. Mecanismo de ojos y boca ensamblado visto desde el exterior.



c. Ensamblaje del mecanismo del cuello. Al igual que con el mecanismo de los ojos y boca, se utilizaron tornillos M3 y M4 como elementos de fijación, y barras dentadas y juntas como elementos de transmisión de potencia. Contrario a lo ocurrido con el mecanismo de los ojos y boca, estos mecanismos contaron con piezas maquinadas por impresión 3D y corte láser.

Figura 211. Mecanismo del cuello luego de ser ensamblado.

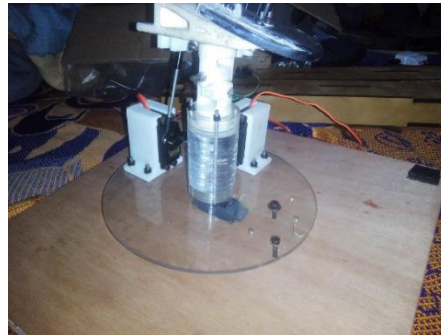


Figura 212. Mecanismo del cuello luego de ser ensamblado con la parte trasera del cráneo.

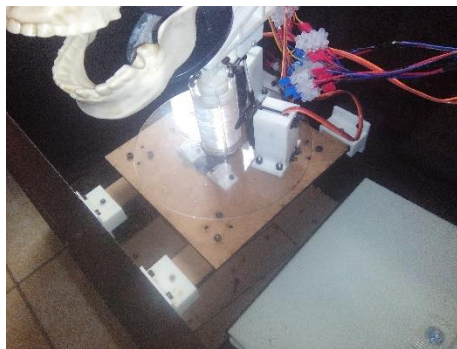


Figura 213. Mecanismo del cuello luego de ser ensamblado con la cabeza de la calavera.



Tras finalizar el ensamblaje del cuello fue necesario juntar el mismo con el mecanismo que se encarga de levantar la calavera, ya que forman parte de un mismo ensamblaje global. En este caso los elementos de transmisión de potencia fueron las excéntricas fabricadas de ertalón y los émbolos impulsados por las mismas.

Figura 214. Mecanismo para subir la calavera luego de ser ensamblado con el mecanismo del cuello.



d. Ensamblaje del mecanismo del cofre. Contrario a los mecanismos ya ensamblados, todas las piezas de este mecanismo fueron de MDF, por lo que como elemento de fijación además de tornillos también se utilizó cola, ya que son un elemento adherente adecuado para piezas de madera. La tapadera fue fabricada de malla de alambre, para reducir el peso de la tapadera al mínimo.

Figura 215. Mecanismo para levantar el cofre luego de ser ensamblado.



Figura 216. Tapadera del cofre fabricada.



Figura 217. Mecanismo de la tapadera del cofre ensamblada a la tapadera del cofre.



8. **Correcciones.** Fueron necesarias correcciones en los mecanismos, por diversos problemas encontrados. La corrección más significativa fue el cambio de mecanismo para poder levantar la calavera del cofre. Al momento de realizar el diseño no se tomó en cuenta el tamaño del mismo en relación al cofre existente. Debido al tamaño del mecanismo y la distancia que se deseaba levantar la calavera se pudo observar que el mecanismo no tenía el tamaño adecuado para el cofre, ya que era demasiado grande, por lo que se decidió realizar un cambio.

El cambio consistió básicamente en cambiar el actuador, pasando a utilizar un actuador lineal eléctrico de 12V. El actuador sigue cumpliendo con los requerimientos del sistema, y además no se requiere algún tipo de fuente adicional para poder ser controlado. El actuador lineal utilizado fue el LACT4P. En el Anexo 19 se encuentran las especificaciones del mismo.

Figura 218. Actuador lineal utilizado para levantar la calavera del cofre.



Figura 219. Nuevo mecanismo implementado para levantar la calavera del cofre pirata.



9. Pruebas de movimiento. Para realizar pruebas de movimiento, se utilizaron potenciómetros y un Arduino Mega para realizar las señales para controlar los servos.

Figura 220. Pruebas de movimiento del cuello.



Figura 221. Pruebas de movimiento del cuello.



Figura 222. Pruebas de movimiento del cuello.



Figura 223. Pruebas de movimiento de la boca.



Figura 224. Pruebas de movimiento de los ojos



Figura 225. Pruebas de movimiento de los ojos



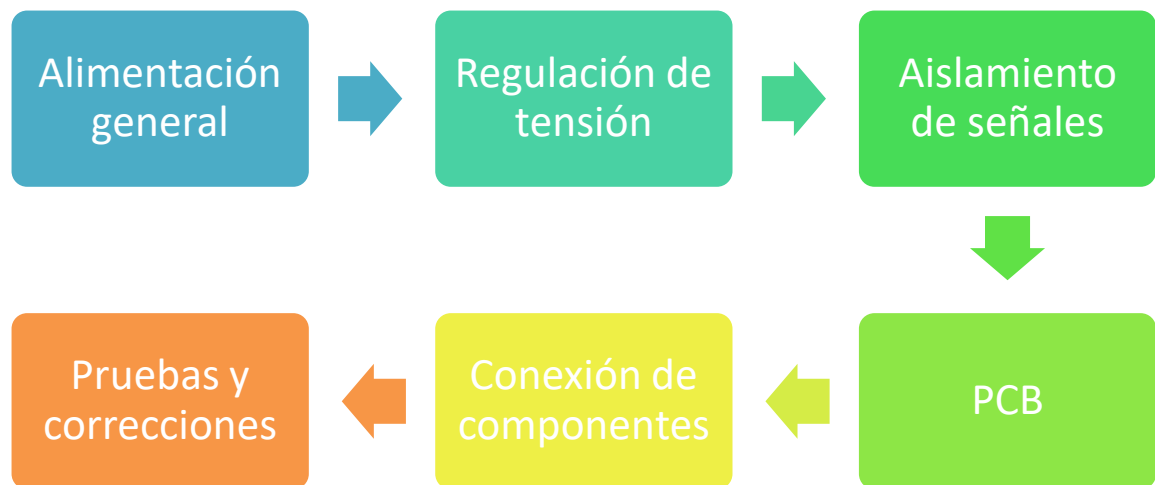
Figura 226. Pruebas de movimiento del cofre.



E. POTENCIA

1. **Metodología.** Este sub módulo del proyecto se enfocó en realizar todo lo relacionado con la alimentación de los distintos componentes del sistema. En el siguiente diagrama se puede observar el flujo de trabajo trazado para este sub módulo y las tareas a desarrollar.

Figura 227. Metodología utilizada en el sub módulo de la parte de potencia del animatrónico.



2. **Alimentación general.** La alimentación es parte esencial del animatrónico, ya que les brinda a los motores la potencia necesaria para su funcionamiento. Es importante tener un sistema capaz de brindarles a los motores la corriente necesaria para su funcionamiento en el nivel de tensión que requieran. A continuación, se muestra una lista de los actuadores elegidos para las distintas partes del animatrónico, y sus requerimientos de potencia.

Cuadro 22. Requerimientos de potencia de los actuadores elegidos.

Motor	Voltaje	Corriente máxima	Cantidad	Corriente total
Tower Pro Micro servo 9g	5V	250 Ma	4	1,000 mA
Tower Pro MG995	7.2V	1,100 Ma	10	11,000 mA
HK 15258A	5V	800 Ma	2	1,600 mA
			Total	13,600 mA

Como se puede observar, se requiere una alimentación suficiente para poder alimentar a todos los motores, que tomando en cuenta sus corrientes pico, pueden alcanzar un consumo de 13.6A.

Con base a estas necesidades se procedió a realizar la elección de una fuente de poder para los actuadores, controladores y componentes del animatrónico. En el siguiente cuadro se muestra el estudio de caso de elección de la fuente de poder. Se utilizaron las fuentes de voltaje presentes en el mercado nacional. Por los modelos existentes, si la fuente de poder no satisfacía las necesidades de corriente, se colocó un aspecto en el estudio de caso llamado “Cantidad de modelos requeridos”, que hace referencia a la cantidad de fuentes requeridas para alimentar a todos los motores y circuitos.¹⁰

Cuadro 23. Estudio de caso de elección de fuente de poder para los componentes del animatrónico.

Se califica cada uno de los aspectos en una escala de 1-10 para cada actuador, y la calificación se multiplica por la ponderación de importancia de cada aspecto, que varía de 0-1 según su importancia, y se encuentra indicada entre un paréntesis.

Fuente de poder	Costo (0.2)	Tensión ofrecida (0.2)	Corriente máxima (0.3)	Cantidad de modelos requeridos (0.3)	Total
5V / 6A	10	6	5	5	6.2
5V / 10A	9	6	7	7	7.2
12V / 5A	9	10	4	5	6.5
12V / 15A	8	10	9	10	9.3

Por lo tanto, se decidió utilizar una fuente de 12V/15A para alimentar todos los componentes del animatrónico, ya que brinda una corriente suficiente para todos los componentes del sistema, y su nivel de tensión es adecuado para una etapa de regulación.

Figura 228. Fuente de alimentación utilizada para los actuadores del sistema.



¹⁰ Datos obtenidos de <http://www.electronicasmd.com/productos/fuentes-de-voltaje/>

Adicionalmente es necesaria considerar una fuente de alimentación para los distintos componentes electrónicos de los circuitos de control y aislamiento de señales, cuya corriente total no sobrepasará los 500mA. Debido a que los requerimientos de corriente son menores al de los actuadores, se decidió utilizar una fuente regulada de 12V/2A, para minimizar costos.

3. **Regulación de tensión.** Cada uno de los elementos del animatrónico funciona a niveles de tensión distintos y tiene demandas de corriente diferentes, por lo que es necesaria una etapa de regulación para cada componente. Se decidió utilizar una alimentación independiente para cada uno de los motores, y una alimentación general de 5V para todos los elementos de control del animatrónico.

a. **Tipo de regulador.** Es necesario decidir qué tipo de etapa de regulación se utilizará para brindarle la corriente necesaria a todos los componentes. Se realizó un estudio de caso para determinar el circuito de regulación de tensión para cada uno de los componentes. Los aspectos a tomar en cuenta fueron el costo de fabricación del regulador, complejidad del mismo, eficiencia y corriente máxima de salida del regulador. El estudio de caso se realizó con base a la investigación del marco teórico acerca de reguladores de tensión.¹¹

Cuadro 24. Estudio de caso de selección de tipo de etapa de regulación.

Se califica cada uno de los aspectos en una escala de 1-10 para cada actuador, y la calificación se multiplica por la ponderación de importancia de cada aspecto, que varía de 0-1 según su importancia, y se encuentra indicada entre un paréntesis.

Tipo de regulador	Costo (0.3)	Complejidad (0.4)	Eficiencia (0.1)	Corriente máxima (0.2)	Total
Buck converter	7	6	10	10	7.5
Regulador lineal	10	10	5	5	8.9
Regulador con diodo zener	9	9	7	7	8.4

A pesar de tener una eficiencia menor al 50%, se decidieron utilizar reguladores lineales para la etapa de regulación, ya que los circuitos de aplicación son sencillos y tienen un costo por lo regular menor a los \$2.

b. **Selección de componentes.** Todos los componentes empleados en el proyecto trabajan a dos niveles distintos de tensión, 5V y 7.2V. Los servomotores HK 15258A, los Tower Pro micro servos y los circuitos de control requieren una alimentación de 5V. Se decidió utilizar el mismo estudio de caso ya que todos requieren una alimentación de 5V y tienen una corriente máxima menor a 1A. En la siguiente Cuadro se muestra los aspectos evaluados en el estudio de caso y la ponderación obtenida para cada regulador. El aspecto “Instalación y ensamblaje” hace referencia a la facilidad de colocación del regulador

¹¹ Costos obtenidos de <http://www.electronicasm.com/>

en un PCB. Es importante mencionar que se decidió colocar un campo en el estudio referente al tamaño del componente, ya que se desea minimizar el tamaño del PCB del proyecto. Las características de los módulos e integrados presentados en el estudio de caso se muestran a detalle en el Anexo G, Anexo H, Anexo I y Anexo J.¹²

Cuadro 25. Estudio de caso de selección de regulador de 5V.

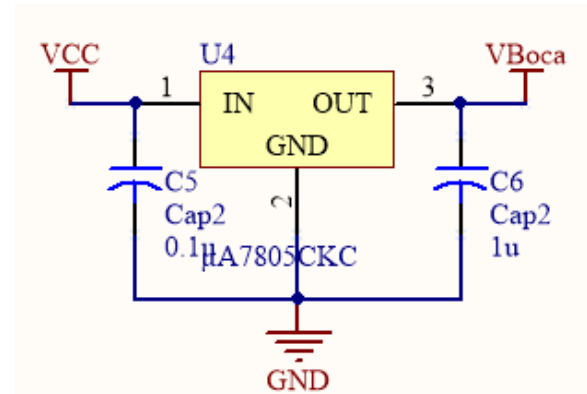
Se califica cada uno de los aspectos en una escala de 1-10 para cada actuador, y la calificación se multiplica por la ponderación de importancia de cada aspecto, que varía de 0-1 según su importancia, y se encuentra indicada entre un paréntesis.

Regulador	Costo (0.3)	Corriente máxima (0.3)	Instalación y ensamblaje (0.3)	Tamaño (0.1)	Total
LM7805	10	8	10	10	9.4
LM1084IT-5.0	8	10	10	10	9.4
Módulo LM2596	7	9	7	7	7.6
Regulador DC-DC XL4005	6	10	7	7	7.6

Según el estudio de caso realizado, las opciones del regulador LM7805 y el LM1084 son las opciones adecuadas para la regulación de tensión de los servomotores y el circuito de control. Se decidió utilizar el regulador LM7805, debido a que su costo es menor, y se decidió utilizar una alimentación diferente para cada actuador.

Con base en los circuitos de aplicación de la hoja de datos del regulador, se diseñó el circuito correspondiente para la alimentación que utilizarán el LM7805.

Figura 229. Esquemático de circuito de alimentación de componentes que utilizarán 5V.



Los elementos restantes que no utilizan una alimentación de 5V son los servomotores Tower Pro MG995. Estos servomotores utilizan una alimentación de 7.2V para exigirle el mayor torque que pueden ofrecer. Para

¹² Costos obtenidos de <http://www.electronicasm.com/>

elegir los componentes adecuados para su etapa de regulación se realizó un estudio parecido al realizado para los elementos que requieren una alimentación de 5V. Los datos del regulador LM317T se encuentran en el Anexo 10.

Cuadro 26. Estudio de caso de selección de regulador de 7.2V.

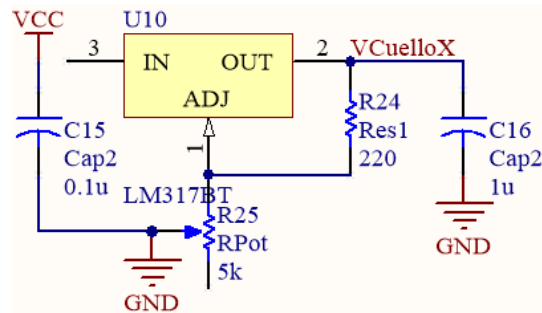
Se califica cada uno de los aspectos en una escala de 1-10 para cada actuador, y la calificación se multiplica por la ponderación de importancia de cada aspecto, que varía de 0-1 según su importancia, y se encuentra indicada entre un paréntesis.

Regulador	Costo (0.3)	Corriente máxima (0.3)	Instalación y ensamblaje (0.3)	Tamaño (0.1)	Total
LM317T	10	8	10	10	9.4
Módulo LM2596	7	9	7	7	7.6
Regulador DC-DC XL4005	6	10	7	7	7.6

Con base al estudio de caso realizado se decidió utilizar el regulador LM317T para la etapa de regulación para la alimentación de los Tower Pro MG995.

Con base a los circuitos de aplicación de la hoja de datos del regulador, se diseñó el circuito correspondiente para la alimentación que utilizarán el LM317T.

Figura 230. Esquemático de circuito de alimentación de componentes que utilizarán 7.2V.



4. **Aislamiento de señales.** El aislamiento de señales en un proyecto es un aspecto muy importante en el diseño del mismo. Es necesario proteger los elementos de control del circuito, por lo que se vuelve necesario realizar un aislamiento entre las señales de control y las señales de potencia. Un aislamiento de señales ayuda a prevenir daños sobre los elementos de control, ya que, si existe una falla con algún motor y esto provoca daños en la línea de alimentación, los elementos de control no se verán afectados por dicha falla.

Existen varias formas de aislar las señales en un circuito, por lo que se decidió realizar un estudio de caso para elegir el circuito adecuado en el aislamiento de señales. Los aspectos a ponderar en el estudio fueron el

costo de implementación, tiempo de reacción y tamaño del componente. El tamaño del componente es importante, ya que como se ha mencionado con anterioridad, se desea minimizar el tamaño del circuito del animatrónico. El tiempo de reacción un aspecto importante ya que se utilizarán como señales de control pulsos PWM, con período menor a 20ms, por lo que se requiere que el componente seleccionado sea capaz de detectar los cambios de pulso. Las especificaciones de los elementos del estudio de caso se encuentran en el Anexo L, Anexo M y Anexo N.¹³

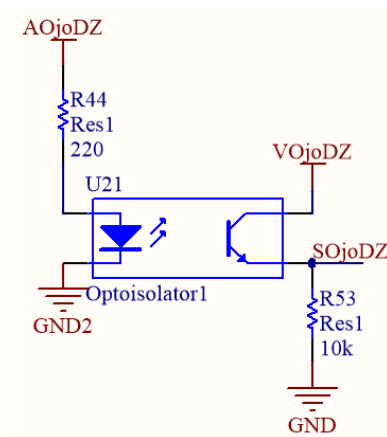
Cuadro 27. Estudio de caso de selección de elemento para aislar las señales.

Se califica cada uno de los aspectos en una escala de 1-10 para cada actuador, y la calificación se multiplica por la ponderación de importancia de cada aspecto, que varía de 0-1 según su importancia, y se encuentra indicada entre un paréntesis.

	Costo (0.25)	Tiempo de reacción (0.5)	Tamaño (0.25)	Total
PT817	10	9	10	9.5
Switch Digital CD4066	8	10	8	9
Relay	8	8	7	7.75

Con base al estudio de caso se decidió utilizar optoacopladores para aislar las señales de potencia con las señales de control, ya que es el elemento que más se adecúa a las necesidades del proyecto. Con base a la hoja de datos del fabricante, se diseñó el circuito de aislamiento de señales de potencia y control para cada actuador. Es importante resaltar de nuevo que cada motor posee su propia alimentación, por lo que el aislamiento de señales se realizó con la alimentación de cada motor por separado.

Figura 231. Circuito diseñado para el aislamiento de señales utilizando optoacopladores.



¹³ Precios obtenidos de <http://www.electronicasmd.com/>

5. PCB. Todo el proceso de diseño y fabricación de PCB se realizó con el software Altium. A continuación, se presentan los distintos procesos llevados a cabo para obtener el PCB.

a. Esquemático. Luego de haber realizado la selección de componentes se procedió a realizar el diseño de los circuitos del proyecto. Con el diseño terminado se realizó el esquemático en Altium para proceder a realizar el diseño del PCB. En las siguientes ilustraciones se muestran las diferentes partes del esquemático. En el esquemático se muestran algunos elementos que no han sido descritos, ya que corresponden a la parte de control del proyecto.

Figura 232. Esquemático de la etapa de regulación de 5V.

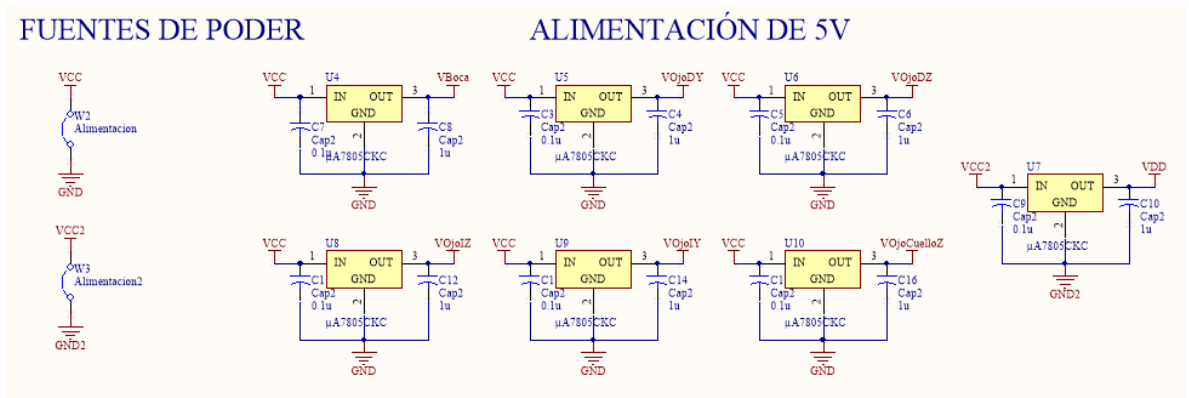


Figura 233. Esquemático de la etapa de regulación de 7.2V.

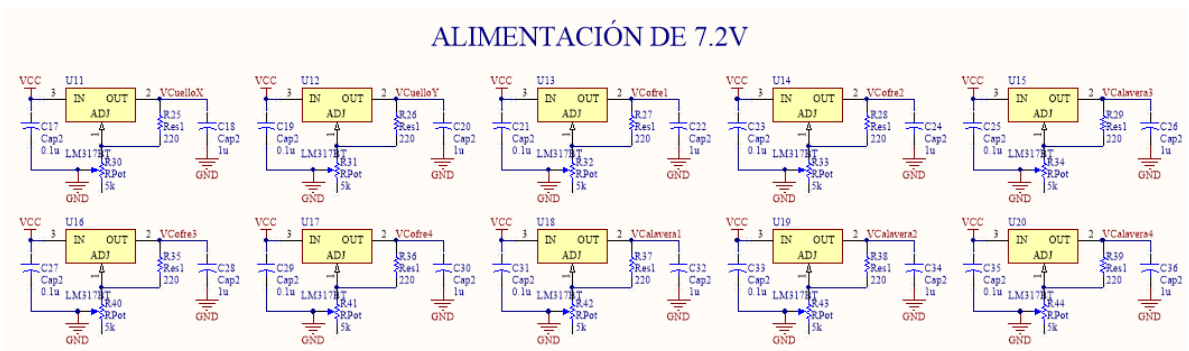


Figura 234. Esquemático de la etapa de aislamiento de señales.

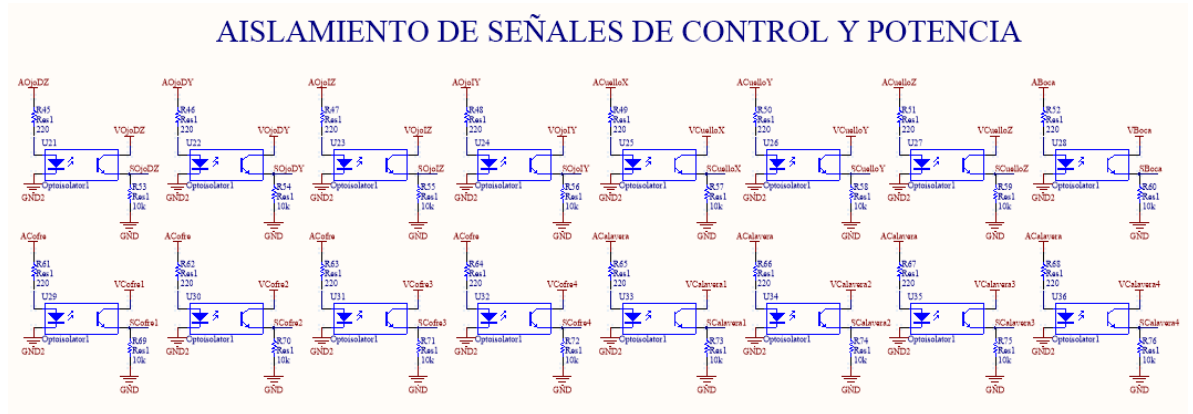


Figura 235. Esquemático de las conexiones del microcontrolador.

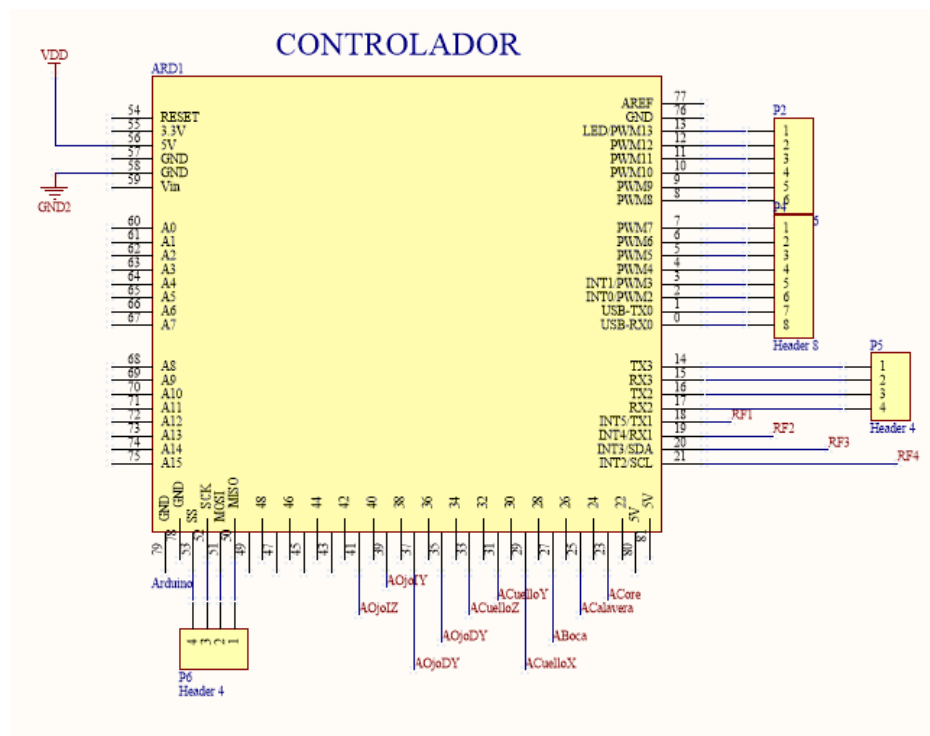


Figura 236. Esquemático de las terminales para la conexión de los servomotores.

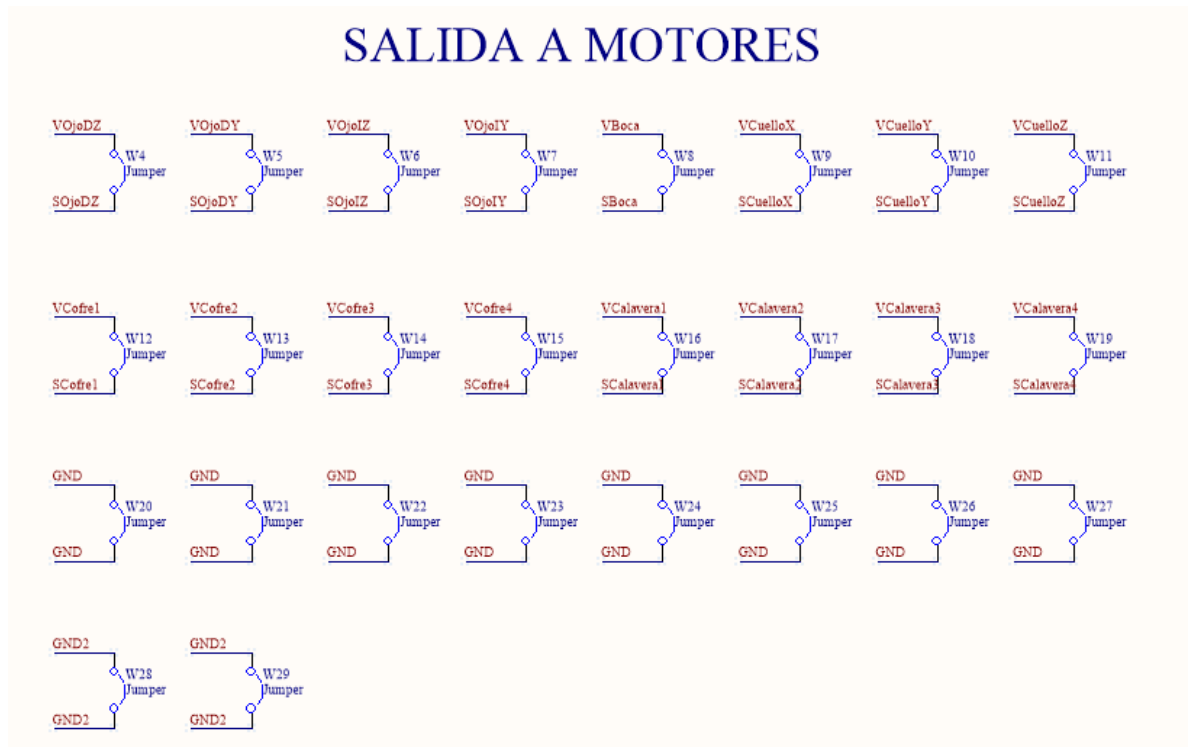
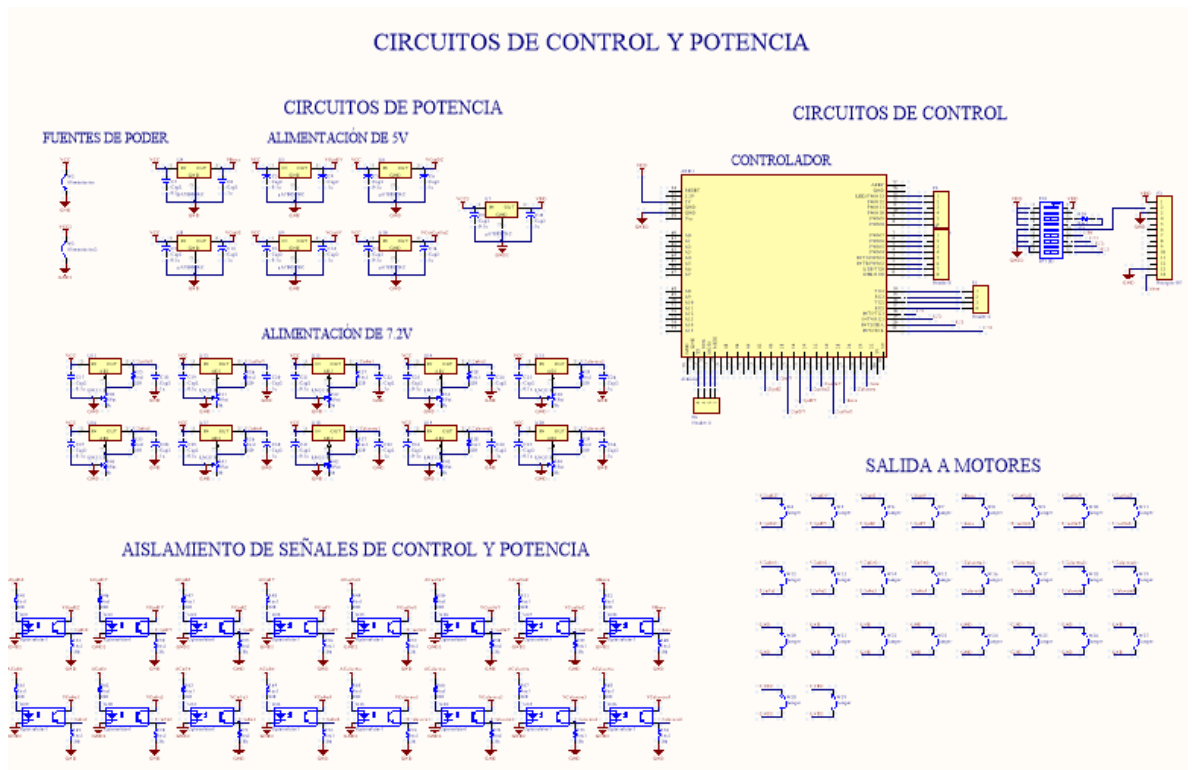


Figura 237. Esquemático de todos los circuitos del proyecto.



b. Diseño de PCB. Al igual que con el proceso del esquemático del circuito, se utilizó Altium para realizar el diseño del PCB del proyecto. Se establecieron como parámetros de diseño que el tamaño máximo de la placa debía ser 21x15cm. En las siguientes ilustraciones se muestra el diseño del PCB del proyecto. Se procuró colocar las terminales para la conexión de los motores en los bordes del diseño del PCB para facilidades de interconexiones.

Figura 238. Componentes ubicados en el PCB, antes de realizar el trazado de conexiones.

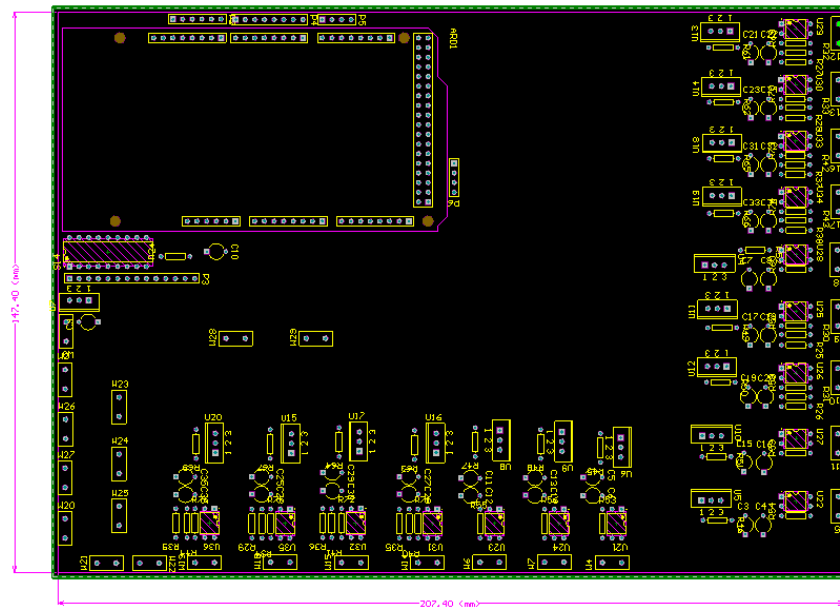


Figura 239. Diseño del PCB luego de realizar las conexiones.

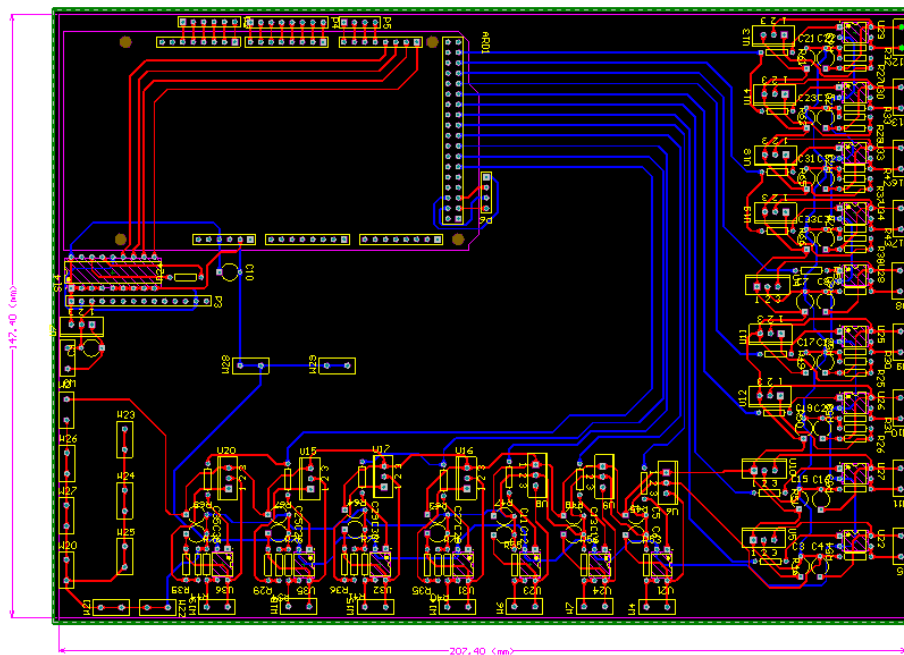


Figura 240. Vista superior del diseño del PCB.

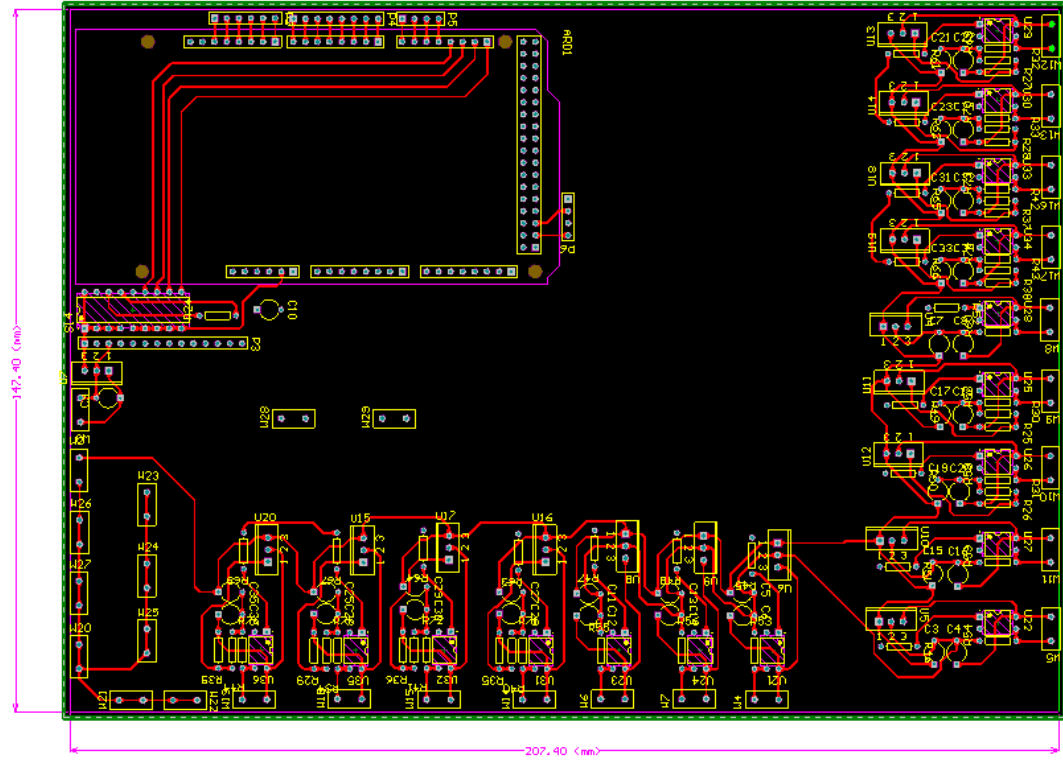


Figura 241. Vista inferior del diseño del PCB.

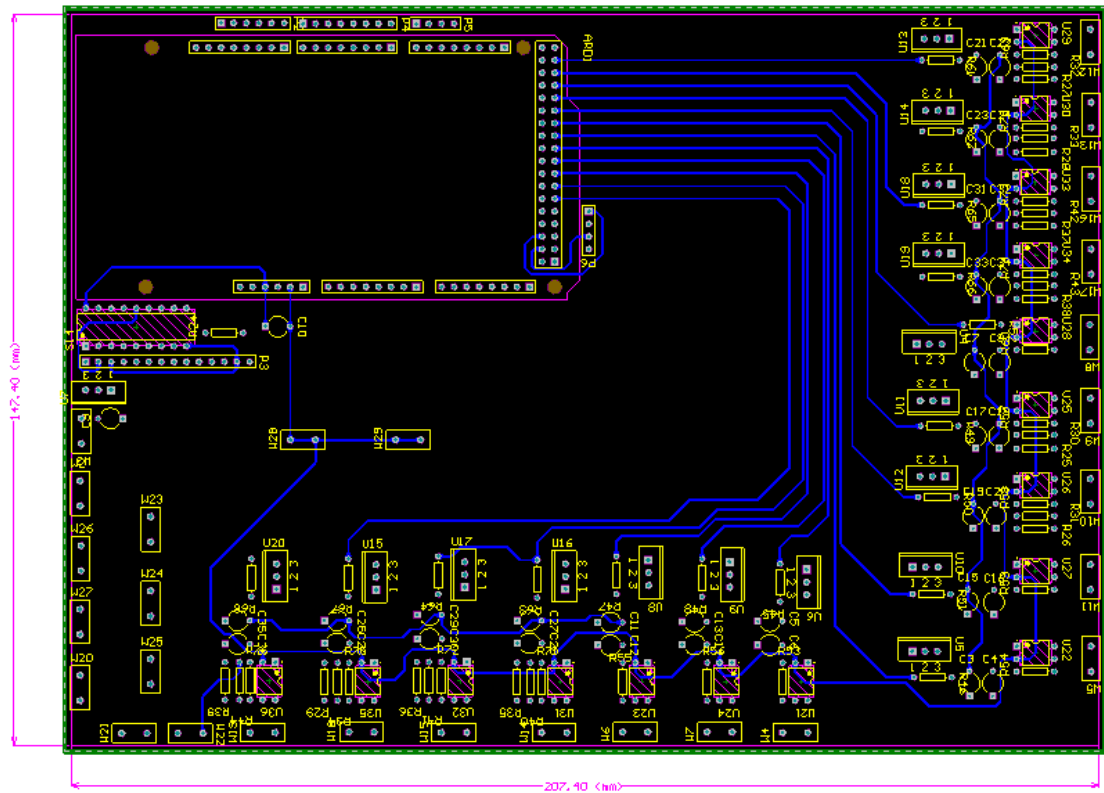


Figura 242. Distintas partes del diseño PCB.

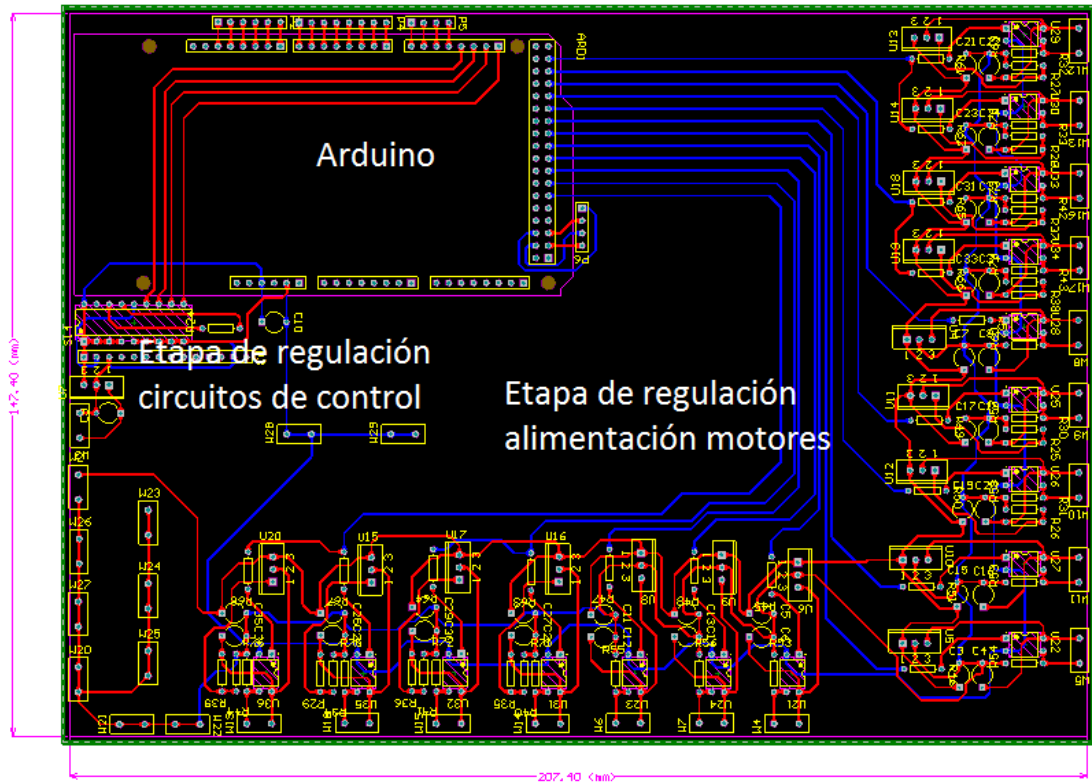
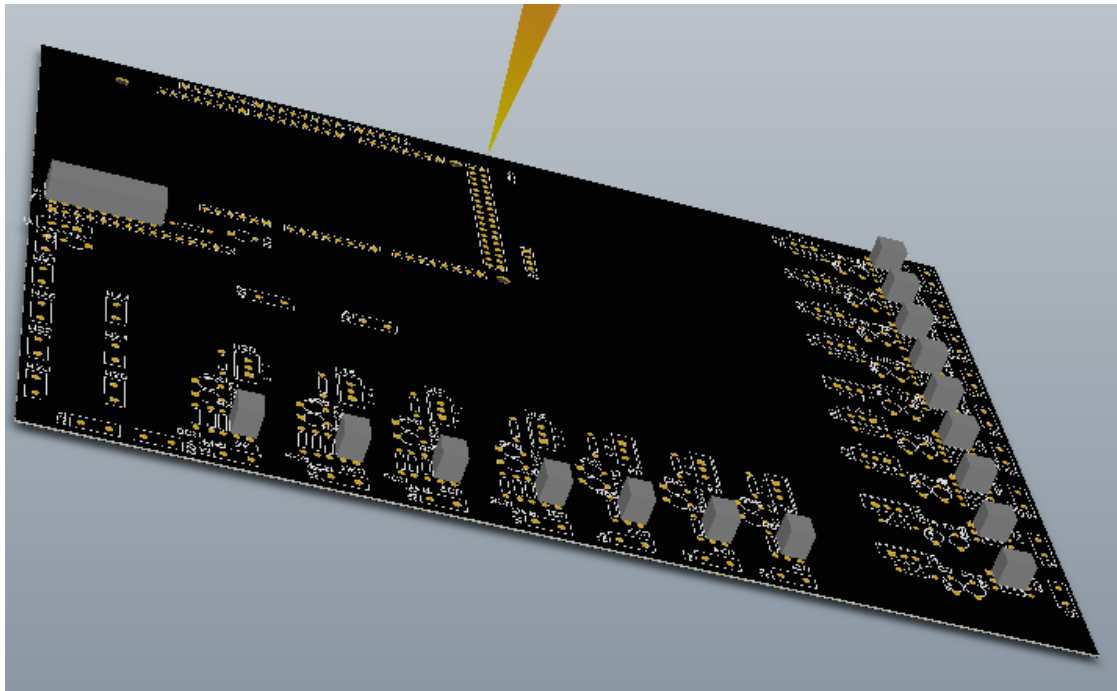


Figura 243. Vista 3D del diseño del PCB.



c. **Maquinado.** El departamento de electrónica cuenta con una máquina de fresado de PCB. Este proceso de manufactura únicamente se utilizó para la fabricación de las placas de circuitos del proyecto. El modelo de la máquina fresadora de la universidad es la ProtoMat S103 de la empresa LPKF.

Figura 244. Máquina fresadora.



Figura 245. Proceso de maquinado del PCB.

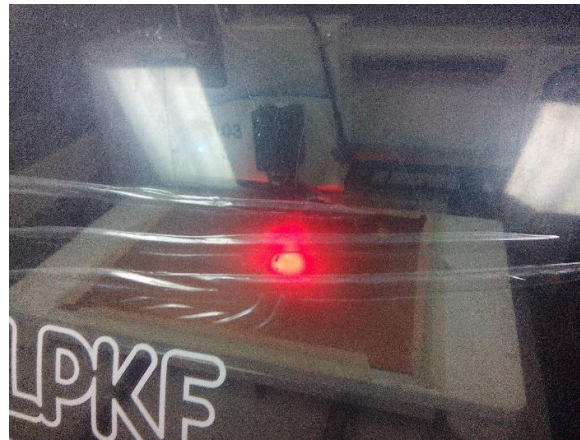


Figura 246. Vista posterior del diseño del PCB.

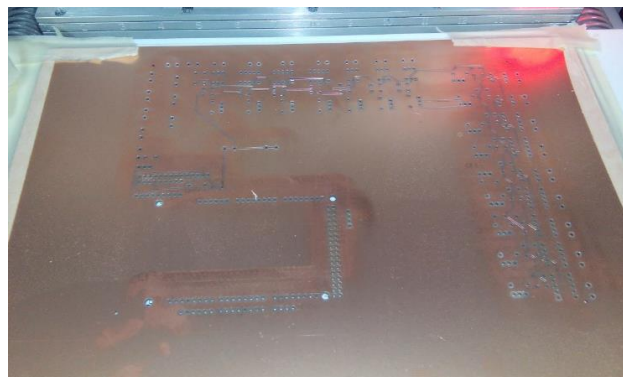
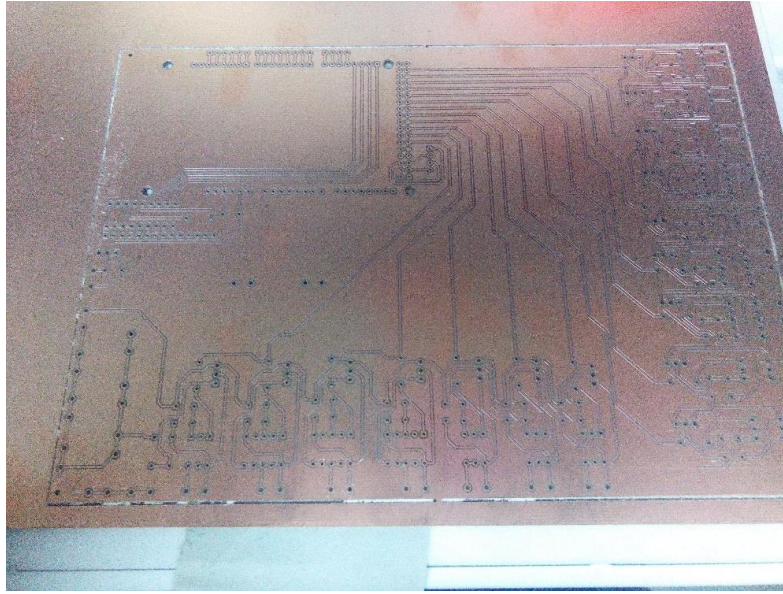
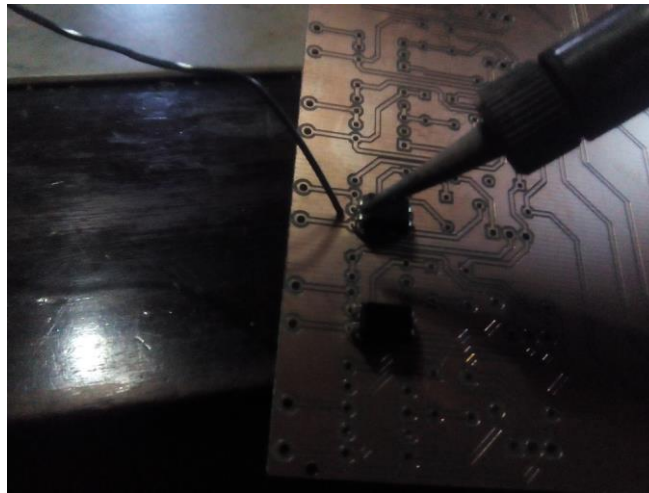


Figura 247. Vista frontal del diseño del PCB.



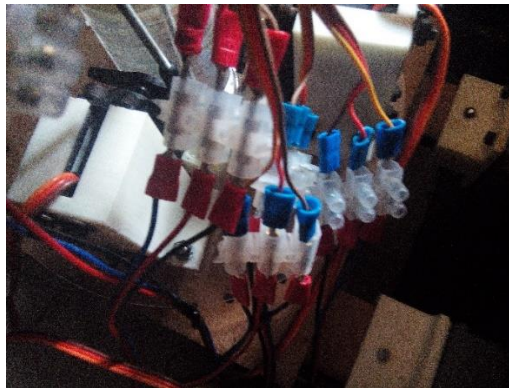
d. Soldadura. Finalmente se realizó el proceso de soldadura de los elementos y componentes al PCB. Se utilizó el proceso de soldadura convencional.

Figura 248. Proceso de soldadura.



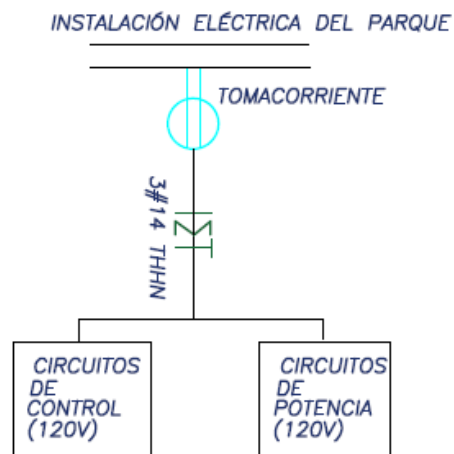
6. Conexión de componentes. Luego de haber trabajado el PCB se procedió a realizar la conexión de todos los componentes del sistema. Se utilizaron terminales para realizar los empalmes para poder conectar las terminales de salida del PCB a los actuadores. Se realizaron pruebas mecánicas para verificar la correcta conexión de todos los elementos del sistema.

Figura 249. Empalmes en la conexión de los motores.



Finalmente fue necesaria la preparación de la conexión de corriente eléctrica para todos los componentes del sistema. Como ya se mencionó en la selección de fuentes de alimentación, se utilizaron dos fuentes de poder, por lo que fue necesario realizar la conexión eléctrica pertinente para que los técnicos encargados del animatrónica únicamente tuvieran la necesidad de conectar una espiga al tomacorriente. Se utilizó cable TSJ y espigas polarizadas para realizar las conexiones. Los calibres de los cables, así como todos los empalmes y uniones se realizaron siguiendo las normas de seguridad para asegurar el correcto funcionamiento del animatrónico y evitar problemas a los operarios y visitantes.

Figura 250. Diagrama unifilar de la conexión eléctrica.

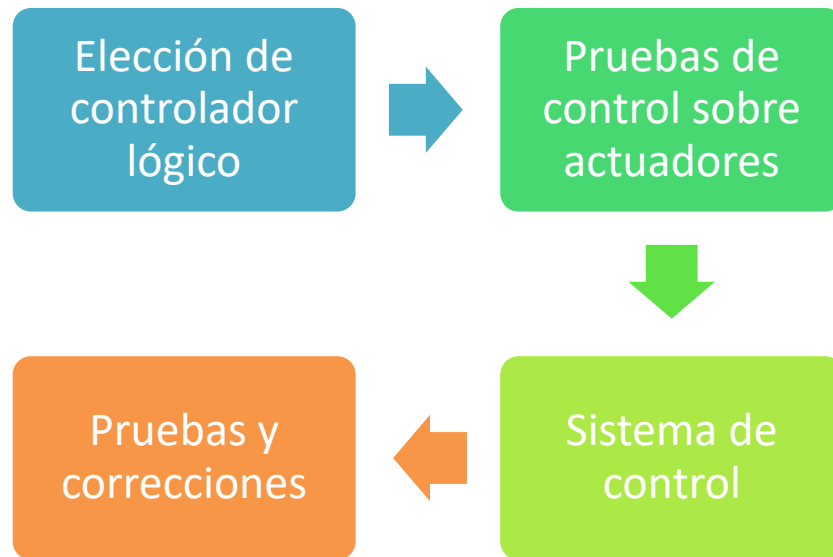


Debido a las condiciones climáticas del parque, se decidió colocar todos los componentes del PCB dentro de una caja de registro, para resguardarlos y asegurar su correcto funcionamiento.

F. CONTROL

1. **Metodología.** Este sub módulo del proyecto se enfocó en realizar todo lo relacionado con el control de los actuadores del animatrónico. En el siguiente diagrama se puede observar el flujo de trabajo trazado para este sub módulo y las tareas a desarrollar.

Figura 251. Metodología utilizada en el sub módulo de la parte de control del animatrónico.



2. **Controlador lógico.** El controlador lógico es el corazón de todo el proyecto. Determina las trayectorias de movimiento del animatrónico, genera las señales de control para los actuadores y prácticamente se encarga de darle vida al proyecto. Los controladores lógicos son utilizados en todo ámbito de la vida humana. Dependiendo del ambiente y las funciones que vaya a realizar será el controlador lógico a utilizar.

En las industrias se utilizan los autómatas programables, también llamados PLC, para realizar el control de todos los procesos industriales. En muchos electrodomésticos, en computadoras de automóviles y algunos reproductores de audio son muy utilizados los microcontroladores desarrollados por Microchip, los famosos PIC.

Por esta razón se debe poner especial énfasis en la selección del controlador lógico para el proyecto, ya que será el encargado de brindarle vida a todo el sistema, y se debe asegurar de que cumpla con todos los requerimientos del sistema. Se realizó un estudio de caso para determinar el controlador lógico a utilizar en el animatrónico. Los aspectos a evaluar fueron el costo del controlador, su facilidad de implementación,

número de entradas/salidas, compatibilidad con los actuadores elegidos, tamaño y requerimientos de funcionamiento. Todos estos aspectos son muy importantes para determinar el controlador lógico a utilizar.

En los anexos Anexo O, Anexo P, Anexo Q y Anexo R se encuentran las especificaciones de los componentes con los cuales se realizó el estudio de caso.

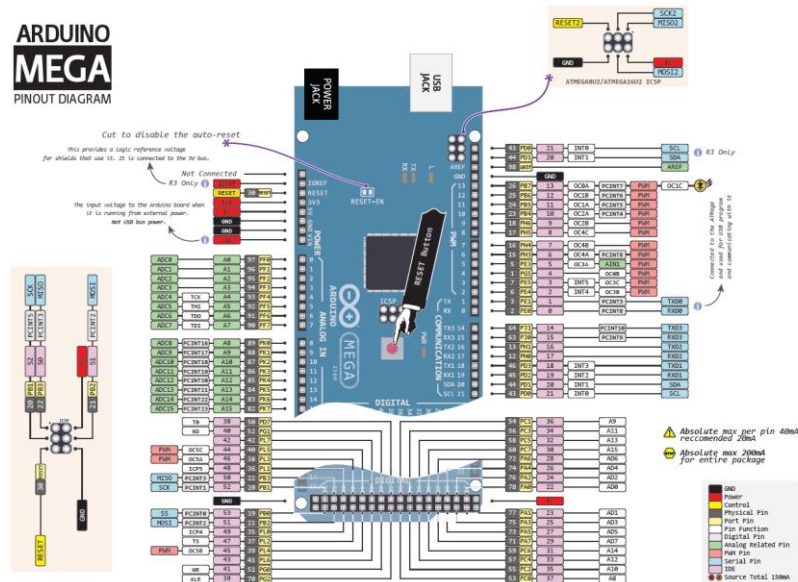
Cuadro 28. Estudio de caso de selección de controlador lógico.

Se califica cada uno de los aspectos en una escala de 1-10 para cada actuador, y la calificación se multiplica por la ponderación de importancia de cada aspecto, que varía de 0-1 según su importancia, y se encuentra indicada entre un paréntesis.

Controlador	Costo (0.3)	Facilidad de implementación (0.1)	# de entradas y salidas (0.25)	Compatibilidad con actuadores (0.25)	Tamaño (0.1)	Total
PIC16F887	10	8	7	9	10	8.8
LOGO! 24CE	6	8	7	9	9	7.5
AtMega1280 (En Arduino Mega)	7	10	10	10	9	9
Raspberry Pi 2	8	8	5	8	9	7.35

Tras realizar el estudio de caso se decidió utilizar el AtMega1280 con la plataforma Arduino Mega como controlador lógico del animatrónico, ya que es el que mejor se adecuía a los requerimientos del proyecto.

Figura 252. Distribución de pines del Arduino Mega.¹⁴



¹⁴ Imagen obtenida de <http://www.bigtronica.com/img/cms/arduino-mega-pinout-diagram.png>

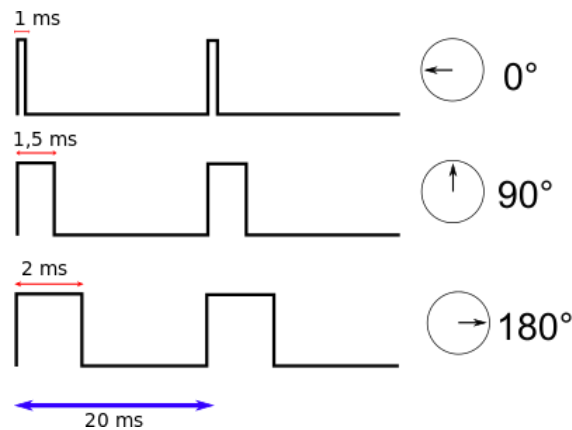
3. Pruebas de control sobre los actuadores. Luego de haber seleccionado el controlador lógico del sistema es imperioso realizar pruebas de control sobre los actuadores.

a. Señal de control para un servomotor. Un servomotor puede funcionar de dos diferentes maneras:

- De forma continua
- Controlado por una señal PWM

La mayoría de servomotores pueden ser controlados para posicionar su eje de giro en un ángulo dentro del rango de 0-180°. Para determinar la posición del motor se utiliza una señal PWM, cuya frecuencia y ciclo de trabajo difieren según el servo a utilizar, pero por lo regular manejan las características mostradas en la siguiente Figura.

Figura 253. Tipo de señal para controlar los servos convencionales.



Como ya se mencionó, esto no aplica para todos los servos, ya que existen servos que requieren otro tipo de señales para ser controlados. Algunos fabricantes ofrecen servos con los cuales se establece una comunicación serial para determinar la posición. No obstante, todos los actuadores elegidos para el proyecto son servos convencionales, por lo que no es relevante la forma de controlar otros servos.

Se puede realizar una modificación a los servos convencionales para convertirlos en un motor de giro continuo. De esta manera el servomotor se comporta prácticamente como un motor DC con una caja reductora de velocidad. Si se realiza esta modificación el servomotor únicamente requiere de alimentación para iniciar su funcionamiento, y la señal PWM se vuelve prescindible. Dependiendo de las necesidades del sistema será el modo de trabajo de los actuadores adquiridos.

b. **Interfaz controlador-servomotor.** Se utilizó la plataforma de Arduino para realizar la programación del microcontrolador. Como ya se mencionó existen dos formas de operación de los actuadores elegidos para el sistema. En la sección de potencia se explicó el proceso de aislamiento de señales entre el controlador y los actuadores.

Si se utilizará el actuador como un motor de giro continuo únicamente se requiere una señal de control con valor de 1 lógico en el momento en el que se desea que el motor gire. Si se utilizará el servomotor como convencionalmente funciona, se requiere una señal PWM generada por el controlador para los actuadores.

Para programar el controlador lógico se utilizó la plataforma brindada por Arduino, por lo que se requirió utilizar “C” como lenguaje de programación. El Arduino Mega es capaz de generar señales PWM, e incluso existe una librería que permite generar una salida analógica. No obstante, esta librería únicamente permite producir señales de frecuencia de 490Hz y 980Hz, y como ya se explicó, se requiere una frecuencia de aproximadamente 50Hz para controlar el servo. Para solventar este inconveniente existen dos alternativas.

Aparte de utilizar “C” para programar el microcontrolador también se puede utilizar lenguaje ensamblador, y así poder genera señales de distintas frecuencias. Sin embargo, Arduino ofrece una librería especializada para la generación de señales para controlar servomotores. Se realizaron pruebas de esta librería y se pudo observar movimiento en los servomotores. La librería permite tener una resolución de 180, es decir, se pueden manejar 180 posiciones entre 0-180°. En las siguientes ilustraciones se muestran las pruebas realizadas sobre los servomotores. Es importante mencionar que no se obtuvieron las posiciones deseadas con la utilización de la librería, y por inspección visual se pudo verificar que las posiciones resultantes eran cercanas a las deseadas, pero diferían. Más adelante se describirá la estrategia abordada para corregir este inconveniente.

4. **Sistema de control.** La implementación de un sistema de control es necesaria para todo proyecto que involucre el uso de actuadores. La naturaleza del sistema determinará el tipo de sistema de control que se debe desarrollar. Básicamente existen dos tipos de sistemas de control, a lazo abierto y a lazo cerrado. La diferencia entre ambos sistemas radica en que un sistema de control a lazo cerrado posee retroalimentación de la variable a controlar, para poder determinar el error del sistema y actuar con base al mismo.

Figura 254. Diagrama de bloques de un sistema de control a lazo abierto.

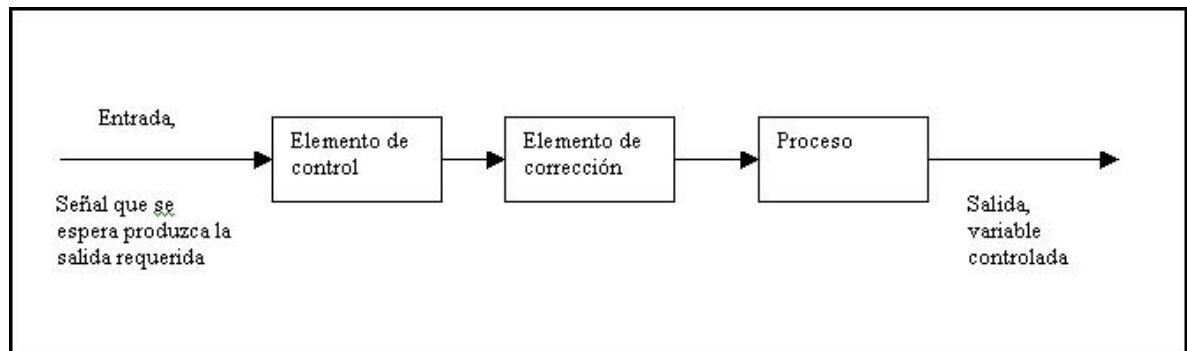
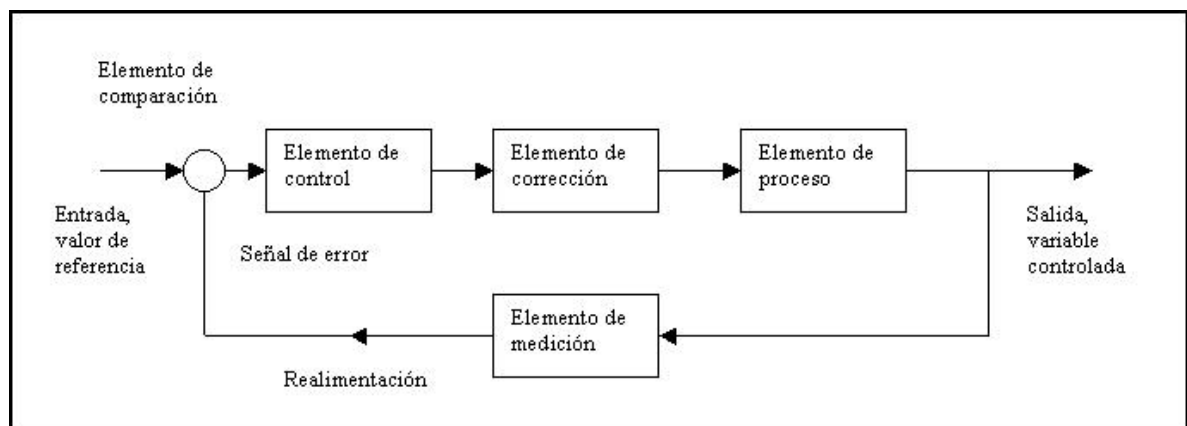


Figura 255. Diagrama de bloques de un sistema de control a lazo cerrado.



a. **Naturaleza del sistema.** Es necesario observar la naturaleza del sistema para determinar el sistema de control necesario para estabilizar el sistema. Normalmente los sistemas que se trabajan son inestables, por lo que se vuelve imprescindible realizar el diseño de un sistema de control. Para que un sistema de control pueda funcionar correctamente es necesario saber en dónde se encuentra el sistema y qué tan alejado se encuentra del valor esperado, por lo que se vuelve imperioso saber el error actual del sistema, que significa manejar una retroalimentación en el sistema. No obstante, si un sistema es estable por naturaleza no es necesario manejar una retroalimentación.

Se utilizó la MPU6050 (Acelerómetro y giroscopio) para monitorear la respuesta del sistema. Se ubicó el componente en una ubicación estratégica y se monitoreó el ángulo de giro del eje del servomotor con las señales de control del Arduino. Se realizó un barrido entre 0-180° y se estudió el error entre el ángulo en el que debía estar el servomotor y el ángulo registrado por la MPU6050. Se realizó la prueba sobre cinco servomotores.

Cuadro 29. Error del sistema para distintos actuadores.

Actuador	Error mínimo	Error máximo	Error promedio
MG995 #1	0.1	18.02	17.2
MG995 #2	0.05	20.2	13.6
Micro Servo #1	0.5	5.3	4.3
Micro Servo #2	0.8	8.64	3.1
HK 15268A	0.3	12.02	7.1

Como se puede observar, el error es considerable para los servomotores MG995, por lo que es necesario abordar el problema para obtener la respuesta deseada. Como ya se había mencionado anteriormente, los servomotores difieren según el fabricante, por lo que el ciclo de trabajo y frecuencia de la señal requerida puede variar entre modelos, e incluso entre variantes del mismo modelo.

La librería del control de servos de Arduino permite modificar los tiempos que representan el ángulo 0 y 180° de la señal PWM generada. De esta manera el ciclo de trabajo de las señales generadas en el barrido entre 0 y 180° oscilará entre los límites determinados por los tiempos impuestos para los ángulos mencionados. Se realizó una calibración para cada uno de los servos con los que se realizaron pruebas, y se monitoreo nuevamente el error con la MPU6050. Tras varias iteraciones se lograron obtener errores promedio menores al 3% para todos los servos.

Cuadro 30. Error del sistema para distintos actuadores.

Actuador	Error mínimo	Error máximo	Error promedio
MG995 #1	0.2	6.4	2.3
MG995 #2	0.15	10.2	1.6
Micro Servo #1	0.05	5.4	1.8
Micro Servo #2	0.4	3.7	1.94
HK 15268A	0.04	9.1	2.32

En el siguiente cuadro se muestran los tiempos en milisegundos para obtener un error menor al 3% para cada uno de los actuadores del sistema.

Cuadro 31. Tiempos para obtener un error menor a 3% para los servomotores del sistema.

Actuador	Tiempo 0° (ms)	Tiempo 180° (ms)
Ojo derecho – Giro Z	700	2305
Ojo derecho – Giro Y	555	2230
Ojo izquierdo – Giro Z	601	2145
Ojo izquierdo – Giro Y	570	2440
Boca	549	2555
Cuello – Giro Z	610	2320
Cuello – Giro Y	590	2345

Continuación cuadro 31

Actuador	Tiempo 0° (ms)	Tiempo 180° (ms)
Cuello – Giro X	575	2450
Cofre 1	550	2325
Cofre 2	555	2330
Cofre 3	601	2345
Cofre 4	570	2410
Subir calavera 1	549	2405
Subir calavera 2	610	2510
Subir calavera 3	590	2345
Subir calavera 4	575	2321

b. **Sistema de control implementado.** Los resultados obtenidos con el monitorio de la MPU6050 nos revelan que nuestro sistema es estable, por lo que no es necesaria la implementación de un sistema de control a lazo cerrado para el proyecto, ya que el sistema logra alcanzar por sí solo la respuesta deseada. La razón principal de este fenómeno es que los servomotores poseen un sistema de control interno, que les permite ubicarse en una posición según la señal PWM que tengan como entrada.

Todo esto nos hace concluir que es necesario un sistema de control a lazo abierto para realizar el control de los actuadores del sistema y obtener la respuesta deseada en el mismo. En la siguiente Figura se muestra el diagrama del sistema de control del proyecto.

Figura 256. Diagrama de bloques del sistema de control del proyecto.



5. **Pruebas y correcciones.** Luego de realizar las pruebas de funcionamiento y obtener un error menor al 3% en todos los actuadores se procedió a realizar pruebas de los mismos en sus respectivos mecanismos. Ninguno de los servomotores requiere un rango de giro de 180°, ya que ninguno de los mecanismos lo necesita. Esto se pudo verificar al instalar cada actuador en su respectivo mecanismo y realizar pruebas de movimiento.

Para reducir la probabilidad de error en el sistema se decidió modificar los intervalos de ciclo de trabajo de las señales PWM generadas por el Arduino, para que su rango de movimiento incluyera únicamente la totalidad de ángulos necesarios para el funcionamiento de los distintos mecanismos del sistema. Además de

reducir los riesgos en el sistema, esto permitiría manejar una resolución de 180 posiciones entre la posición inicial y final de los distintos mecanismos.

Algunos de los servomotores presentaron problemas si su tiempo de posición inicial era muy cercano al tiempo de posición final, por lo que para esos actuadores fue necesario tomar en cuenta los valores entre 0-180 que correspondían al rango de movimiento requerido para el mecanismo. En la siguiente Cuadro se muestran los tiempos establecidos para el funcionamiento de cada servomotor según su mecanismo, su rango de operación y la posición del mecanismo según la posición del servomotor. El aspecto rango de operación se refiere a las posiciones que se pueden manejar con la librería de servo del Arduino. Se procuró tener la mayor cantidad de resolución de posiciones posibles, para poder realizar movimientos más complejos.

Cuadro 32. Especificaciones de funcionamiento de cada motor en los distintos mecanismos.

Actuador	Tiempo posición inicial (ms)	Tiempo posición final (ms)	Rango de operación	Detalle
Ojo Derecho – Giro Y	1000	2050	0-150	Hacia 150 -> Giro sentido positivo
Ojo Derecho – Giro Z	1000	2150	45-130	Hacia 130 -> Giro sentido positivo
Ojo Izquierdo – Giro Y	565	2450	90-180	Hacia 180 -> Giro sentido positivo
Ojo Izquierdo – Giro Z	700	2575	115-180	Hacia 115 -> Giro sentido positivo
Boca	549	2405	0-180	Hacia 180-> Boca cerrada
Cuello – Giro X	610	2510	30-150	Hacia 150 -> Giro sentido positivo
Cuello – Giro Y	590	2345	50-180	Hacia 180 -> Giro sentido positivo
Cuello – Giro Z	575	2321	0-180	Hacia 0 -> Giro sentido positivo
Cofre 1	550	2325	0-90	Hacia 0 -> Cofre abierto
Cofre 2	555	2330	0-90	Hacia 0 -> Cofre abierto
Cofre 3	601	2345	91-180	Hacia 180 -> Cofre abierto
Cofre 4	570	2410	91-180	Hacia 180 -> Cofre abierto
Subir calavera 1	549	2405	0-90	Hacia 0 -> Sube calavera
Subir calavera 2	610	2510	0-90	Hacia 0 -> Sube calavera
Subir calavera 3	590	2345	91-180	Hacia 180 -> Baja calavera
Subir calavera 4	575	2321	91-180	Hacia 180 -> Baja calavera

G. ANÁLISIS DE COSTOS

El objetivo principal del megaproyecto fue desarrollar animatrónicos de bajo costo, por lo que es necesario realizar una comparación entre el precio de instalación de un animatrónico desarrollado por los diferentes distribuidores disponibles y el costo de fabricación del animatrónico realizado.

1. **Costo del animatrónico.** La mayoría de elementos utilizados para la realización del animatrónico fueron adquiridos en el mercado local, no obstante, se decidieron importar algunos componentes, por facilidad de adquisición o porque el mercado local no ofrecía los mismos. En la siguiente

Cuadro se muestra la totalidad de materiales utilizados en el ensamble del animatrónico, así como el costo de cada uno y la inversión total.

Cuadro 33. Costo total del animatrónico.

Cantidad	Descripción material	Distribuidor en Guatemala (recomendado)	Precio	Subtotal
Elementos de sujeción				
2	Barra dentada M3x60	Tornituercas / 24340581	Q 25.00	Q 50.00
40	Tornillo allen cabeza plana M3x20	Tornituercas / 24340582	Q 0.11	Q 4.40
40	Tornillo allen cabeza plana M3x50	Tornituercas / 24340583	Q 7.93	Q 317.20
80	Tuerca de seguridad M3	Tornituercas / 24340586	Q 0.25	Q 20.00
80	Roldana M3	Tornituercas / 24340586	Q 0.05	Q 4.00
80	Washa M3	Tornituercas / 24340586	Q 0.05	Q 4.00
40	Tornillo allen cabeza plana M4x20	Tornituercas / 24340585	Q 0.31	Q 12.40
40	Tornillo allen cabeza plana M4x50	Tornituercas / 24340585	Q 0.45	Q 18.00
80	Tuerca de seguridad M4	Tornituercas / 24340586	Q 0.25	Q 20.00
80	Roldana M4	Tornituercas / 24340586	Q 0.05	Q 4.00
80	Washa M4	Tornituercas / 24340586	Q 0.05	Q 4.00
30	Uniones servos	Importado	Q 5.00	Q 150.00
Actuadores				
2	Servo/Torque4Kg	Electrónica SMD / 24333606	Q 95.00	Q 190.00
4	Micro Servo	Electrónica SMD / 24333607	Q 65.00	Q 260.00
10	Servo/Torque12Kg	Electrónica SMD / 24333607	Q 125.00	Q 1,250.00
Control				
1	Arduino MEGA	Electrónica SMD / 24333607	Q 800.00	Q 800.00
12	Optoacoplador doble, MCT66	Electrónica SMD / 24333607	Q 5.00	Q 60.00
Materia prima				
1	Cráneo de tamaño real	Elemento importado	Q 600.00	Q 600.00
1	Ojos decorativos para Halloween	Elemento importado	Q 150.00	Q 150.00

Continuación cuadro 33

1	1 Kg ABS 3mm	Elemento importado	Q 300.00	Q 300.00
1	Plancha DUROPOR 100X50X3CM	Platino/2410-9696	Q 21.10	Q 21.10
2	Plancha ERTALON 10mm grosor 500x300mm	Aceros Suecos/22102100	Q 158.00	Q 316.00
10	Plancha MDF 6mm grosor 600x400mm	Madera Blanda	Q 35.00	Q 350.00
2	Plancha Acrílico 3mm grosor 600x400mm	Aceros Suecos/22102100	Q 85.00	Q 170.00
1	Un cuarto de galón de cola blanca	CEMACO	Q 20.00	Q 20.00
Fuente de alimentación				
1	Fuente de 12V/15 ^a	Electrónica SMD / 24333607	Q 230.00	Q 230.00
1	Fuente de 12V/2 ^a	Electrónica SMD / 24333607	Q 120.00	Q 120.00
10	Regulador de Voltaje 317T	Electrónica SMD / 24333607	Q 5.00	Q 50.00
7	Regulador de Voltaje 7805	Electrónica SMD / 24333607	Q 5.00	Q 35.00
30	Capacitor 0.33Uf	Electrónica SMD / 24333607	Q 1.00	Q 30.00
30	Capacitor 0.1Uf	Electrónica SMD / 24333608	Q 1.00	Q 30.00
30	Resistencia de 220 ohms	Electrónica SMD / 24333608	Q 0.50	Q 15.00
30	Resistencia de 10kohms	Electrónica SMD / 24333608	Q 0.50	Q 15.00
30	Resistencia 3.3k ohms	Electrónica SMD / 24333608	Q 0.50	Q 15.00
500	Headers de doble contacto	Electrónica SMD / 24333608	Q 0.25	Q 125.00
30	Bornera doble	Electrónica SMD / 24333608	Q 2.50	Q 75.00
150	Terminal de pin	CELASA	Q 0.90	Q 135.00
4	Cable TSJ (PIE)	CELASA	Q 5.00	Q 20.00
1	Espiga aterrizada	CELASA	Q 5.00	Q 5.00
1	Caja de registro waterproof (25mmx15mm)	CELASA	Q 250.00	Q 250.00
20	Cable para protoboard (metro) color rojo	Electrónica MEGACEF / 24395521	Q 2.59	Q 51.80
20	Cable para protoboard (metro) color negro	Electrónica MEGACEF / 24395522	Q 2.59	Q 51.80
20	Cable para protoboard (metro) color azul	Electrónica MEGACEF / 24395523	Q 2.59	Q 51.80

Continuación cuadro 33

5	Terminales dobles (docena)	Electrónica MEGACEF / 24395523	Q 10.00	Q 50.00
Otros				
2	Matriz de LED RGB 8x8	Electrónica SMD / 24333608	Q 85.00	Q 170.00
		PRECIO TOTAL		Q 6,630.50

Como se puede observar, se realizó una inversión total de Q6,630.50, equivalente a \$867.67. Es importante mencionar que no se tomaron en cuenta el consumo eléctrico de los equipos utilizados para manufacturar, ya que el proceso se realizó en las instalaciones de la universidad.

2. Precio de un animatrónico. En el mercado existen diversos fabricantes de calaveras animatrónicas. No obstante, es necesario realizar una comparación entre el costo del animatrónico desarrollado con un animatrónico distribuido con las mismas características. La empresa Skulltronix ofrece una calavera con características similares a las del animatrónico desarrollado.

Figura 257. Calavera animatrónica desarrollada por Skulltronix.¹⁵

El animatrónico desarrollado por Skulltronix tiene los mismos movimientos que el desarrollado en el presente proyecto. La compañía ofrece el animatrónico tematizado y preparado para funcionar. El precio de venta es \$5,999.00.

¹⁵ Imagen obtenida de <http://www.skulltronix.com/blackbeardschest.shtml>

Figura 258. Calavera animatrónica desarrollada por Skulltronix.¹⁶



3. **Comparación.** Evidentemente existe una diferencia sustancial entre el precio de venta de un animatrónico con las mismas características que el desarrollado con el costo del mismo. La diferencia es mayor a \$5,000. En primera instancia se puede afirmar que se cumplió el objetivo de desarrollar un animatrónico de bajo costo, no obstante, es necesario analizar factores que influyen en el precio de venta de la calavera.

La calavera desarrollada por Skulltronix se encuentra tematizada y tiene un aspecto totalmente acorde a la ubicación en la que se encontrará el animatrónico, contrario a la apariencia del proyecto desarrollado. La calavera realizada cuenta con un aspecto rústico y aún deben ser ocultados parte de los mecanismos. Sin embargo, el IRTRA cuenta con personal encargado de la tematización de las distintas instalaciones de su parque, por lo que no es un problema que el animatrónico aún deba ser tematizada.

Los controladores lógicos incorporados en el animatrónico desarrollado por Skulltronix son compatibles con diversas plataformas enfocadas en la programación de atracciones de este tipo. Sin embargo, el IRTRA no debe preocuparse por la programación del animatrónico desarrollado, ya que esta será desarrollada por estudiantes de la universidad.

Todos estos factores convergen en la conclusión de que se cumplió con el objetivo principal del proyecto, que fue desarrollar una calavera animatrónica con un costo menor al precio de venta de un animatrónico con las mismas características.

¹⁶ Imagen obtenida de <http://www.skulltronix.com/blackbeardschest.shtml>

Figura 259. Comparación entre los cráneos de ambos animatrónicos.



VII. MÓDULO DE TORSO ANIMATRÓNICO

A. RESUMEN

El objetivo del megaproyecto “Animatronics”, módulo “Torso animatrónico” fue construir un prototipo funcional de bajo costo de un torso para un robot humanoide que emulará el comportamiento humano.

Para esto se evaluaron diseños de humanoides de plataforma abierta como el Inmoov y Poppy Robot para utilizarlos como base para el torso animatrónico, luego se determinó la fuerza mínima para permitir la rotación del torso además de evaluar los mecanismos de transmisión de potencia, y basándose en estos resultados se determinó el material que soportará estos requerimientos y fuera de bajo costo; con el material seleccionado se procedió a manufacturar y construir el torso para finalmente se implementó un sistema de control que permitiera girar al torso hacia la posición angular deseada.

Como resultado se obtuvo un prototipo de torso animatrónico basado en Inmoov, fabricado con ABS y MDF utilizando impresión 3D y corte láser creando una estructura que soportaba las cargas externas establecidas para la aplicación y emulaba el movimiento de rotación humana permitiendo girar hacia determinada posición angular con un controlador de lazo cerrado implementado en Arduino. El costo del prototipo fue de Q 3938.20.

B. INTRODUCCIÓN

A lo largo de la historia el hombre siempre ha buscado imitar la naturaleza desde el trabajo que realiza la más mínima célula hasta el complejo trabajo de los músculos, huesos y terminaciones nerviosas que hace posible las actividades de nuestro diario vivir.

A raíz de esto el hombre ha buscado a través de la ingeniería y el avance tecnológico desarrollar e implementar sistemas que puedan imitar al cuerpo humano y sus funciones con el objetivo de lograr desde una animación para el entretenimiento hasta prótesis complejas para sustituir miembros del cuerpo humano.

A partir de este avance tecnológico se ha desarrollado el campo de la robótica, y gracias a la robótica han surgido los animatrónicos que son robots que emulan el comportamiento de los seres vivos siguiendo su diseño anatómico; en los últimos años la industria de los animatrónicos se ha extendido por todo el mundo, desde la industria cinematográfica hasta los parques de diversiones y restaurantes. Cada día presentan comportamientos más realistas con movimientos más precisos y suave que van desde una simple calavera mueve la quijada, animales como loros y monos que hablan hasta personajes famosos como Abraham Lincoln capaces de interactuar con las personas.

Por esta razón, se decidió investigar, desarrollar y construir un prototipo de robot humanoide o un animatrónico basado en la anatomía de un humano que puede emular sus movimientos de forma realista y capaz de interactuar con las personas de su alrededor.

Además, se busca impulsar el desarrollo del primer animatrónico guatemalteco de bajo costo que no sólo esté al alcance de las grandes empresas y multinacionales sino pueda ser accesible para empresas en crecimiento como restaurantes y museos; también se busca crear nuevas oportunidades dando el primer paso para abrir un nuevo mercado en Guatemala y Centroamérica, e incluso Latinoamérica al establecer una planta de manufactura de animatrónicos a mayor escala.

Este proyecto consistió en el diseño y construcción de un prototipo de bajo costo de un torso para un animatrónico humano capaz de emular el movimiento de rotación. Para llevar a cabo esto se realizaron diferentes tareas: análisis y selección de diseños existentes de humanoides, evaluación y análisis de mecanismos para transmisión de potencia, selección de actuadores para poder emular los movimientos designados, selección de material, construcción y manufactura de la estructura y finalmente la implementación de un sistema de control para lograr movimientos de rotación hacia posiciones deseadas.

El diseño y construcción del torso se realizó en conjunto con otros módulos que consistían en el diseño y construcción de los brazos, reconocimiento de gestos y creación de rutinas de movimiento para emular el comportamiento humano, con la finalidad de integrarlo todo para obtener como resultado final un humanoide de medio cuerpo basado en un pirata.

C. OBJETIVOS

1. General

- Construir un prototipo funcional de un animatrónico de bajo costo que emule el comportamiento de un humano.

2. Específicos

- Modificar y analizar diseños existentes de torsos humanoides.
- Analizar esfuerzos y cargas críticas para seleccionar los actuadores necesarios.
- Manufacturar y construir la estructura mecánica de un torso humanoide.
- Diseñar, construir e implementar un sistema de control para emular movimientos humanos del torso de la estructura construida.
- Emular el movimiento de rotación en el torso del prototipo animatrónico.
- Integrar el módulo del torso a los demás módulos.

E. ANÁLISIS ESTRUCTURAL

Debido a la restricción de tiempo para diseño de mecanismos y construcción del animatrónico se decidió basarse en diseños existentes y realizar las modificaciones pertinentes para que esté cumpliera con los objetivos planteados.

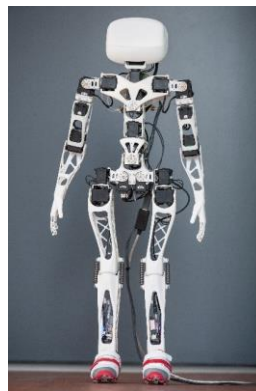
Para esto se investigaron diferentes robots humanoides, a continuación, se describen los modelos investigados.

1. **Poppy Robot.** El Poppy Robot es un proyecto de plataforma abierta que nació en 2012 como parte de la tesis doctoral de Matthieu Lapeyre bajo supervisión de Pierre Yves Oudeyer, este proyecto fue desarrollado en *Flowers Laboratory* del *Inria (Instituto Nacional de Investigación de Informática y Automática) en Bordeaux*, Francia (INRIA, 2016).

Este proyecto de investigación fue desarrollado con el objetivo de explorar el rol del cuerpo y las propiedades morfológicas en la cognición, y el aprendizaje de habilidades motoras, obteniendo como resultado un robot humanoide de complejidad y costo accesible que se puede construir desde la facilidad de una casa. (INRIA, 2016).

La fabricación de este humanoide se realiza con impresoras 3D, que es una técnica de producción accesible y barata, aunque debido a la curvatura de las piezas y geometría de algunas piezas estas no pueden ser impresas en cualquier impresora 3D, se requiere tecnología de estereolitografía o SLA (por sus siglas en inglés *Stereolithography Apparatus*).

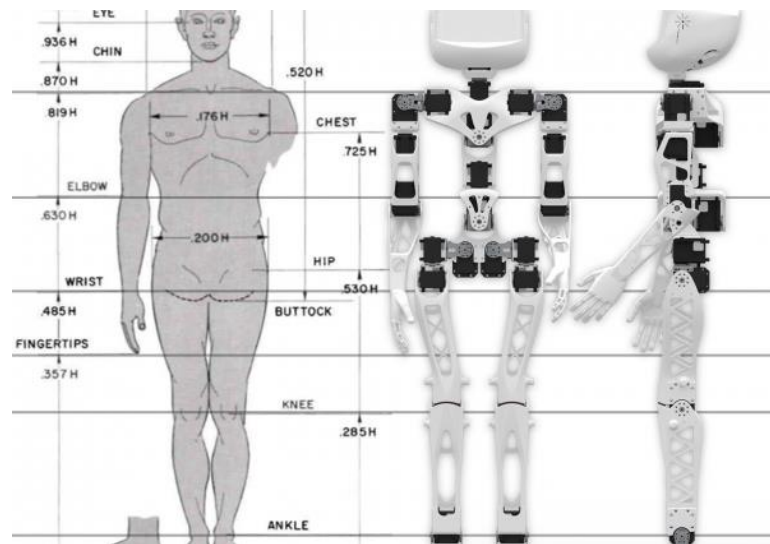
Figura 260. Humanoide Poppy Robot



(INRIA, 2016)

El Poppy Robot es un humanoide que fue diseñado de acuerdo a las proporciones de la anatomía humana como se puede observar en la Figura 260, aunque no está hecho a escala real de un humano. Su altura es de 84 cm (INRIA, 2016).

Figura 261. Diseño anatómico de Poppy Robot

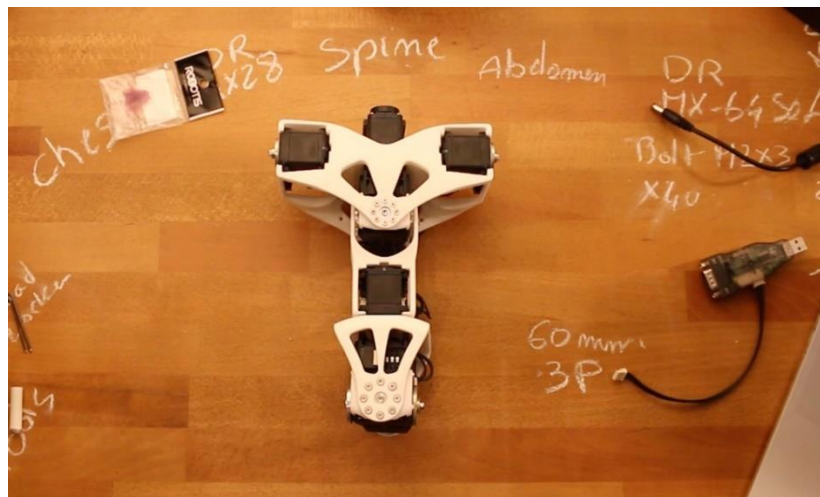


(INRIA, 2016).

El tronco de Poppy Robot tiene 4 grados de libertad lo que le permite realizar los siguientes movimientos:

- Movimiento de rotación de torso
- Inclinación lateral del torso.
- Flexión y extensión del torso.
- Inclinación lateral de hombros.

Figura 262. Tronco ensamblado de Poppy Robot



(INRIA, 2016).

Como se puede observar en la Fig. 262, el tronco de Poppy Robot no requiere de mecanismos para la transmisión de potencia, utilizan los actuadores directos en las articulaciones, esto se debe a que este

humanoide por su tamaño reducido y estructura liviana no requiere de tanto torque para poder realizar sus movimientos (INRIA, 2016).

2. **Inmoov.** Es un robot de tamaño real, con dimensiones de acuerdo a una persona de 1.80 m de estatura, además es de plataforma abierta desarrollado por el escultor y diseñador francés Gael Langevin, todas las partes de este robot son hechas en una impresora 3D de tecnología de deposición de material o FFF por sus siglas en inglés (*Fused Filament Fabrication*) con un área de trabajo de 12x12x12 cm.

El Inmoov puede fabricarse con filamento de ABS (acrilonitrilo butadieno estiro) o filamento PLA (ácido poliláctico) que es un polímero biodegradable.

Figura 263. Robot humanoide Inmoov



(Langevin, 2012)

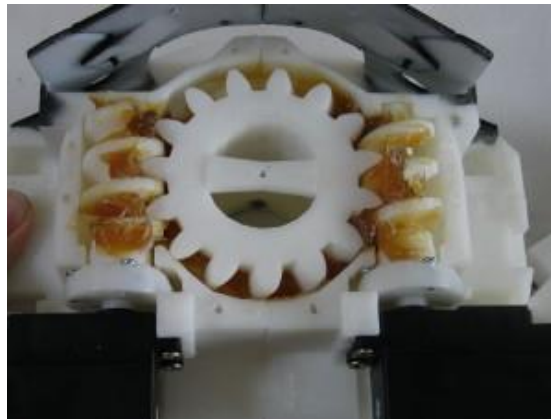
Debido a que el Inmoov es de tamaño real y su escala es 1 a 1, está sometido cargas más grandes por lo implementa algunos mecanismos para aumentar la transmisión de potencia y poder realizar sus movimientos reduciendo el torque requerido en los actuadores.

El tronco del Inmoov tiene 2 grados de libertad que permite realizar los siguientes movimientos:

- Inclinación lateral del torso.
- Rotación del torso.

El torso del Inmoov usa 2 tornillos sinfín y un engranaje helicoidal (Fig. 263) para aumentar la potencia del eje que dará la rotación del tronco, ya que este soporta toda la carga del humanoide.

Figura 264. Mecanismo de Inmoov para rotación del torso



(Langevin, 2012).

3. Selección de diseño humanoide para torso. Para elegir al humanoide que mejor se adapta a los objetivos presentados en el proyecto se realizó una comparación entre Inmoov y Poppy Robot, se realizó la comparación solo entre estos dos modelos dadas las limitantes de presupuesto, tiempo y manufactura de los elementos; estos humanoides son de bajo costo y se pueden construir utilizando impresoras 3D por la que son opciones factibles para cumplir el alcance del proyecto.

Para realizar la comparación se tomaron en cuenta aspecto como: el diseño anatómico, la estructura, costo, técnica de manufactura, facilidad de implementación y robustez en el diseño.

Cuadro 35. Comparación entre el torso de Poppy Robot e Inmoov

Criterio de comparación	<i>Poppy Robot Torso</i>	<i>Inmoov Torso</i>
Escala (Respecto a humano promedio)	1:2.5	1:1
Tecnología de Impresión 3D	SLA	FFF
Costo de manufactura	Alto	Medio
Mecanismo de transmisión de potencia	No	Sí
Grados de libertad	4	2
Desgaste de actuadores	Alto	Bajo
Robustez en el diseño	Bajo	Alto
Diseño anatómico	Simple	Complejo

Con base en el Cuadro 35, se eligió el diseño del Inmoov, dado que la escala es 1:1 respecto a un humano de 1.80 m de estatura y no es necesario modificar el tamaño de las piezas, la tecnología de manufactura FFF se facilita dado que la Universidad del Valle posee impresoras con esta tecnología, utiliza mecanismos para aumentar la potencia transmitida lo que reduce el torque necesario en los actuadores y disminuye el desgaste

en estos, aunque Inmoov posee menos grados de libertad que Poppy Robot estos permiten el movimiento de rotación del torso, y por último el diseño anatómico del torso de Inmoov se asemeja más al ser humano que el diseño de Poppy Robot.

4. Estructura del torso basado en Inmoov. Para crear la estructura del torso humanoide se tomó como base al robot Inmoov, se utilizaron los elementos proporcionados en la página oficial <http://inmoov.fr/> de los siguientes módulos:

- *Shoulder and Torso*
- *Top Stomach*
- *Mid Stomach*

Se realizaron modificaciones a los elementos originales en el *software* de diseño mecánico Inventor Professional 2015 para simplificar la construcción, manufactura de piezas y para poder realizar el análisis de esfuerzos del torso.

A continuación, se presenta los módulos con las modificaciones realizadas en el *software*.

a. Torso y hombros

Figura 265. Vista isométrica del torso ensamblado

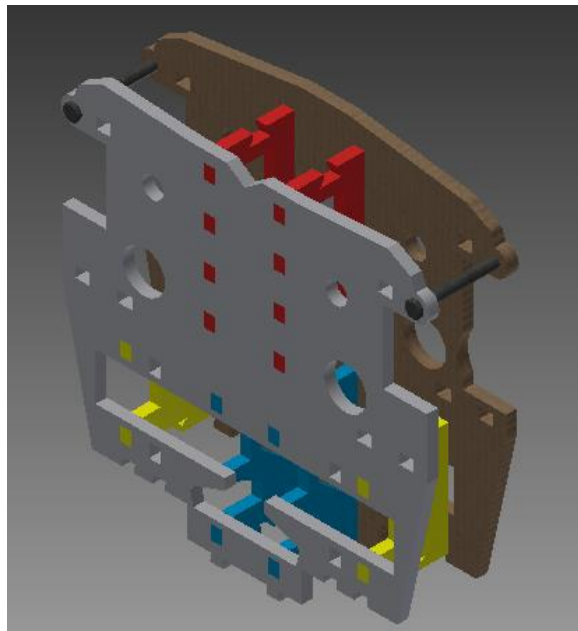


Figura 266. Vista frontal del torso ensamblado

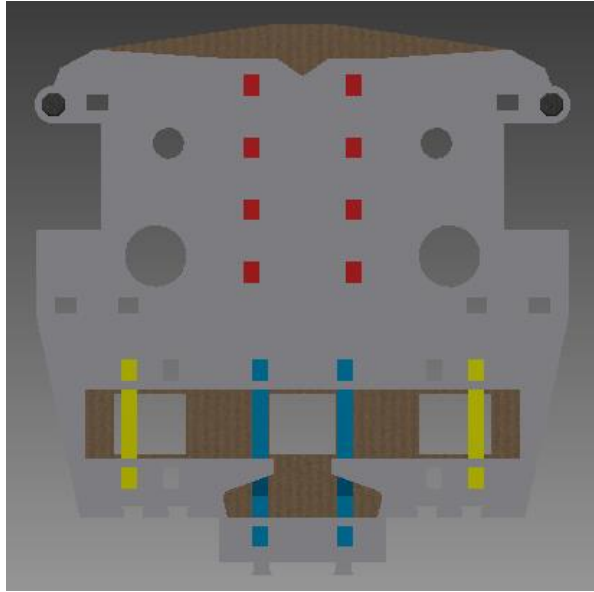


Figura 267. Vista trasera del torso ensamblado

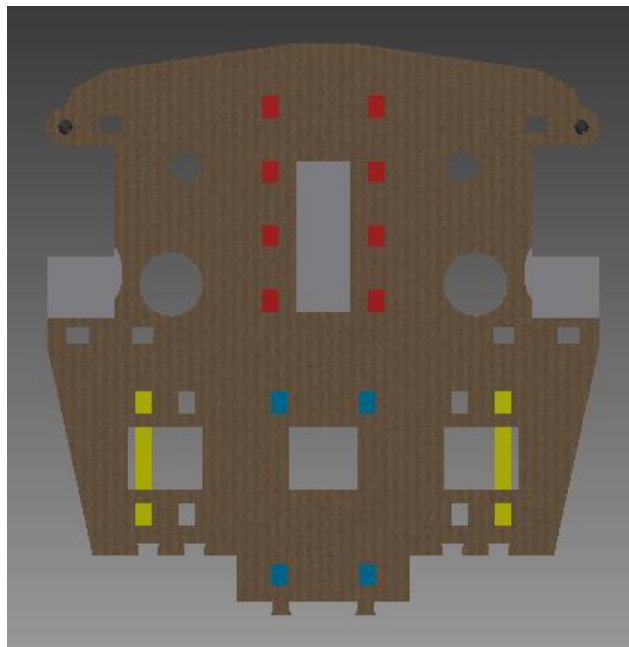
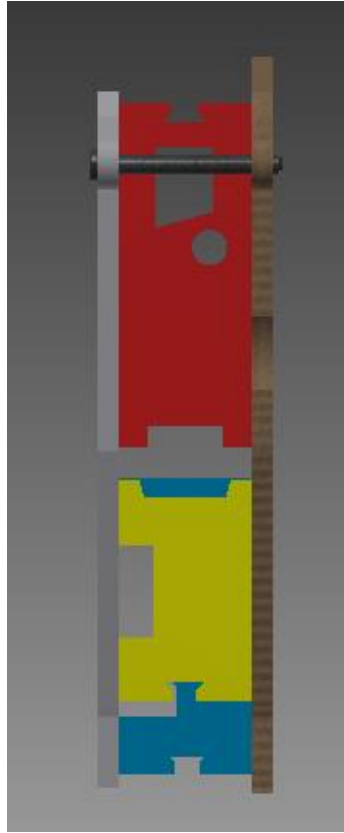
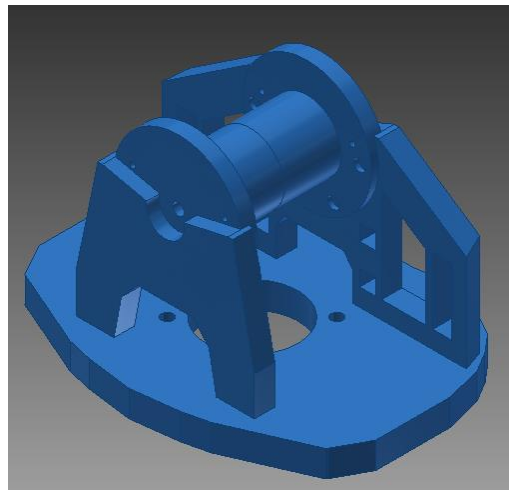


Figura 268. Vista lateral del torso ensamblado



b. Estómago superior

Figura 269. Vista isométrica del estómago parte superior



c. Estómago medio

Figura 270. Vista isométrica del estómago medio

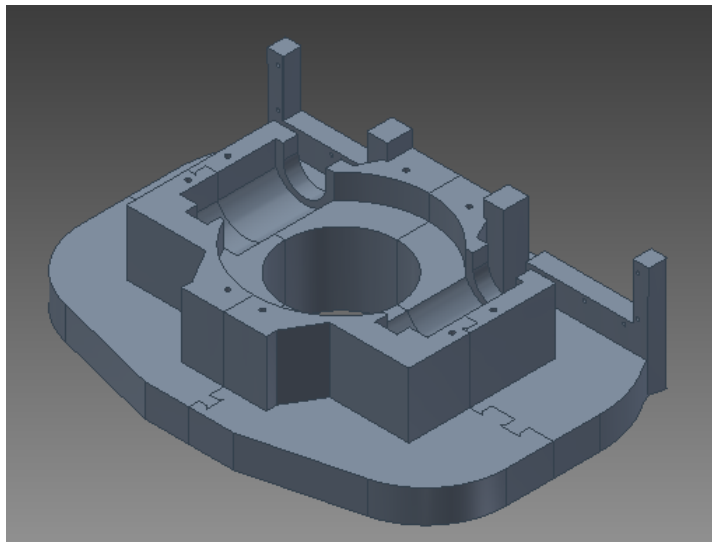


Figura 271. Vista superior del estómago medio

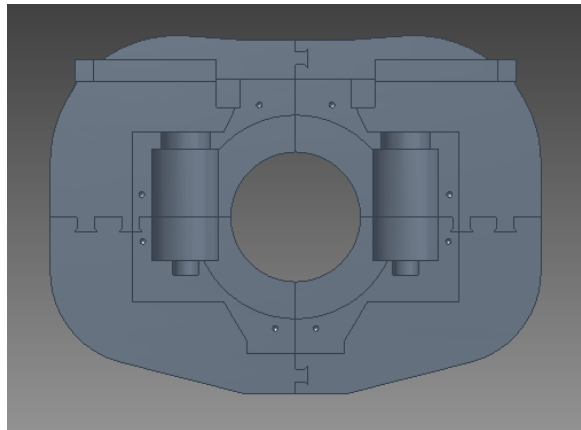
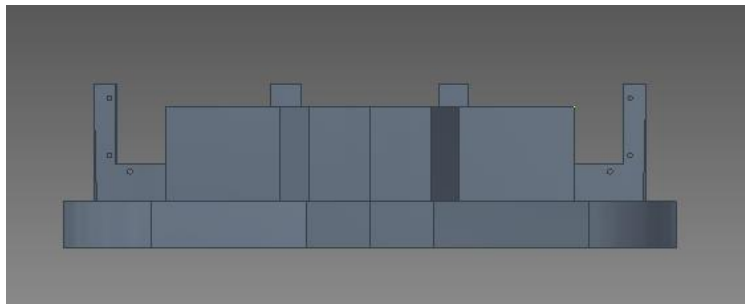
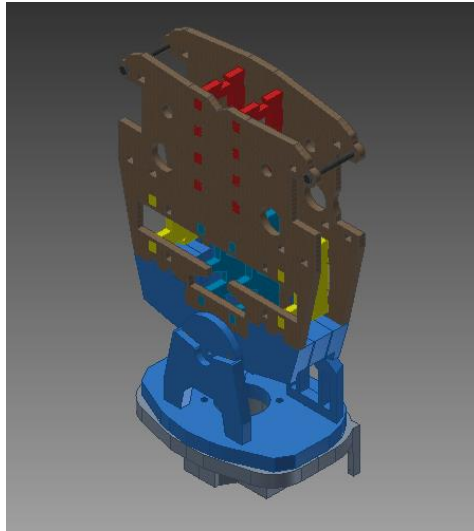


Figura 272. Vista frontal del estómago medio



d. Torso y estómago ensamblado

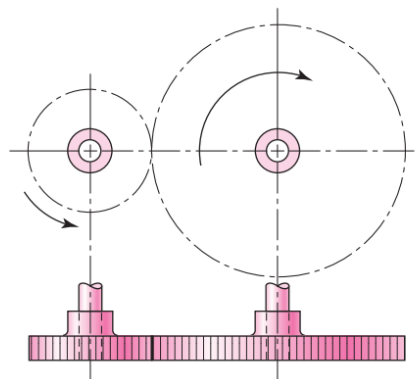
Figura 273. Vista isométrica del torso y estómago ensamblado



5. Mecanismo de rotación del torso. Para el mecanismo de rotación se evaluaron dos mecanismos de transmisión de potencia, el primero fue un par de ejes con engranes rectos y el segundo un tornillo sinfín.

La transmisión de potencia con engranes rectos se utiliza en ejes paralelos, y superficies coplanares, son altamente eficientes (98%). Los engranes rectos son comunes y los más sencillos de fabricar sin embargo su relación máxima torque en una etapa es de 1:10.

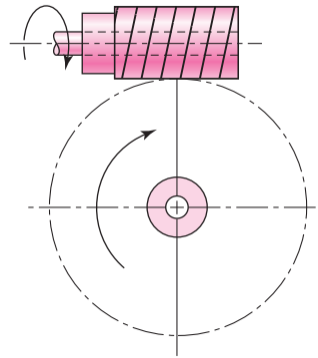
Figura 274. Transmisión con engranes rectos



(Budynas, 2008)

La transmisión utilizando tornillos sinfín permite transmitir potencia entre ejes que no se cruzan, además permite una relación de torque mayor a 1:10 en una sola etapa provocando una alta reducción de velocidad. Aunque presentan una eficiencia baja (40% a 85%).

Figura 275. Transmisión con tornillo sinfín

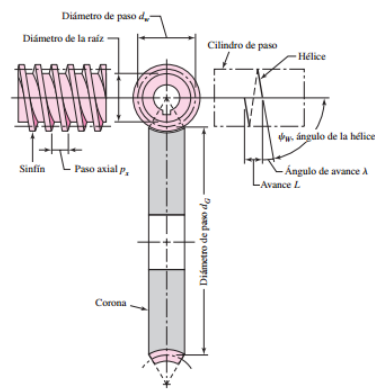


(Budynas, 2008)

Debido a la aplicación a escala real del torso animatrónico se requiere un torque muy alto hacer rotar el eje, la rotación del torso de un humano no requiere altas velocidades se decidió trabajar con el mecanismo de tornillo sinfín. Por otra parte, el espacio para el mecanismo es reducido por lo que no es factible realizar trenes de engranajes de más de una etapa, por lo que resultaba más difícil alcanzar el torque necesario con una sola etapa de engranajes rectos.

Se presenta la nomenclatura utilizada para engranes de tornillos sinfín para familiarizarse con los símbolos del mecanismo.

Figura 276. Nomenclatura de tornillo sinfín



(Budynas, 2008)

- Paso axial del tornillo sinfín (p_x): distancia de un punto en la rosca del sinfín, hasta el mismo punto en la rosca siguiente, medido en dirección axial en el cilindro de paso.
- Paso circular de la corona (p): distancia de un punto sobre un diente al mismo punto en el diente siguiente, medido en el círculo de paso.

Ecuación 1 Paso circular de la corona

$$p = \frac{\pi d_G}{N_G}$$

Donde:

N_G : número de dientes en la corona

d_G : diámetro de paso de la corona

- Paso diametral de la corona (P_d): relación entre número de dientes y diámetro de paso.

Ecuación 2 Paso diametral de la corona

$$P_d = \frac{N_G}{d_G}$$

- Número de hilos (N_w): se considera como el número de dientes del sinfín.
- Avance (L): distancia axial que recorrería un punto del sinfín cuando gira una revolución.

Ecuación 3 Avance

$$L = p_x N_w$$

- Ángulo de avance (λ): ángulo entre la tangente de la rosca del sinfín y la línea perpendicular al eje del mismo.

Ecuación 4 Ángulo de avance

$$\tan(\lambda) = \frac{L}{\pi d_w}$$

Después de elegir el mecanismo de tornillo sinfín se hizo un análisis al mecanismo existente, este fue recreado en Inventor Professional 2015 basado en las dimensiones originales del Inmoov para posteriormente verificar si cumplía con el requerimiento de torque.

Cuadro 36. Parámetros del tornillo sinfín y engrane del mecanismo de rotación del Inmoov

Número de hilos sinfín (N_w)	2
Paso axial sinfín (p_x)	17.8 mm
Avance del sinfín (L)	17.8 mm
Diámetro de paso del sinfín (d_w)	29 mm
Ángulo de avance del sinfín (λ)	10.9 °
Dientes de la corona (N_g)	15
Diámetro de paso de la corona (d_g)	84 mm
Módulo métrico (m)	5.66 mm
Distancia entre centros (C)	56.5 mm
Ángulo de presión (ϕ)	20 °

Los parámetros del Cuadro 36 se ingresaron en *Design Accelerator* de Inventor Professional 2015 para crear el mecanismo de rotación tornillo sinfín – engranaje.

Figura 277. Creación de mecanismo basado en los parámetros del Cuadro 36

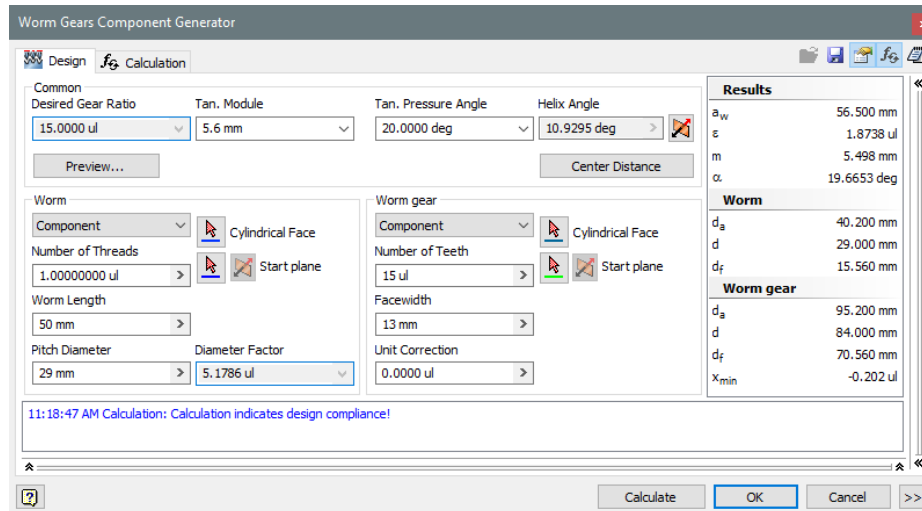
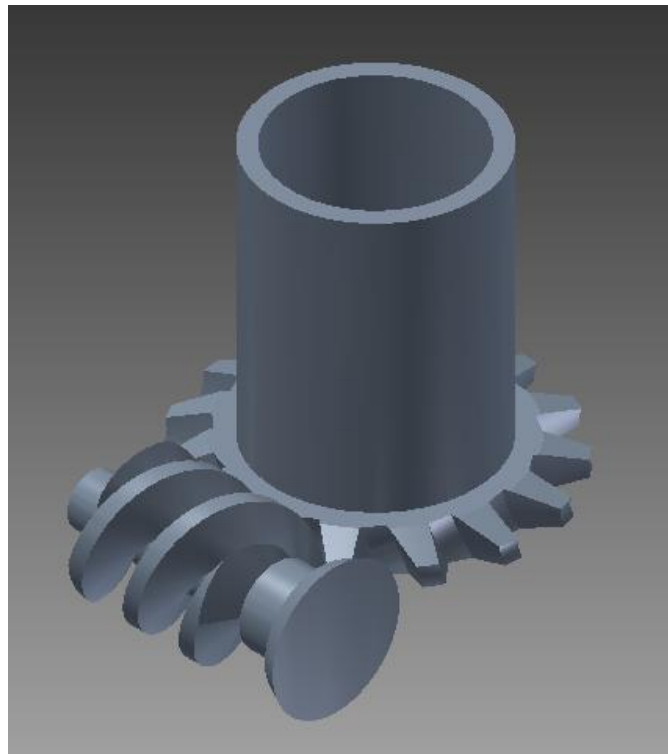


Figura 278. Mecanismo de rotación de tornillo sinfín.



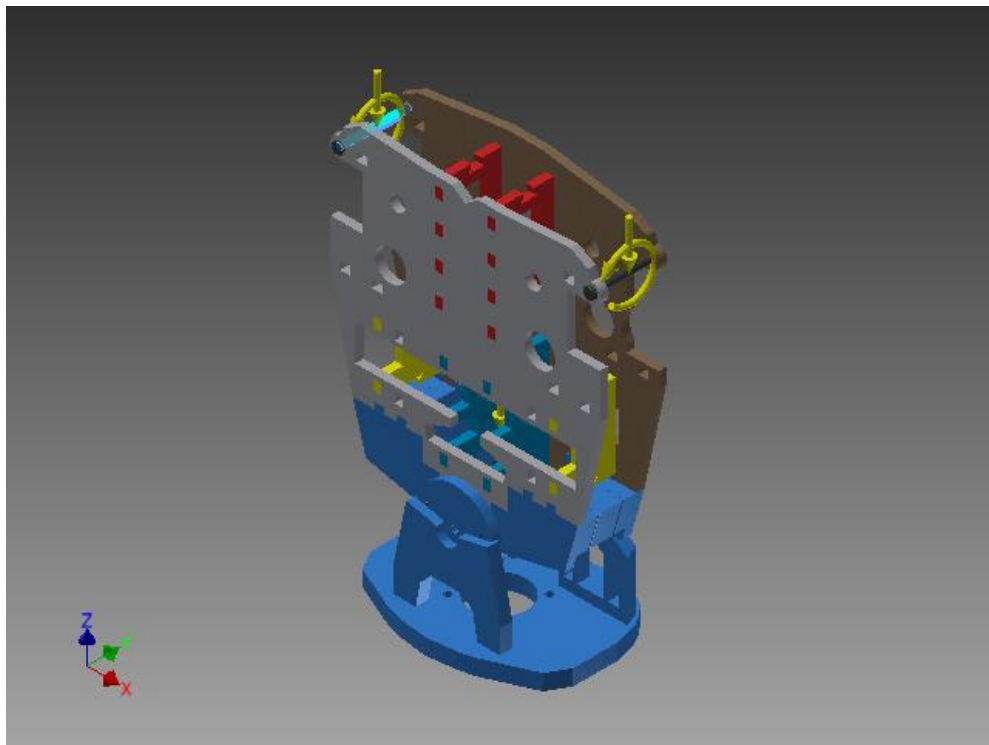
6. Fuerza y torque necesario para rotación del torso. Para determinar el torque necesario para lograr la rotación del torso se calculó la fuerza resultante en la base del estómago superior, con esta fuerza se encontró la fuerza de fricción ejercida entre el estómago medio y el estómago superior, basándose

en la fuerza de fricción entre las superficies del estómago se encontró el torque utilizando el radio del eje de rotación.

Se utilizó la fuerza de fricción generada entre las superficies porque es la fuerza que debe vencer el mecanismo para salir del estado de reposo y moverse.

Para esto se aplicaron la fuerzas y momentos externos generados por el peso de los brazos en los pernos que unen cada brazo al torso como se puede observar en la Fig. 279; para esto se obtuvieron las masas de los brazo derecho e izquierdo utilizando una balanza digital obteniendo una masa de 1.86 Kg para el brazo derecho y 1.24 Kg para el brazo izquierdo, además se consideró una carga de 1 Kg por brazo.

Figura 279. Fuerzas y momentos generados por los brazos aplicados al torso



Cuadro 37. Fuerzas y momentos externos aplicados al torso

	Carga Brazo Derecho (N)	Carga Brazo Izquierdo (N)	Momento generado por brazo derecho (N*m)	Momento generado por brazo izquierdo (N*m)
Vector X	0	0	11.22	12.09
Vector Y	0	0	0	0
Vector Z	-28.06	-21.97	0	0

* Nota: El marco de coordenadas utilizado para definir los momentos y fuerzas es el marco de la Fig. 29.

Luego se determinó la fuerza resultante en la base del estómago superior utilizando el método de elementos finitos de Inventor Professional 2015, tomando en cuenta las densidades de los materiales de cada elemento (ABS, MDF, Acero) para considerar el peso de la estructura.

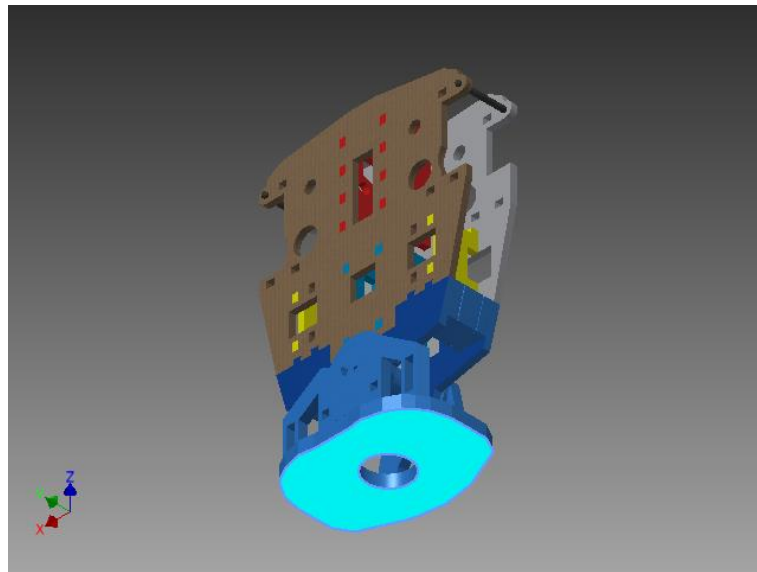
Cuadro 38. Densidad de materiales utilizados en estructura del torso

Material	Densidad
ABS Plástico	1.06 g/cm ³
MDF (<i>Medium Density Fiberboard</i>)	0.8 g/cm ³
Acero	7.8 g/cm ³

Cuadro 39. Propiedades físicas del torso

Masa	2.8426 kg
Área	7,307.93 cm ²
Volumen	2,974.86 cm ³
Centro de gravedad	X= 0.000708717 mm Y= 1.92722mm Z= 175.179 mm

Figura 280. Área donde se calculó la fuerza resultante de la estructura



Cuadro 40. Fuerzas y momentos resultantes obtenidos en la simulación de Inventor Professional

	Fuerza de reacción (N)	Momento de reacción (N*m)
Vector X	0	-0.249997
Vector Y	0	0.815623
Vector Z	77.9328	0.00555777

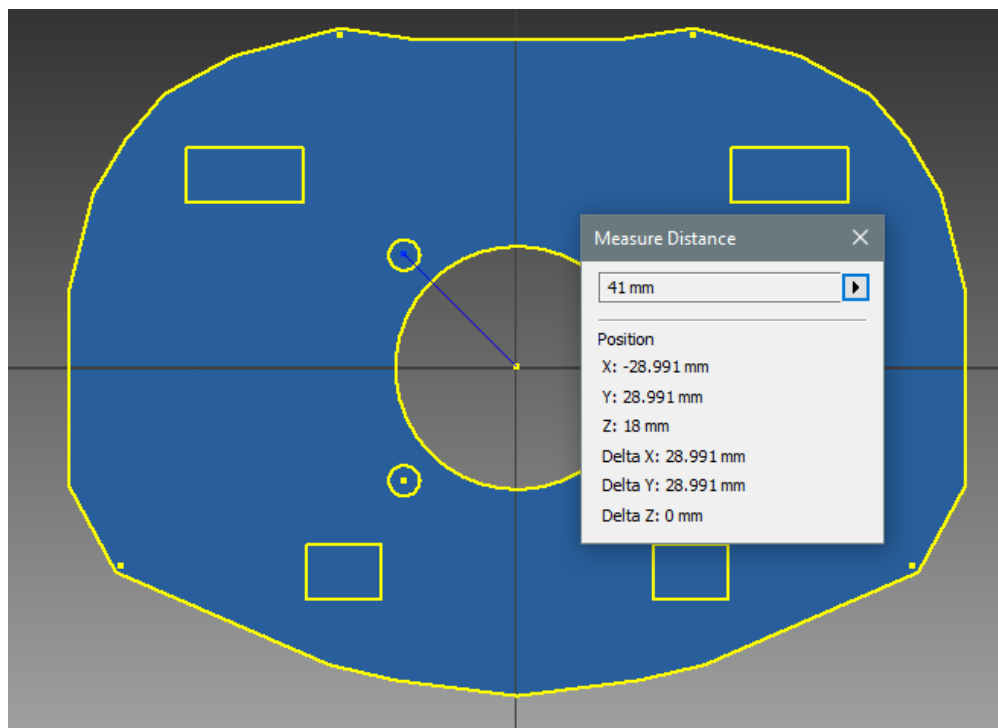
A partir de la fuerza de reacción obtenida en el Cuadro 37 se calculó la fuerza de fricción entre las superficies del estómago superior y el estómago, ya que esta fuerza resultante corresponde a la fuerza normal entre superficies (N), para esto se utilizó el coeficiente de fricción (μ) del ABS que es de 0.7 (BOVE-AG S.L, 2016).

Ecuación 5 Fuerza de fricción

$$f = \mu * N = 0.7 * 77.9328 N = 54.55296 N$$

Con la fuerza de fricción obtenida en la Ecuación 5 y el radio del eje de la Fig. 281 se obtuvo el torque necesario para hacer rotar el torso.

Figura 281. Radio eje del mecanismo de rotación



Ecuación 6 Torque mínimo requerido para vencer la fricción

$$T = F_{fricción} * r_{eje} = 54.55296 N * 0.041 m = 2.2366 N * m$$

En el proceso de diseño mecánico es recomendable utilizar un factor de seguridad de 2 que nos da una zona de protección, pero debido a la calidad del maquinado e incertidumbre del proceso de manufactura, además de la estimación realizada para calcular las fuerzas externas producidas por los brazos, ya que se estimaron modelándolas como barras circulares con distribución y densidad homogénea se aplicará un factor de seguridad de 5 para asegurarnos de la rotación del mecanismo.

Por lo tanto, el torque requerido para rotar el torso es:

Ecuación 7 Torque mínimo con factor de seguridad

$$T_{fs} = 5 * T = 11.18 N * m$$

Este torque se reduce, debido al mecanismo de tornillo sinfín (Fig. 28) utilizado que tiene una relación de 2 hilos y 15 dientes, es decir, la relación de aumento (e) es de 7.5. Sin embargo, la transmisión de potencia por tornillo sinfín tiene baja eficiencia (40 % al 85 %) por lo que no se ve reflejado el factor de aumento en su totalidad.

Para determinar el torque requerido en el tornillo sinfín se analizó el mecanismo en el peor de los casos, es decir, con una eficiencia del 40 %.

Ecuación 8 Torque requerido en el sinfín

$$T_{sinfín} = \frac{T_{fs}}{0.4 * e} = \frac{11.18 N * m}{0.4 * 7.5} = 3.7267 N * m$$

7. **Análisis de esfuerzos.** Se analizó la estructura y el mecanismo de rotación del torso utilizando el método de elementos finitos de Inventor Professional 2015. Los análisis realizados fueron análisis estáticos.

Cuadro 41. Configuración del mallado

Tamaño promedio del elemento	0.05
Tamaño mínimo del elemento	0.1
Factor de gradiente	1.5
Nodos	327843
Elementos	208023

Cuadro 42. Propiedades de los materiales utilizados en la simulación5

	ABS	MDF	Acero
Densidad	1.06 g/cm ³	0.8 g/cm ³	7.85 g/cm ³
Resistencia a la fluencia	20 MPa	7.72 MPa	207 MPa
Resistencia última a la tensión	37.748 MPa	7.72 MPa	345 MPa
Módulo de Young	2.24 GPa	2.4 GPa	210 GPa
Coefficiente de Poisson	0.38	0.25	0.3
Módulo de corte	0.811594 GPa	0.96 GPa	80.7692 GPa

a. **Análisis de estructura del torso.** Para la simulación se aplicaron las cargas de los brazos del Cuadro 37.

Figura 282. Esfuerzos de Von Mises del torso

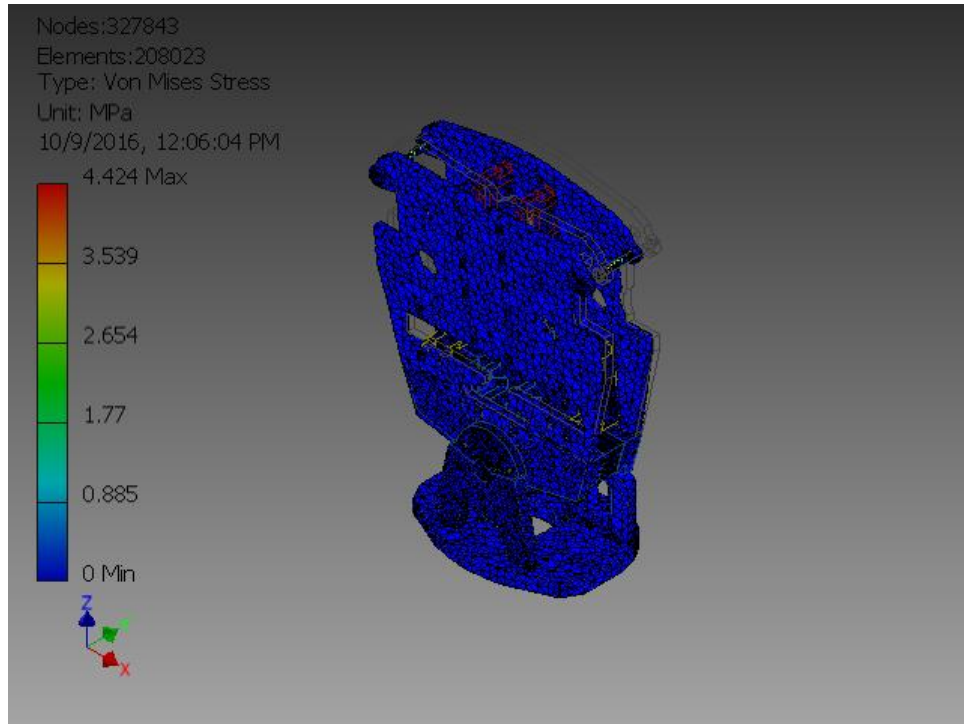


Figura 283. Esfuerzos de Von Mises críticos del torso

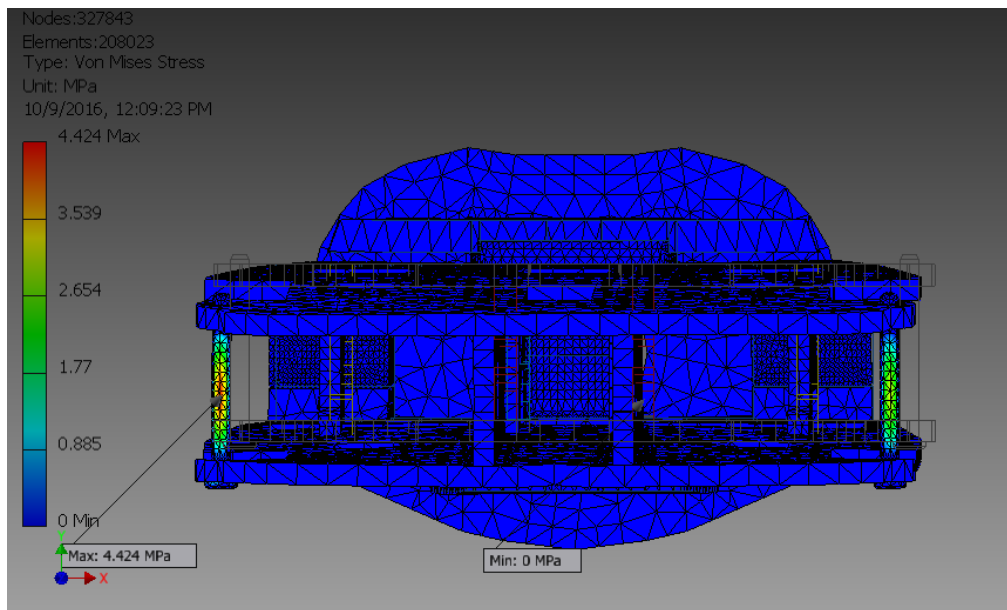


Figura 284. Desplazamiento generado por las fuerzas aplicadas al tors

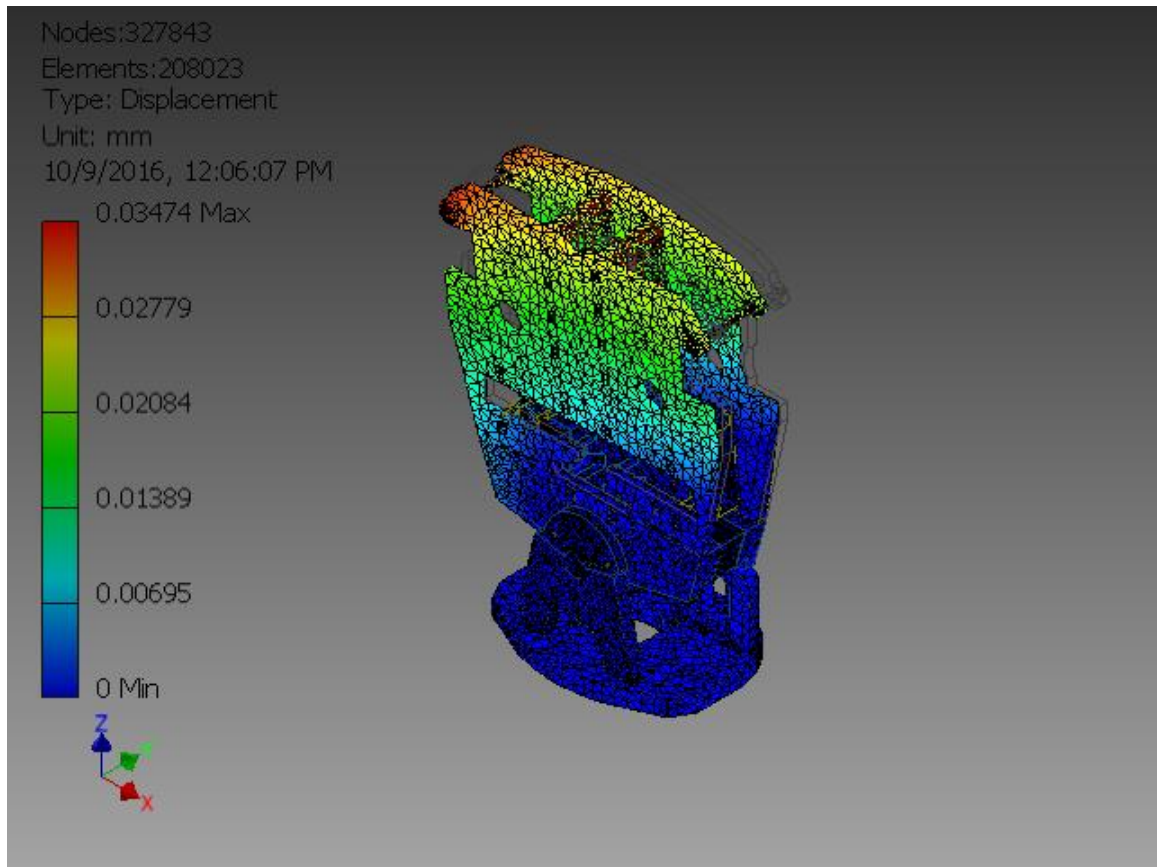


Figura 285. Desplazamiento crítico del tors

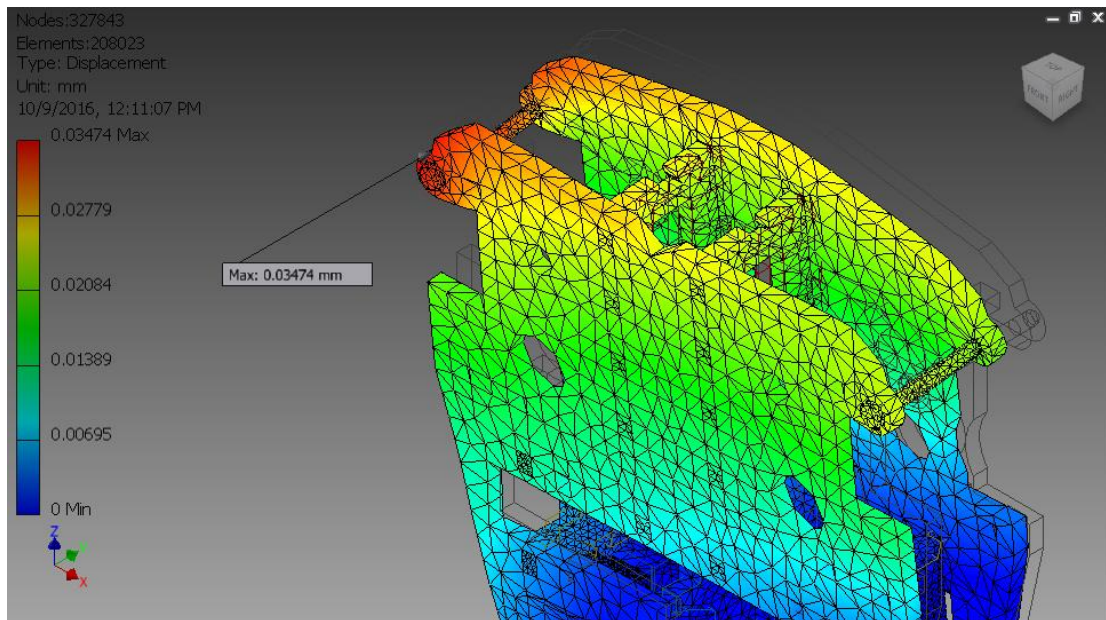
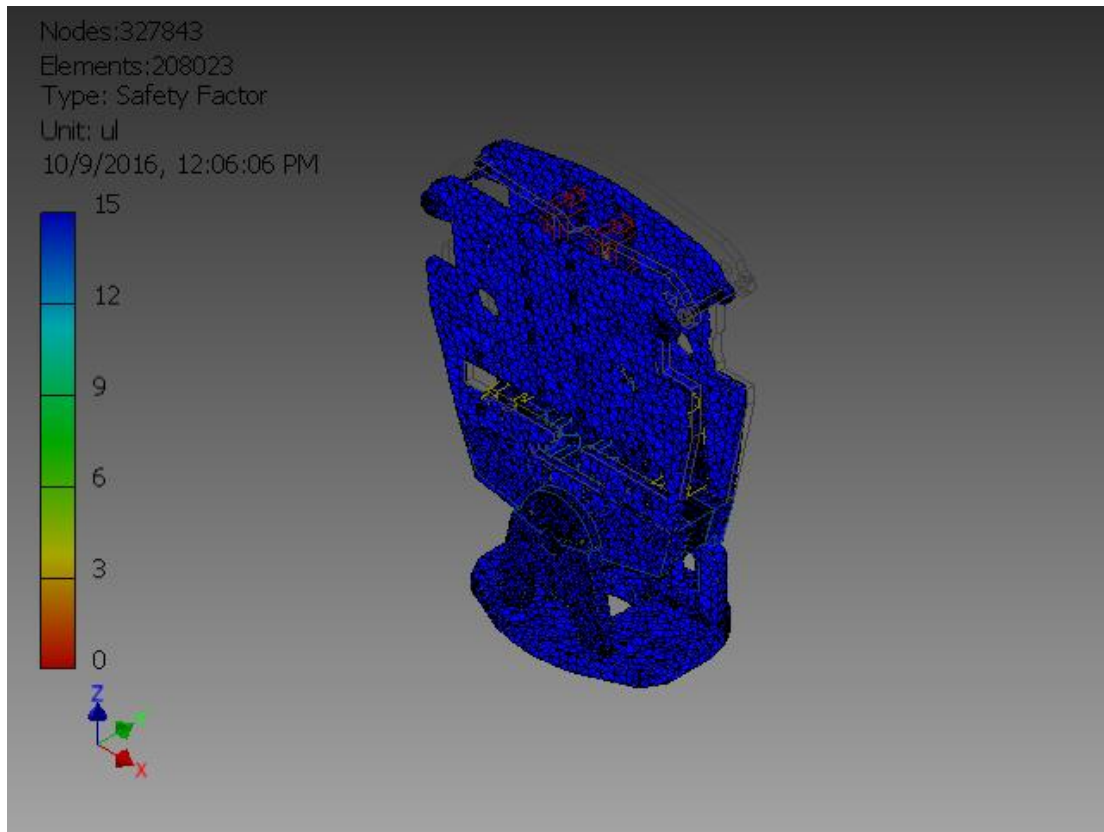


Figura 286. Factor de seguridad del torso



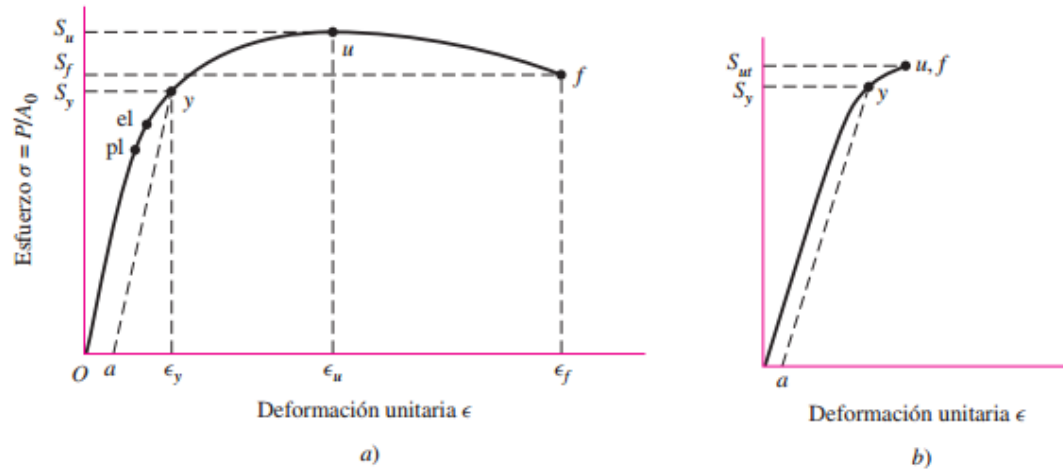
Cuadro 43. Resumen de análisis de estático del torso

	Mínimo	Máximo
Esfuerzo de Von Mises	0.000027461 MPa	4.42398 MPa
1 Esfuerzo	-1.44618 MPa	5.06979 MPa
3 Esfuerzo	-4.97476 MPa	1.56414 MPa
Desplazamiento	0 mm	0.034738 mm
Factor de seguridad	15	15

Con los resultados del análisis estático del torso se validó la estructura a utilizar para el torso del animatrónico, ya que el factor de seguridad mínimo obtenido fue de 15 utilizando como criterio de evaluación la resistencia a la fluencia de los materiales ABS, MDF y acero, se utilizó la resistencia a la fluencia (S_y) ya que este es el punto donde la deformación del material cambia de elástica a plástica, es decir, la deformación es irreversible; utilizar este criterio representa un factor de seguridad más conservador respecto a la resistencia última a la tensión (S_{ut}) como se puede observar curva esfuerzo-deformación de la Fig. 287, además utilizar el criterio de S_{ut} representa llegar al punto donde el material se fractura en materiales frágiles (Elongación < 5%), y en el diseño de la estructura se utilizó MDF que es un material frágil ya que tiene un

porcentaje muy bajo de elongación (0.5%) y representaría evaluar el factor de seguridad en una situación de alto riesgo.

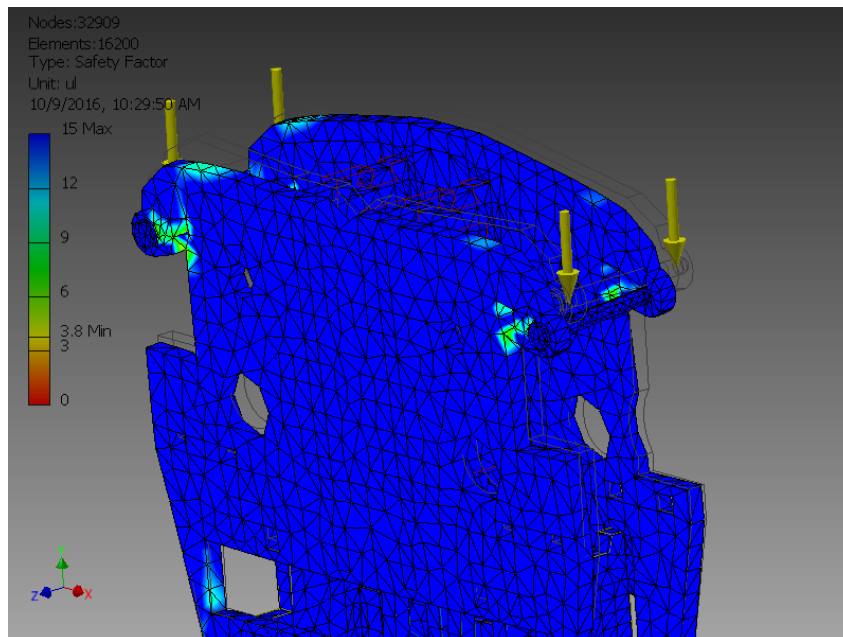
Figura 287. a) Esfuerzo-deformación materiales dúctiles b) Esfuerzo-deformación materiales frágiles



(Budynas, 2008)

Dado que el factor de seguridad mínimo fue de 15, se realizó una simulación con cargas extremas para encontrar el punto crítico de la estructura del torso, para esta simulación se aplicó una carga de 200 N al lado derecho del torso y una carga de 160 N para el lado izquierda, en la Fig. 288 se observan las secciones críticas de la estructura.

Figura 288. Simulación con cargas extremas



b. Análisis de mecanismo de rotación. Para realizar la simulación del mecanismo de rotación, se aplicó el torque mínimo para lograr la rotación del torso en el eje en dirección contraria al movimiento generado por el torque que introduce el motor al tornillo sinfín.

Cuadro 44. Cargas aplicadas para simulación del mecanismo de rotación

	Momento aplicado al sinfín (N*m)	Momento aplicado al eje (N*m)
Vector X	-3.72	0
Vector Y	0	0
Vector Z	0	-11.80

Figura 289. Torque aplicado al mecanismo de rotación

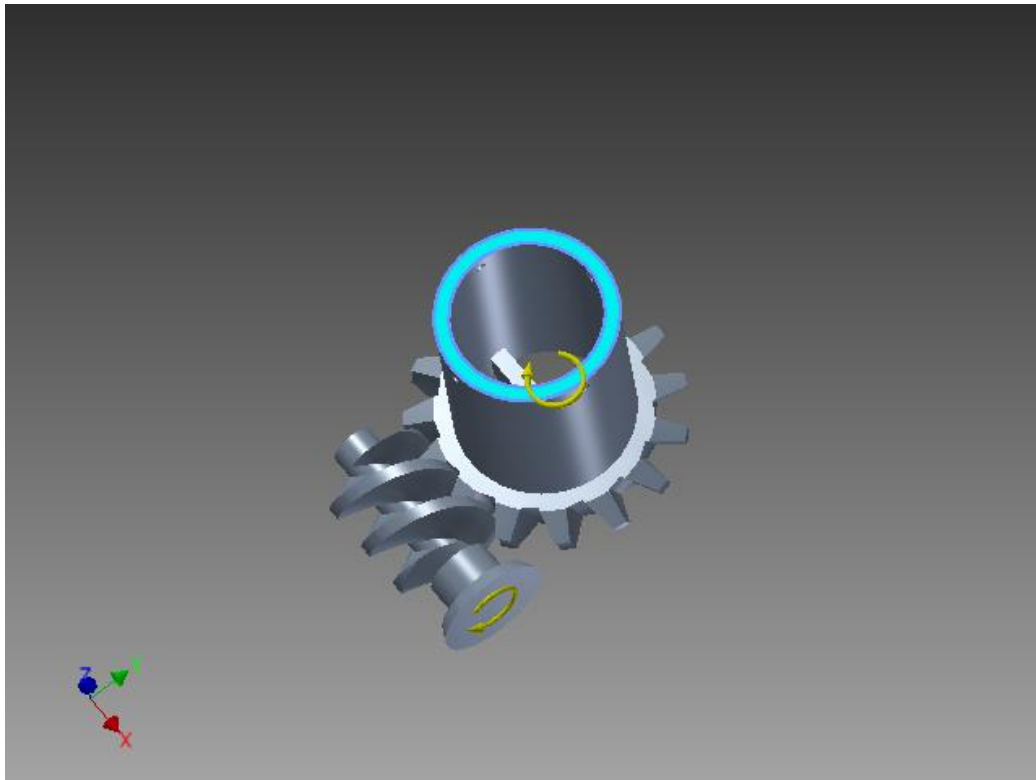


Figura 290. Esfuerzo de Von Mises para mecanismo de rotación

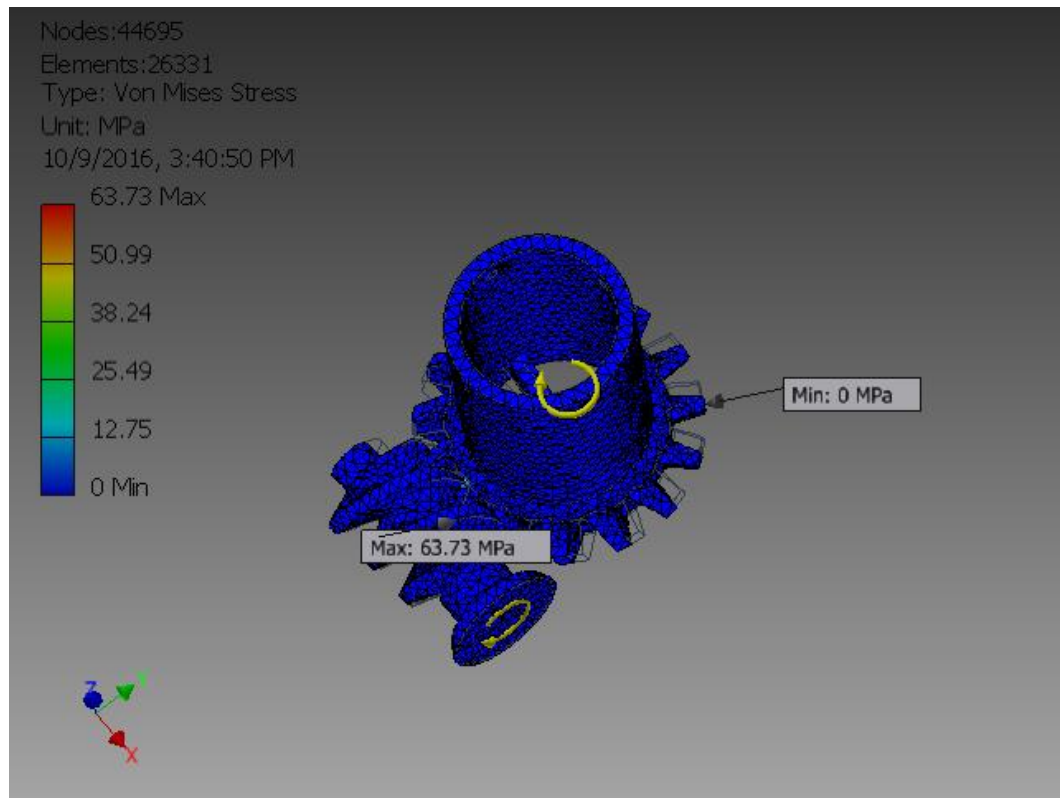


Figura 291. Esfuerzo de Von Mises crítico del mecanismo

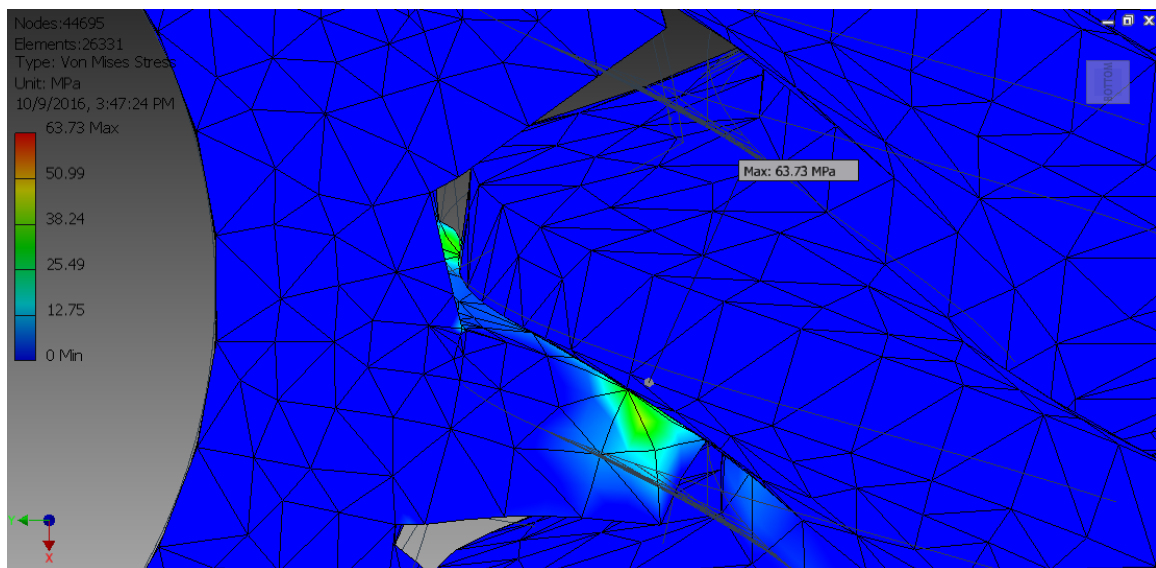


Figura 292. Factor de seguridad del mecanismo de rotación

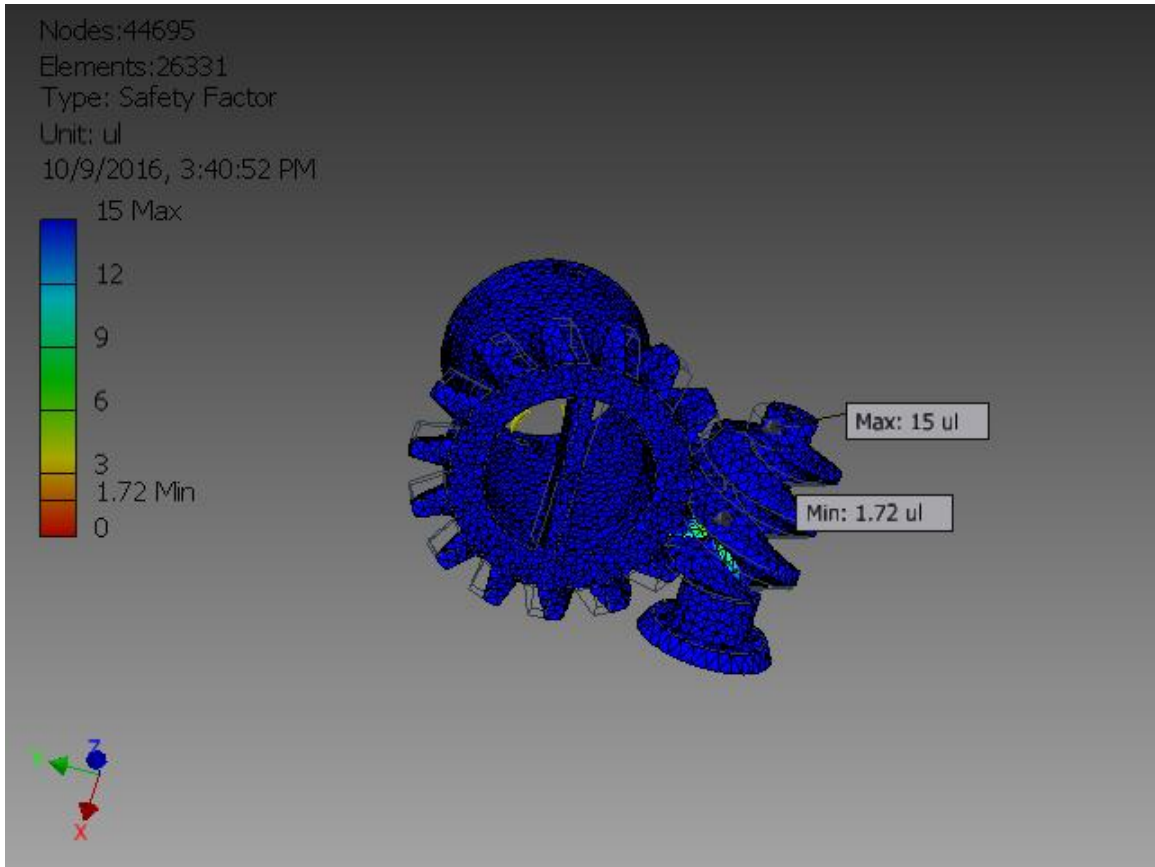
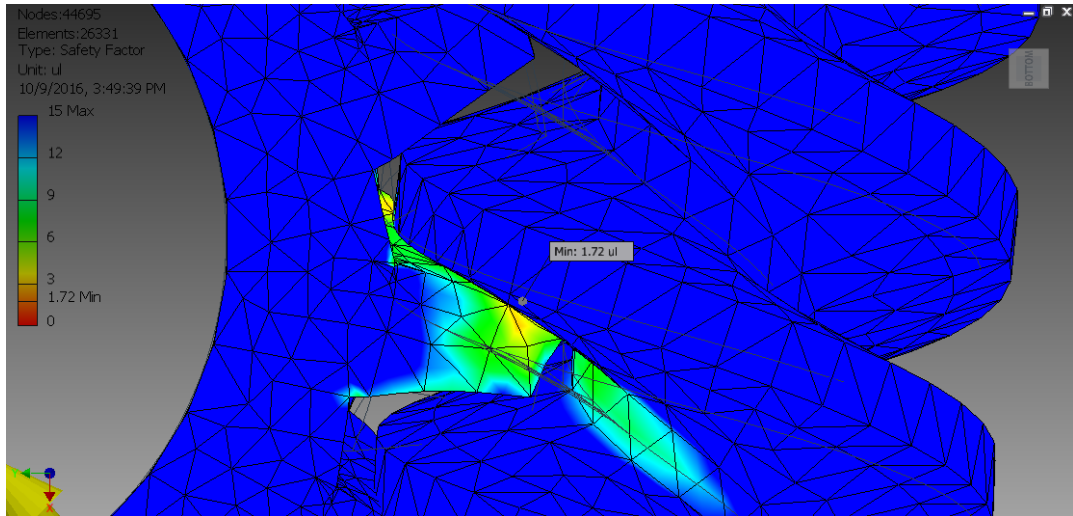


Figura 293. Sección con factor de seguridad mínimo



Cuadro 45. Fuerzas y momentos de reacción en el sinfín

	Fuerza de reacción (N)	Momento de reacción (N*m)
Vector X	275.715	0
Vector Y	-38.4115	-5.50946
Vector Z	-200.079	-3.19173

Cuadro 46. Resumen de análisis estático del mecanismo de rotación

	Mínimo	Máximo
Esfuerzo de Von Mises	0.000445457 MPa	63.7327 MPa
1 Esfuerzo	-6.85838 MPa	79.4348 MPa
3 Esfuerzo	-42.8211 MPa	10.1514 MPa
Desplazamiento	0.00933476 mm	0.816515 mm
Factor de seguridad	1.72021	15

Como se puede observar en la Fig. 293 el factor de seguridad mínimo del mecanismo de rotación es de 1.72, el factor recomendado es de dos, sin embargo, en la aplicación de cargas para la simulación se utilizó el torque de 11.80 N*m que utilizaba un factor de seguridad de 5 por lo podemos afirmar que el factor de 1.72 es aceptable y valida al mecanismo de rotación.

F. SELECCIÓN DE ACTUADORES

Para seleccionar el actuador se analizaron diferentes servomotores que cumplieran con el torque requerido en el tornillo sinfín ($T_{\text{sinfín}}$) encontrado en la sección anterior.

En el diseño original del *Inmoov* se divide el torque utilizando dos servomotores sincronizados y dos tornillos sinfín, por lo tanto, se consideraron dos opciones para el diseño del mecanismo, la primer utilizando dos motores ($T_{\text{sinfín}}/2$) con un torque requerido de 1.8633 N*m y la segunda usando solo un motor ($T_{\text{sinfín}}$) con un torque requerido de 3.7267 N*m, por lo que se buscaron actuadores con un torque mínimo de 1.8633 N.

Cuadro 47. Características de servomotores evaluados

	Hitec HS-805BB	Vigor VSD-11AYMB	Spektrum S6250	Dynamixel MX-106T
Torque normal	1.94 N*m (4.8 V)	2.55 N*m (6.0 V @ 4.5 A)	1.91 N*m (6 V @ 4.9 A)	8.0 N*m (11.1 V @ 4.8 A)
Tipo de engrane	Plástico	Metal	Metal, Acero	Metal
Masa	152 g	150 g	65.2 g	153 g
Dimensiones	Largo: 66 mm Ancho: 30 mm Alto: 57.7 mm	Largo: 60 mm Ancho: 29.1 mm Alto: 54.3mm	Largo: 41 mm Ancho:20.8 mm Alto: 31.8mm	Largo: 40.2 mm Ancho: 65.1 mm Alto: 46 mm
Otras		Resistente al agua	Cubierta de aluminio, resistente al agua	Protocolo de comunicación, PID integrado, sensores integrados
Precio	\$ 40.00	\$ 25.00	\$ 99.99	\$ 500.00

(Vigor Precision LTD, 2016)

Para seleccionar el actuador de forma más objetiva se realizó un estudio de caso evaluando las características del Cuadro 47.

Cuadro 48. Factor de peso de las características evaluado para los actuadores

Variable	Peso (1-4)
Masa(g)	2
Torque (N*m)	4
Voltaje (V)	3
Precio (\$)	4
Complejidad de integración	2
Robustez	3

Cuadro 49. Variables normalizadas

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Masa (g)	153	144.2	135.4	126.7	118	109.1	100	91.5	82.8	65.2
Torque (N*m)	2.42	2.978	3.536	4.094	4.65	5.21	5.77	6.33	6.88	8
Voltaje (V)	11.1	10.59	10.08	9.57	9.06	8.55	8.04	7.53	7.02	6
Precio (\$)	500	452.5	405	357.5	310	262.5	215	168	120	25
Complejidad integración	10	9.1	8.2	7.3	6.4	5.5	4.6	3.7	2.8	1
Robustez	10	9.1	8.2	7.3	6.4	5.5	4.6	3.7	2.8	1

Cuadro 50. Matriz de decisión de los servomotores considerando precio

	Hitec HS-805BB		VSD-11AYMB		Spektrum S6250		Dynamixel MX-106T	
	Normalizado	Sub-Total	Normalizado	Sub-Total	Normalizado	Sub-Total	Normalizado	Sub-Total
Masa (g)	1	2	1	2	10	20	1	2
Torque (N*m)	1	4	3	12	2	8	10	40
Voltaje (V)	10	30	9	27	6	18	1	3
Precio (\$)	9	36	10	40	9	36	2	8
Complejidad integración	6	12	7	14	7	14	7	14
Robustez	3	9	5	15	7	21	10	30
	Total	93	Total	110	Total	117	Total	97

Cuadro 51. Matriz de decisión sin considerar el precio de los servomotores

	Hitec HS-805BB		VSD-11AYMB		Spektrum S6250		Dynamixel MX-106T	
	Normalizado	Total	Normalizado	Total	Normalizado	Total	Normalizado	Total
Masa (g)	1	2	1	2	10	20	1	2
Torque (N*m)	1	4	3	12	2	8	10	40
Voltaje (V)	10	30	9	27	6	18	1	3
Precio (\$)	1	4	1	4	1	4	1	4
Complejidad de integración	6	12	7	14	7	14	7	14
Robustez	3	9	5	15	7	21	10	30
	Total	61	Total	74	Total	85	Total	93

Para seleccionar el actuador se consideraron seis características importantes, la masa del actuador ya que esto afecta en la dinámica de la estructura; el torque del actuador que define la capacidad para hacer rotar el torso del animatrónico; el voltaje que está directamente relacionado con el consumo de potencia del actuador, por lo tanto, se buscaba un voltaje más pequeño para minimizar el consumo de potencia; el precio ya que uno de los objetivos del proyecto es construir un prototipo de bajo costo; la complejidad de integración que consideraba factores como dimensiones y facilidad de adaptación a la estructura y mecanismo de rotación; y por último la robustez que tomaba en cuenta factores como tipo de engranes del servomotor, sistema de control del actuador y precisión en el movimiento.

Se analizaron dos matrices de decisión, la primera incluía el costo del actuador (Cuadro 50) ya que el objetivo general del proyecto es construir un prototipo funcional de bajo costo dándole un peso alto a la variable precio, tomando en cuenta esto el motor que presenta mejores características es el motor Spektrum S6250.

Sin embargo, la universidad nos proporcionó motores Dynamixel MX-106T lo que implicaba anular el precio de los actuadores, por lo que se decidió realizar un estudio de caso sin tomar en cuenta el precio creando una segunda matriz de decisión (Cuadro 51) para comprobar si el motor Dynamixel MX-106T era el mejor actuador para lograr la rotación del torso.

Con la matriz de decisión del Cuadro 51, se comprobó que el MX-106T es la mejor opción cuando el precio no es factor determinante, por lo tanto, el motor a utilizar para el mecanismo de rotación será el MX-106T.

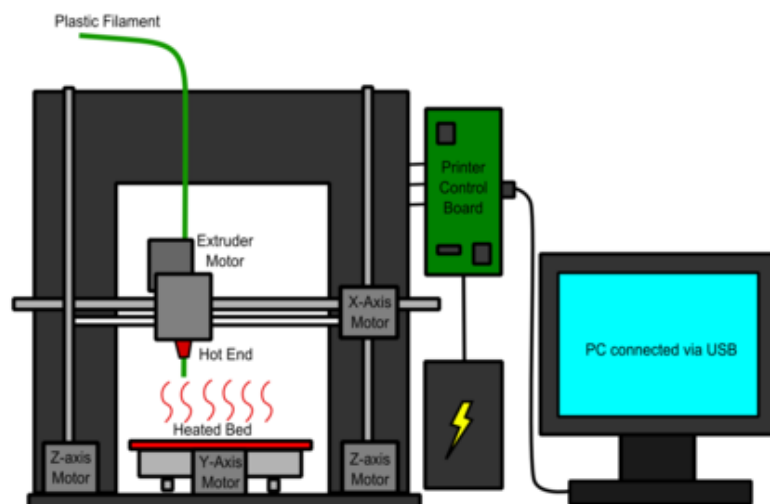
G. MANUFACTURA Y CONSTRUCCIÓN DE ESTRUCTURA MECÁNICA

La construcción y manufactura del torso del animatrónico se realizó con impresiones 3D y una cortadora láser. Se modificaron las piezas para simplificar la construcción y optimizar el proceso de manufactura utilizando una cortadora láser, además se realizaron las modificaciones necesarias para utilizar el actuador elegido (Dynamixel MX-106T).

1. **Impresión 3D.** Se utilizó impresión 3D para la manufactura del estómago medio y el estómago superior, ya que estas piezas requerían superficies curvas y esféricas que no se podían obtener con una cortadora láser, por otra parte, el torso fue construido utilizando la cortadora láser dado que todas las superficies eran planas.

La tecnología de impresión 3D utilizada fue modelado por deposición fundida (FFF), esta tecnología deposita material fundido capa por capa sobre una superficie plana, el material utilizado inicialmente se encuentra en estado sólido, este se funde y es expulsado por una boquilla formando hilos que crean la forma del elemento deseado (Escobar, 2016).

Figura 294. Impresión 3D, tecnología FFF



(Escobar, 2016)

La impresora utilizada fue una Prusa i2, esta impresora tiene la capacidad de imprimir piezas usando filamento de PLA o ABS, ambos son polímeros. El PLA, ácido poliláctico, es un polímero biodegradable de origen vegetal; mientras que el ABS, acrilonitrilo butadieno estireno, es fabricado a partir del petróleo.

A continuación, se presentan las propiedades de ambos materiales.

Cuadro 52. Propiedades físicas de ABS y PLA

	PLA	ABS
Densidad	1.3 g/cm ³	1.0 a 1.4 g/cm ³
Módulo de Young	3.5 GPa	2.0 a 2.6 GPa
Resistencia a la fluencia	60 MPa	20 MPa
Resistencia a la tensión	53 MPa	37.75 MPa
Resistencia a la flexión	80 MPa	97 MPa (60.8)
Resistencia última tensión	50 MPa	37 a 110 MPa
% de elongación	6 %	30 %
Coefficiente de Poisson	0.3	0.33

(MakeItFrom, 2009)

Para elegir el filamento a utilizar en las impresiones 3D se evaluaron diferentes criterios: propiedades físicas, manejo post-procesamiento, duración, complejidad de manufactura, costo.

Cuadro 53. Criterios de comparación para ABS y PLA

	PLA	ABS
Propiedades mecánicas	Más blando, resistencia al desgaste media, menor resistencia a la flexión.	Muy duro y poco deformables, resistencia alta al desgaste y a los impactos.
Temperatura de degradación	65 °C	110 °C
Temperatura de extrusión	170 °C	235 °C
Complejidad de impresión	Baja	Media
Costo	Accesible	Accesible
Post-procesamiento	Bajo	Alto, puede cortarse, pulirse, pegarse o perforarse.
Vulnerabilidad	Vulnerable a la luz solar y sobrecalentamiento.	Menos vulnerable a la degradación debido a luz solar y sobrecalentamiento.

(MakeItFrom, 2009)

Con base en el Cuadro 53, se eligió el ABS como material de impresión ya que presenta mayor resistencia al desgaste que el PLA, soporta temperaturas más altas antes de deformación y el post-procesamiento es

mejor, lo que nos permite hacer procesos como perforaciones, desgaste de superficies con más facilidad, sin dañar el elemento.

La única desventaja de utilizar filamento de ABS es la dificultad en el proceso de impresión 3D ya que éste requiere un mayor control en la temperatura del ambiente, si el ambiente no está controlado se producen errores en la adherencia de capas, provocando pandeo en el elemento o desfase de capas. Para mejorar la adherencia entre capas con ABS se calentó cama de la impresora a una temperatura entre 90 – 100 °C y se utilizó un adhesivo hecho con ABS y acetona.

a. Estómago medio. Para la construcción del estómago medio se imprimieron 11 piezas, el filamento requerido fue calculado utilizando el *software Repetier-Host*.

Cuadro 54. Piezas requeridas para el estómago superior

Cantidad	Pieza	Filamento requerido (mm)	Tiempo de impresión	
			Horas	Minutos
1	BotCapLeftV1	5461	2	20
1	BotCapRightV1	5658	2	22
1	BotBackLeftV2	15981	5	45
1	BotBackRightV2	16103	5	45
1	BotFrontLeftV2	13035	5	0
1	BotFrontRightV2	13076	5	0
1	MidPotHolderV1	688	0	25
2	MidWormV1	3062	1	35
1	StomGearAttachV1	3603	1	40
1	StomGearV2	12780	4	45

A continuación, se presentan las piezas realizadas con impresión 3D.

Figura 295. Engrane y eje de rotación del torso



Figura 296. Tornillo sinfín de mecanismo de transmisión de potencia



Figura 297. Montaje de mecanismo de rotación (sinfín) y motor Dinamixel MX-106

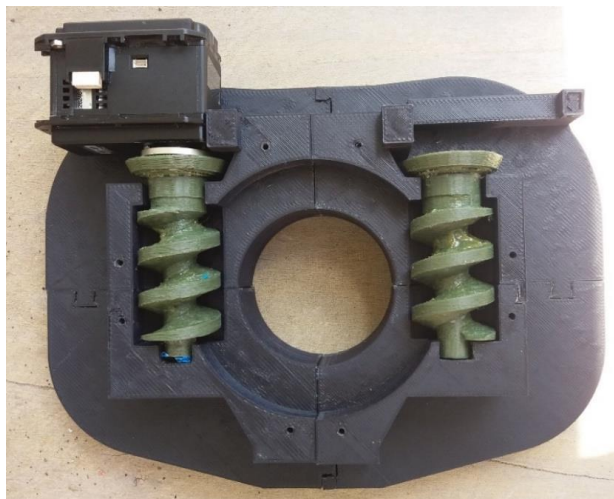
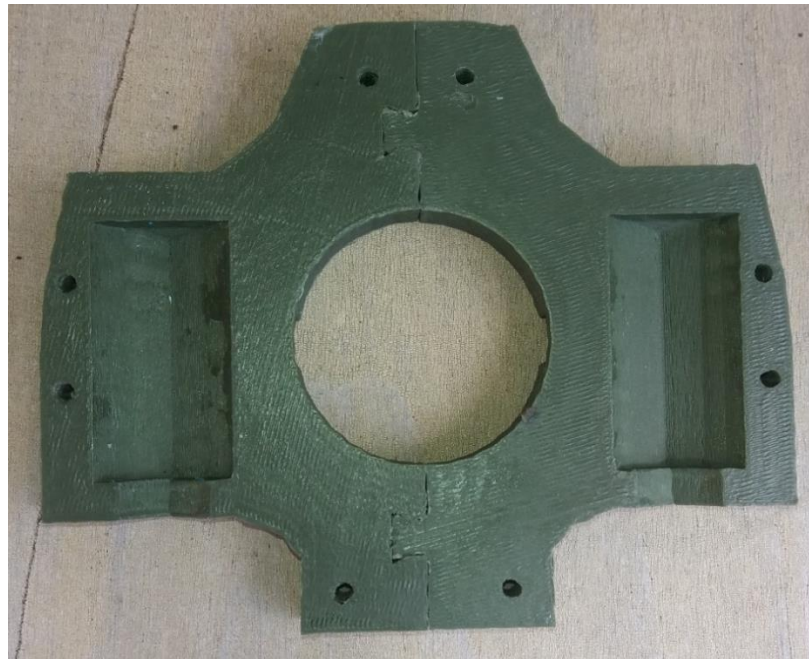


Figura 298. Montaje de mecanismo tornillo sinfín y engranaje



Figura 299. Tapa para montaje



b. Estómago superior. Para la construcción del estómago superior se imprimieron 15 piezas, el listado de piezas requeridas se presenta a continuación.

Cuadro 55. Piezas requeridas para el estómago superior

Cantidad	Pieza	Filamento requerido (mm)	Tiempo de impresión	
			Horas	Minutos
1	RollBackLeftV1	8817	3	25
1	RollBackRightV1	9038.1	3	25
1	RollFrontLeftV1	9202	3	25
1	RollFrontRight	8994	3	25
1	TStoBackLeftV1	5311	2	20
1	TStoBackRightV1	5303	2	20
1	TStoBackStandLeftV1	6755	2	45
1	TStoBackStandRightV1	6761	2	5
1	TStoFrontLeftV1	4594.3	1	55
1	TStoFrontRightV1	4584.4	1	55
1	TStoFrontStandV2	7181.5	3	15
2	TStoMiddleV1	3571	1	30
1	TStomRotBackV1	7535	3	15
1	TStomRotFrontV1	7991	3	25

A continuación, se presentan las piezas realizadas con impresión 3D.

Figura 300. Base del estómago superior

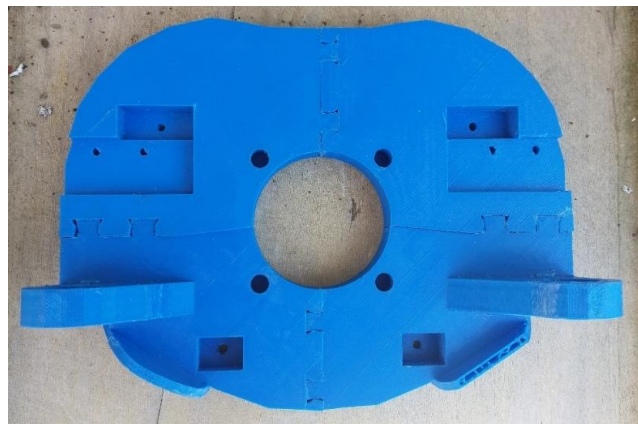


Figura 301. Soporte trasero del estómago superior



Figura 302. Soporte frontal del estómago superior



Figura 303. Conexión estómago superior- torso



Figura 304. Castigador eje de rotación - estómago superior



Figura 305. Eje de rotación y estómago superior ensamblados



Figura 306. Conexión estómago superior-torso y soporte trasero ensamblados

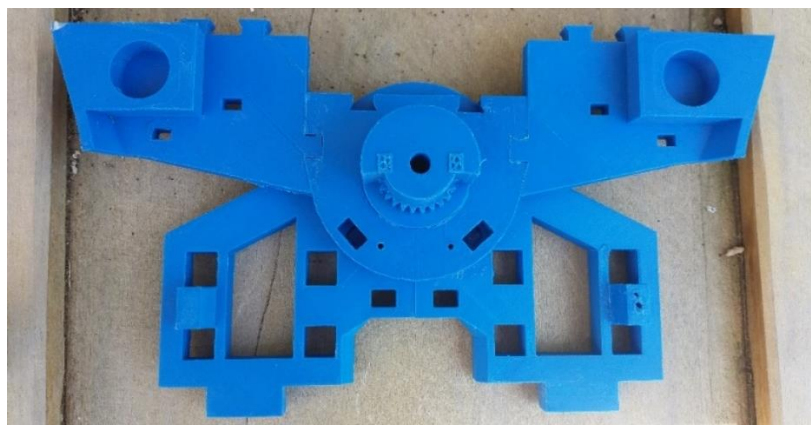


Figura 307. Conexión estómago superior-torso y soporte frontal ensamblados

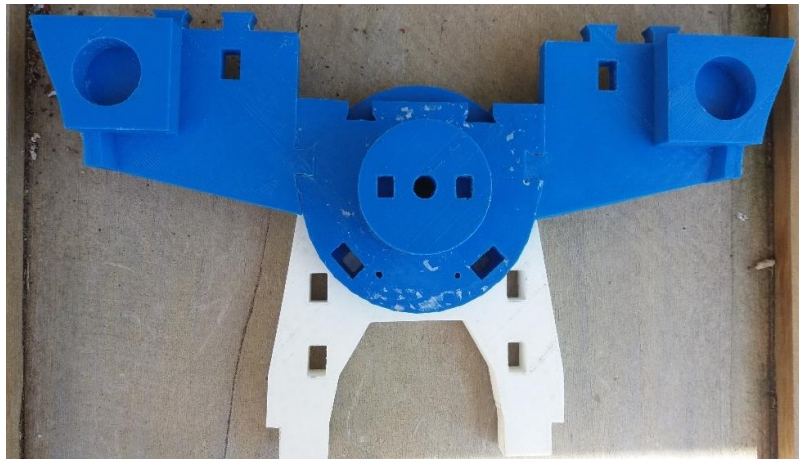


Figura 308. Ensamble completo del estómago superior



2. Corte láser. Para construir el torso se utilizó una cortadora láser, ya que las piezas del torso estaban conformadas por superficies planas en su totalidad.

El corte láser consiste en el corte en dos dimensiones sobre un plano de trabajo, el corte es generado por una luz de alta potencia que desintegra el material y genera la geometría deseada en el material a través de un programa de control numérico que interpreta un dibujo vectorial.

La principal ventaja de este proceso de manufactura es la reducción considerable de tiempo mientras que una pieza en la impresora 3D podía tardar de 5 a 7 horas en la cortadora láser tardaba de 5 a 10 minutos.

El torso se cortó en MDF (*Medium Density Fiberboard*), este es un material compuesto de pedazos de fibra de madera unidos con pegamento, resina, presión y calor. Las planchas utilizadas fueron de 9.20 mm de espesor.

A continuación, se presenta una tabla con las propiedades del MDF.

Cuadro 56. Propiedades físicas del MDF

	MDF
Densidad	0.75 g/cm ³
Módulo de Young	2.4 GPa
Módulo de corte	2.5 GPa
Resistencia al corte	2.5 MPa
Resistencia última a la tensión	18 MPa
Resistencia a la compresión	10 MPa
% de elongación	0.5 %
Coefficiente de Poisson	0.25

a. Torso. A continuación, se presentan el listado piezas requeridas para la construcción del torso. Se utilizaron dos planchas de 60 mm x 40 mm x 9.20 mm para el corte de las piezas.

Cuadro 57. Piezas requeridas para el torso

Cantidad	Pieza
1	Torso-Front11
1	Torso-Back11
2	InterKinectMidV2
2	ThoatLowerV2
2	InterKinectSideV2

A continuación, se presentan las piezas cortadas en MDF.

Figura 309. Parte frontal del torso

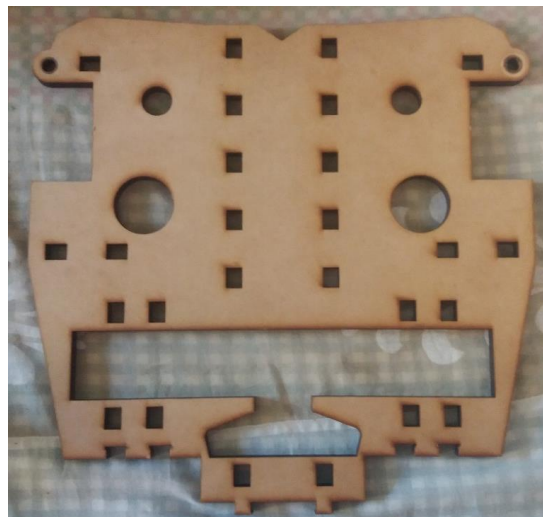


Figura 310. Parte trasera del torso

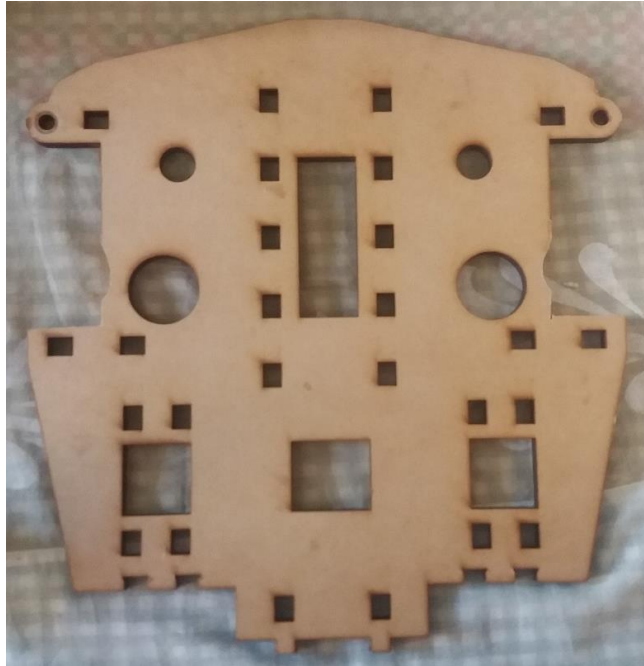
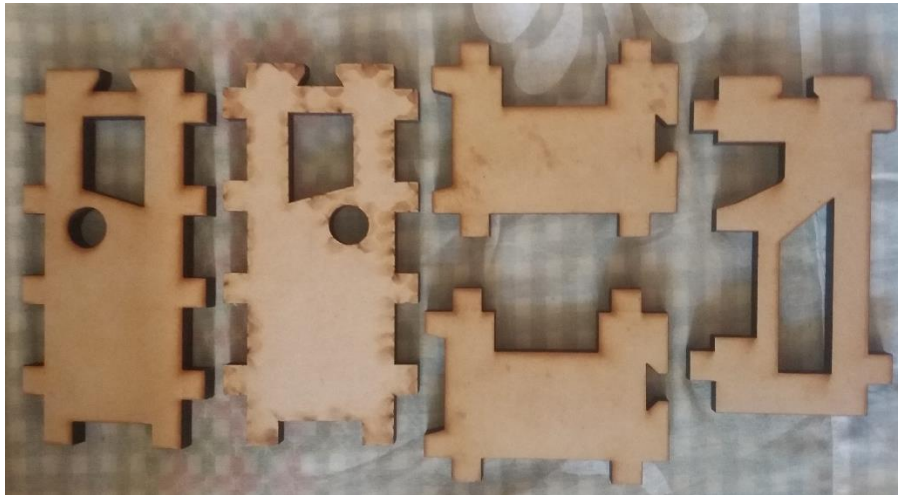


Figura 311. Acoples para torso frontal y torso trasero



3. Ensamble de la estructura completa

Figura 312. Ensamble parte frontal del torso y estómago superior



Figura 313. Ensamble parte trasera del torso y estómago superior

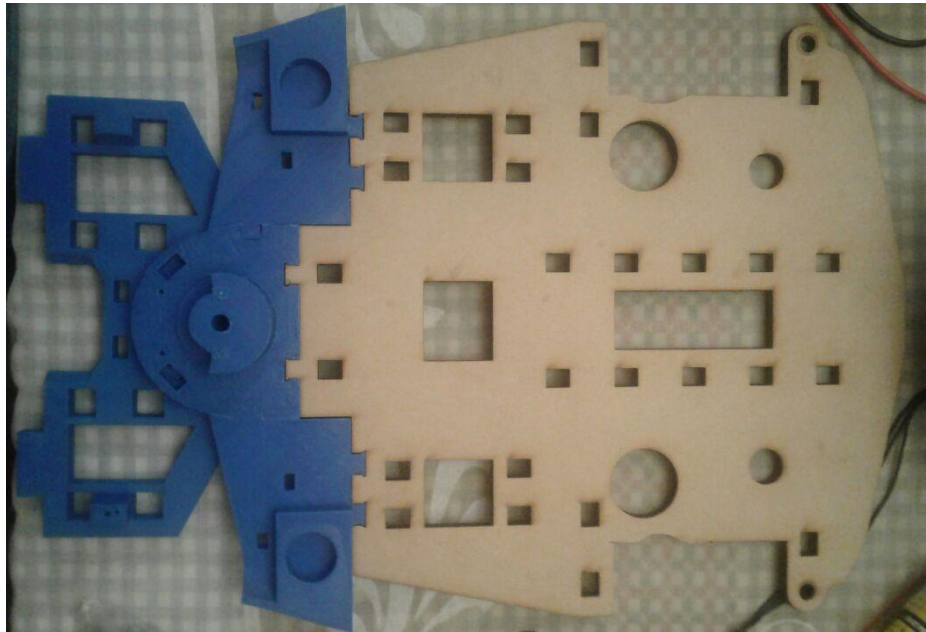


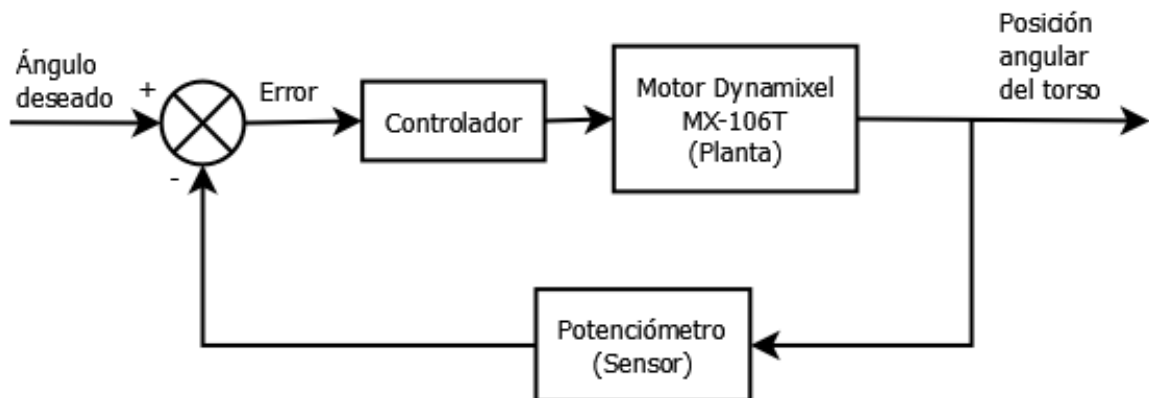
Figura 314. Ensamble completo del torso animatrónico



H. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE CONTROL

Para controlar la rotación del torso hacia un ángulo deseado se utilizó un sistema de control de lazo cerrado.

Figura 315. Sistema de control de lazo cerrado para rotación de torso



Para medir la rotación del torso se utilizó un potenciómetro de 5 K Ω insertado en el eje de rotación para poder medir la posición angular del torso realizando una conversión de voltaje a grados, para esto se utilizó un Arduino Uno

Figura 316. Potenciómetro insertado en el eje para medir rotación del torso



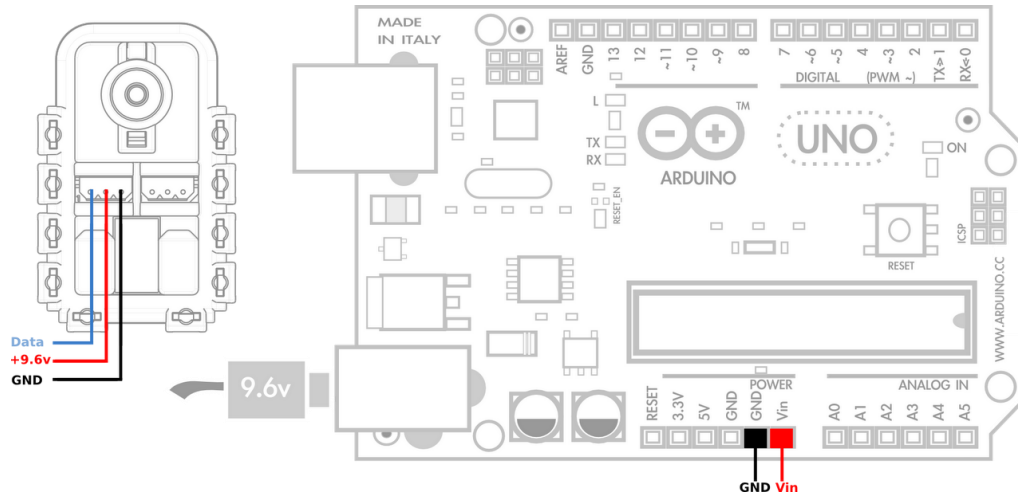
Se realizó la conversión del voltaje analógico de 0 a 5 V obtenido del potenciómetro a un valor correspondiente a grados entre 0 y 180, para lograr la medición correcta se calibró el potenciómetro en 3 diferentes posiciones 0, 90 y 180 grados, y a partir de estos valores se realizó un mapeo del valor correspondiente de la conversión del ADC (0-1024) a un ángulo (0-180°).

Cuadro 58. Valores de calibración para conversión a grados del ADC

Valor del ADC	Grados medidos
65	0 °
420	90 °
910	180°

Con la medición del potenciómetro convertida a grados se realizó un programa en Arduino Uno para controlar la rotación del motor Dynamixel MX-106T, este tiene un microcontrolador ATmega8 el cual se comunica por medio de Half Duplex UART-TTL, para controlarlo se utilizó la librería Dynamixel Serial para comunicarse a través del puerto UART (serial) del Arduino, el motor se utilizó en modo de rotación continuo. Se utilizó una fuente de 12V para alimentar al motor Dynamixel MX-106T.

Figura 317. Motor Dynamixel y Arduino Uno

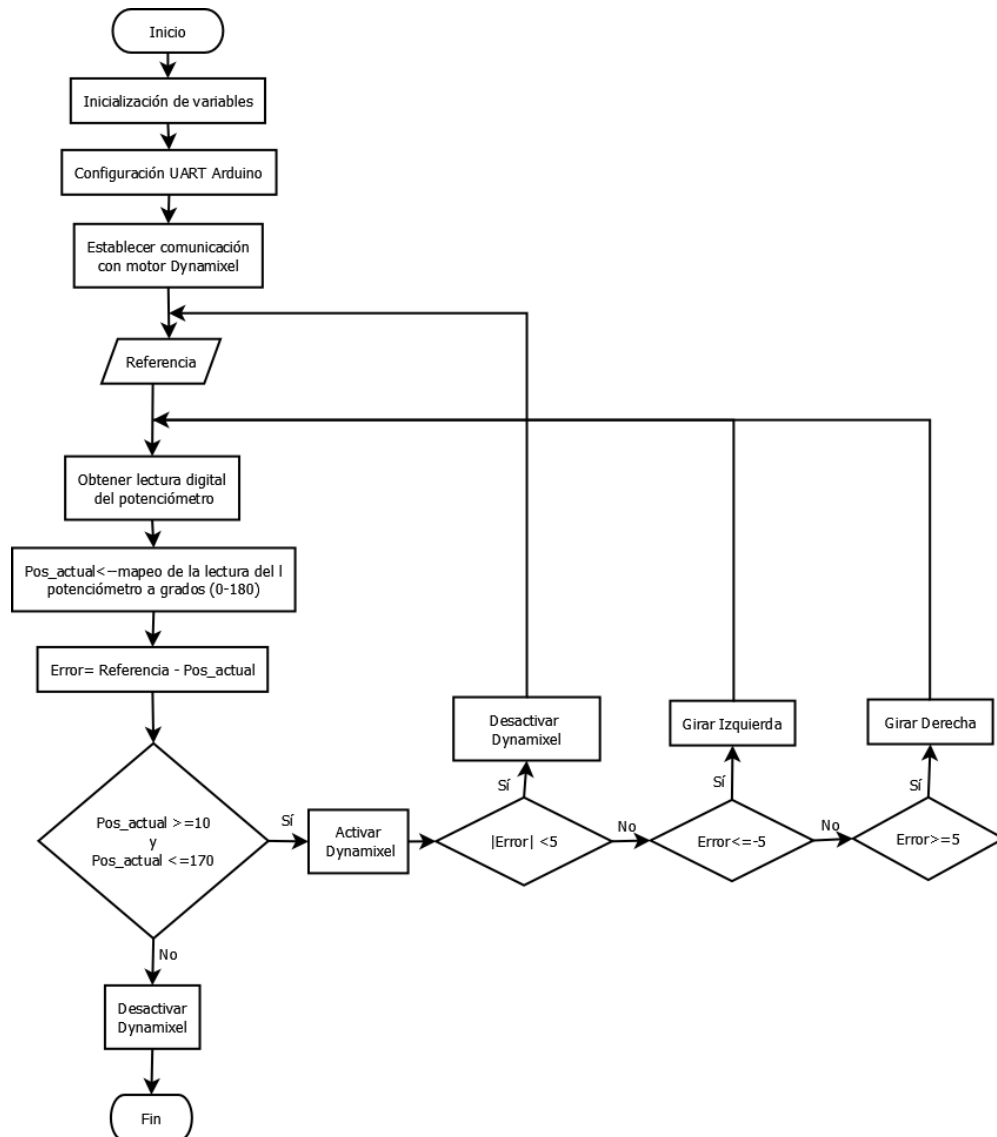


(Savage Electronics, 2011)

Debido a la simplicidad del sistema y dado que la aplicación del sistema no requería alta precisión en la posición angular de torso, se implementó un control proporcional de con $K=1$, es decir, solo se utilizó la retroalimentación con el potenciómetro para llegar a la posición deseada.

Al implementar el control, se logró estabilizar el sistema obteniendo un error de 5 grados respecto al ángulo deseado, debido a la aplicación un error de tal magnitud no tiene repercusión dado que en la rotación del torso no es apreciable a simple vista un cambio de 5° en la posición angular.

Figura 318. Diagrama de flujo para control de rotación del torso



Cuadro 59. Variables utilizadas en Arduino para el control del motor

Variable	Descripción	Tipo
sensorValue	Lectura del ADC del potenciómetro	Int
degree	Conversión a grados de la lectura del ADC	Int
reference	Ángulo o posición angular deseada	Int
error	Diferencia entre el ángulo deseado y la conversión a grados del ADC	Int
vel	Velocidad de giro del motor Dynamixel	Int
motor	ID del motor Dynamixel utilizado	Int

I. COSTOS

El desarrollo de este módulo surgió como solución para ofrecer un animatrónico de bajo costo ya que las opciones de animatrónicos del entorno comercial son bastante elevadas, donde un animatrónico puede costar en su versión más sencilla Q80,000 hasta una versión mucho más complejo que puede alcanzar los Q700,000, por lo que se buscaron materiales de bajo costo y los actuadores con mejor relación costo-desempeño, para la construcción del torso.

Aunque en la implementación del torso se utilizó el motor Dynamixel MX-106T porque la universidad ya poseía estos actuadores para análisis de costo se tomaron en cuenta los 2 actuadores Spektrum S6250 que representan la mejor opción costo-desempeño.

Todos las cotizaciones y compras de los materiales para la construcción del torso fueron realizadas en Guatemala con excepción de los servomotores Spektrum S6250, sin embargo, los costos de manufactura y construcción no se tomaron en cuenta ya que se utilizó la impresora 3D y la cortadora láser de la universidad lo que no implicó costos.

Cuadro 60. Costos de materiales utilizados para construcción de torso animatrónico.

	Descripción	Proveedor	Precio Unitario (Q)	Subtotal (Q)
5	Lbs de filamento ABS de 3 mm.	Mini 3D Factory	350.00	1750.00
1	Plancha de MDF 200 x 150x 0.92 cm	Aserradero San Miguel	200.00	200.00
10	Tornillos de cabeza plana Phillips Galvanizados M4x16	Tornituercas	0.27	2.70
15	Tornillos de cabeza plana Phillips Galvanizados M4x25	Tornituercas	0.80	12.00
10	Tornillos de cabeza redonda galvanizados M3x12	Tornituercas	0.50	5.00
10	Tornillos de cabeza redonda galvanizados M3x20	Tornituercas	0.50	5.00
10	Tuerca hexagonal M4	Tornituercas	0.05	0.50
2	Servomotores Spektrum S6250	Spektrum	981.50	1963.00
			Total	3938.20

En el Cuadro 58 el costo de los servomotores Spektrum S6250 incluye gastos de envío e impuestos, para la conversión a quetzales se tomó el cambio del día ($1\$ = Q. 7.55$).

Como se puede observar en el Cuadro 59 el costo del torso animatrónico está por debajo de los Q 10,000, representa una opción viable y factible para los inversionistas interesados en utilización de animatrónicos, además es un costo alcanzable para compañías o empresas en crecimiento.

Sin embargo, para una versión comercial es necesario cambiar el proceso de manufactura para obtener mayor detalle y precisión en los elementos; además es necesario cambiar el material de construcción por un material más adecuado a ambientes hostiles con mayor exposición a humedad y calor, dado que los materiales usados (MDF, ABS) no son la mejor opción para estos ambientes, por lo que estos costos se elevarán.

J. PRUEBAS E INTEGRACIÓN

Se realizaron diferentes pruebas para comprobar que el torso funcionará al integrarlo a los demás módulos. Primero se verificó que la estructura soportará el peso de los brazos como se puede observar en la Fig. 330, sin embargo, al realizar la primera rutina de movimiento completo con brazos extendidos el torso se desequilibró ya que su centro de masa salió del reposo, por lo que se agregó un base de metal que permitiera mayor contacto con la base del torso, lo que agregó mayor estabilidad y soporte permitiendo realizar el movimiento de extensión de los brazos como se puede observar en la Fig. 331.

Figura 319. Torso y brazos ensamblados

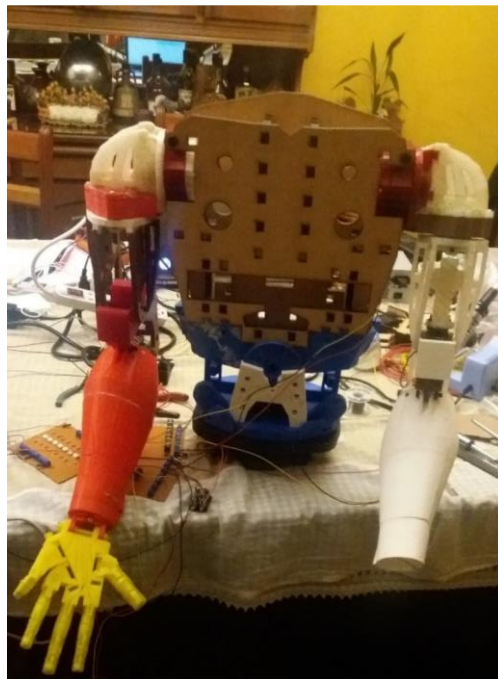


Figura 320. Torso y brazos con base metálica de soporte

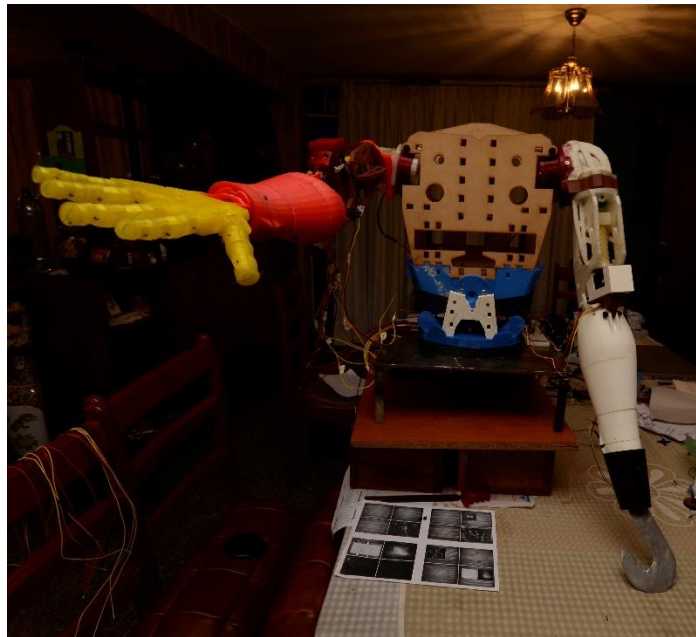
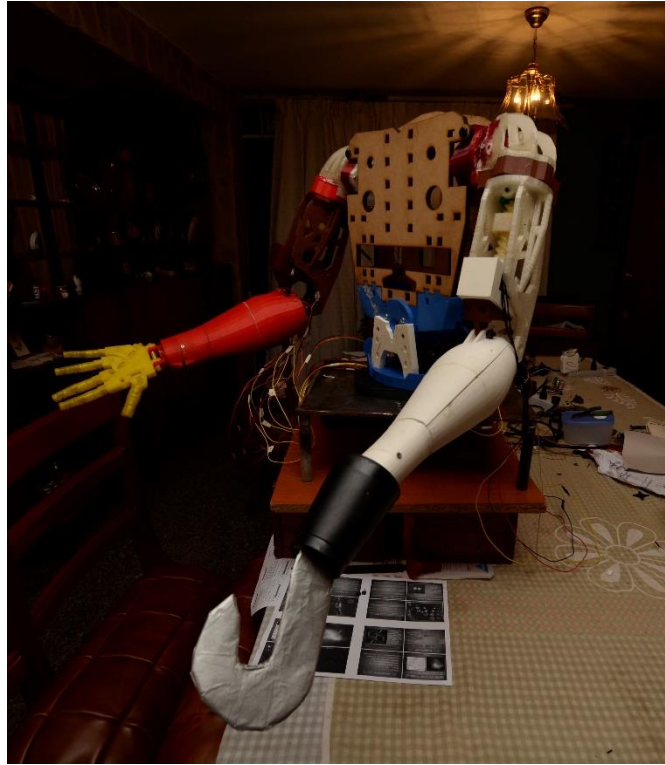


Figura 321. Torso y brazo rotando en sentido antihorario



Figura 322. Torso y brazos rotando en sentido horario



Después de agregar la base metálica al torso, se realizaron rutinas de movimiento barriendo todo el rango permisible de ángulos de cada motor para comprobar que la estructura se fuera estable durante cualquier movimiento, como se puede ver en la Fig. 320, 321 y 322 la estructura es estable al realizar diferentes movimientos.

VIII. MÓDULO BRAZO

A. RESUMEN

Guatemala es el único país de Centro América que presume de parques de temáticos con diversión a tope, siendo el Instituto de Recreación de los Trabajadores y la Empresa Privada, o por sus siglas (IRTRA), uno de los mejores parques a nivel Latinoamérica.

Este parque siempre ha estado a la vanguardia tanto por sus atracciones como por su infraestructura hotelera y calidad de servicio. En su constante búsqueda por mejorar, recurrieron a la Universidad Del Valle de Guatemala para proponer un proyecto de animatrónica que pronto se convertiría en un megaproyecto.

Este módulo del proyecto abarca los brazos de un animatrónico pirata, que debe ser diseñado, construido e integrado con él los demás módulos que forman el proyecto. En este documento se muestra el proceso de selección de diseño, análisis de fuerzas por cargas, análisis de esfuerzos estáticos de la estructura y mecanismos por medio de elementos finitos, selección de actuadores en base a las cargas de cada articulación, construcción y proceso de manufactura, así como la implementación de subrutinas para generar el movimiento.

Ésta es la primera fase del proyecto, por lo que se está trabajando como un prototipo financiado por la Universidad Del Valle de Guatemala.

B. INTRODUCCIÓN

En pleno del actual siglo vemos grandes transformaciones que ha tenido el medio social, asumiendo como auge principal el crecimiento tecnológico, donde se ven involucrados los profesionales, estudiantes, empresarios y por sobre todo las universidades como instituciones de educación superior que buscan fomentar la investigación, aplicación y desarrollo de las nuevas tendencias en tecnología para sobresalir en el país, creando así carreras novedosas que posicionan mejor a Guatemala en este ámbito, como es el caso de la ingeniería mecatrónica.

La Universidad Del Valle es pionera en la implementación de nuevas carreras que hacen competitivo al país, dándonos la oportunidad a nosotros los estudiantes de sobresalir no sólo a nivel nacional sino internacionalmente. Actualmente los proyectos de graduación han ido orientados a la industria, desarrollo e investigación, pero no a otros campos como al del arte de la industria de diversión y entretenimiento.

Por esta razón, decidimos investigar, desarrollar y construir un robot humanoide, o más bien, un animatrónico, que es un concepto asociado con la mecatrónica dedicado al entretenimiento, la animación y

el desarrollo de la industria cinematográfica, efectos especiales, parques de diversiones y en la pedagogía de la educación como campos de aplicación, sin aun mencionar otro campo que sería la publicidad.

Se busca desarrollar en el país el primer animatrónico, desde iniciar a introducir el concepto hasta la posibilidad de crear empresa; ya que desde los años 70's se ha empezado con esta nueva tendencia con el boom de los parques temáticos, teniendo como un claro ejemplos los parques Disneyland, Disneyworld y Universal Studios en Estados Unidos. Ellos fueron los precursores y hoy en día son los dueños de gran parte de esta selecta industria que desarrolla y distribuye a varios países en el mundo.

Este proyecto busca abrir oportunidades y mercado para que en Latinoamérica y mostrar lo que se puede lograr en el país; suena ambicioso, pero casos como China donde optaron la tecnología como un camino al desarrollo, han ganado un posicionamiento industrial muy importante.

Este trabajo tiene tres etapas importantes a desarrollar, la primera es la selección del diseño mecánico del animatrónico, en este proceso se tienen en cuenta la búsqueda de dispositivos, análisis de esfuerzos, selección de actuadores, selección de materiales para la construcción del mismo, en donde se evalúan aspectos como precio, tamaño, facilidad de uso y de reproducción. La segunda etapa es la etapa de manufactura, en la cual se tienen en cuenta los distintos tipos de manufactura que existen, donde se evalúan con respecto al material que se escogió, el precio y la facilidad y rapidez de reproducción. La tercera y última etapa consiste en unificar e integrar los diferentes módulos que se tienen y hacer las respectivas pruebas para lograr los movimientos deseados.

Estas tres etapas son las que marcan la interdisciplinaria del proyecto y los pasos a seguir para su desarrollo, además de brindar una base organizativa, dando como resultado final el brazo animatrónico de un pirata.

C. METODOLOGÍA

El proyecto consiste en crear un brazo animatrónico y que este tenga un movimiento humanoide y reaccione a diferentes movimientos captados por sensores.

Para la construcción e implementación de un animatrónico es importante que este tenga un movimiento realista del objeto o cuerpo que se desee representar. Se deberá iniciar con una búsqueda y selección de un modelo existe de un brazo humanoide que esté en la capacidad de realizar los movimientos deseados, complementando dichos diseños con modificaciones según sean requeridas, así como la implementación de nuevos diseños cuando este lo requiera. La principal herramienta para la investigación de modelos existentes será el internet, utilizando como fuente trabajos de tesis anteriormente realizados como proyectos, así como proyectos de código abierto y empresas consolidadas en la industria.

Cada uno de los modelos previos investigados, deben pasar por un proceso de análisis donde se determinará la mejor opción, tomando en cuenta simplicidad y costo de la estructura y mecanismos. En paralelo se debe trabajar con la investigación, análisis y selección de material con el que se va a trabajar, tomando en cuenta propiedades físicas, mecánicas y tecnológicas del mismo.

Definido el diseño y material, se hará un análisis estructural donde se determinarán las cargas críticas del brazo, para hacer la selección de los actuadores a utilizar para lograr el movimiento suave del brazo animatrónico.

Lo que procede es el diseño e implementación subrutinas de control, con las que se logre el movimiento humanoide del brazo, para lo cual, se debe hacer una investigación previa sobre que tipo de controlador se utilizará, previendo que este cumpla con los requerimientos del sistema.

Por último, se debe hacer la integración del módulo de brazo con los demás módulos del proyecto.

Figura 323. Diagrama de metodología del proyecto.



*Siempre se contó con la asistencia de un asesor calificado.

1. Calendarización

Cuadro 61. Calendarización de proyecto.

Actividades	Fecha inicio	Fecha final	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13	S14	S15	S16	S17	S18	S19	S20	S21	S22	S23	S24	S25
Modificar y analizar diseños existentes del torso	11/04/2016	02/05/2016	■	■	■																						
Análisis de esfuerzos y cargas críticas	02/05/2016	16/05/2016			■	■																					
Selección de actuadores	16/05/2016	23/05/2016					■																				
Manufactura de brazo	02/05/2016	30/07/2016		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■							
Construcción y e integración de brazo	25/07/2016	20/08/2016																	■	■	■	■					
Programación de subrutinas para control de actuadores	20/08/2016	10/09/2016																					■	■	■		
Pruebas e integración final	20/08/2016	29/09/2016																					■	■	■	■	■

D. ANÁLISIS ESTRUCTURAL Y DE MECANISMOS

La complejidad de los mecanismos del cuerpo humano ha sido tal, que desde épocas muy remotas el hombre ha buscado construir máquinas que tengan los movimientos y la forma de seres humanos y no se ha logrado obtener un resultado idéntico; la tecnología ha explotado en la actualidad y su objetivo de recrearnos no acaba.

Año con año se ha ido mejorando los mecanismos que imitan nuestros movimientos; la robótica he empeñado mucho tiempo de estudio e investigación en ello para mejorar los procesos robóticos industriales y cincuenta años más tarde se sigue trabajando en el diseño y fabricación de estas máquinas similares al ser humano.

Desde los años 70's hasta hoy en día, se han popularizado series de televisión, películas y *comics* donde los personajes que salen no son reales, pero logran recrear un robot que imite sus movimientos. A partir de ello un nuevo concepto dentro de la rama de la robótica empezó a formarse y los animatrónicos empezaron a surgir.

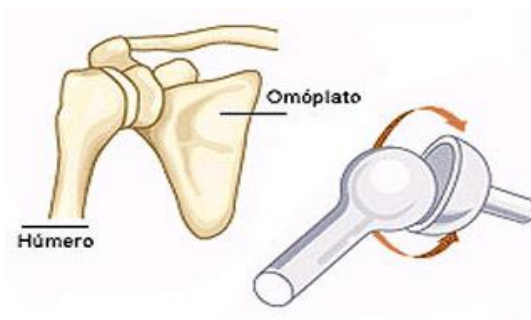
Las articulaciones mecánicas que simulan las articulaciones anatómicas se hacen por medio de articulaciones rotacionales, prismáticas, cilíndrica, helicoidal o de tornillo y esféricas; todas ellas son útiles para el diseño mecánico de robots humanoides o a fin, que requieran de distintos movimientos.

Cuadro 62. Articulaciones mecánicas y sus grados de libertad.

Articulación	Grados de libertad
Rotación	1
Prismática	1
Cilíndrica	2
Planar	2
Esférica	3

Debido a la complejidad del cuerpo humano en general, diseñar mecanismos que imiten fielmente todos los movimientos anatómicos es difícil de lograr en un robot de bajo costo; actualmente existen diseños de robots humanoides que imitan el movimiento humano, pero siguen teniendo un movimiento mecanizado.

Figura 324. Mecanismo ideal para la articulación del hombro.



(Glen Doman, 2015)

Por ejemplo, la articulación del hombro del cuerpo humano es una de las articulaciones más complejas, ya que tiene forma entre el húmero y omóplato una articulación esférica de 3 grados de libertad que mecánicamente se puede simular como una esfera que gira dentro de media esfera hueca, como se ve en la Figura 335.

Por restricciones de tiempo para diseños de mecanismos y construcción del animatrónico se optó por buscar diseños existentes en la internet que fueran de código abierto y permitieran obtener documentación suficiente para poder construir y hacer las modificaciones pertinentes de los diseños según nuestras necesidades.

Presentamos los diseños que se analizaron e investigaron para la construcción del animatrónico.

1. **Poppy Robot.** El proyecto *Poppy* es un proyecto enfocado en mejorar la enseñanza de las ciencias de la computación a través de la robótica. Esto es porque son muy fáciles de crear, fáciles de construir, personalizar e implementar (Poppy Robot, 2016).

Figura 325. Proyecto Poppy robot



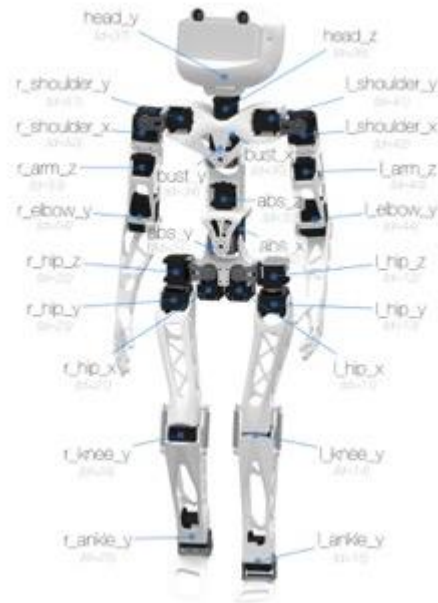
(Poppy Robot, 2016)

Como se puede observar la Figura 325, el modelo del *Poppy* es una simplificación del cuerpo humano, donde no existen mecanismos mecánicos para la transmisión de potencia, en cambio utilizan los actuadores para que ellos sean los que permitan darle los grados de libertad necesarios en cada articulación.

La estructura está hecha con una tecnología de impresión denominada SLA o sinterización selectiva por láser, el cual es un proceso en cual se convierte con un láser, un foto-polímero líquido en plástico sólido, capa por capa. Cada capa es diferente y un modelo 3D se produce sobre una placa perforada en el baño de foto-polímero.

Esta tecnología es necesaria para la fabricación de las piezas debido a las curvaturas y formas del modelado de las piezas, ya que en modelado por fundido de filamento o por sus siglas en inglés FDM, las piezas no podrían ser fabricadas debido al voladiza y la falta de material de soporte; el inconveniente de SLA es el precio y que no en muchos lugares tienen acceso a esta nueva tecnología.

La estructura del *Poppy Robot* en sus brazos hace una simplificación, reduciendo el movimiento del hombro a dos, el codo si toma en cuenta 2 movimientos y no tiene movimiento tanto en la muñeca como en ninguno de los dedos; cada brazo del mismo tiene una escala de 1:2.5 respecto a un brazo humano de tamaño promedio.

Figura 326. Anatomía del *Poppy Robot*.

(Poppy Robot, 2016)

2. **Inmoov.** El proyecto *Inmoov* fue lanzado en el año 2012 por Gael Langevin, un diseñador francés que trabajó por 25 años en las mejores marcas, hasta que decidió crear un proyecto personal de código abierto de una prótesis de mano.

Inmoov es el primer diseño de código abierto que es totalmente imprimible en 3D para la realización de un Robot de tamaño real. Este proyecto es totalmente replicable en cualquier impresora que uno pueda tener en la casa con un área de impresión de 120x120x120 mm mínimo, el objetivo de proyecto es que pueda ser concebido para plataformas de desarrollo en universidades, laboratorios y prácticamente cualquier usuario del internet que tenga la curiosidad de indagar en el proyecto.

La estructura del *Inmoov* como bien se decía, viene diseñada para hacerla desde cualquier impresora 3D de fusión de filamento (FDM), con la practicidad que uno puede escoger que material puede utilizar, entre PLA o bien ABS, que son de los materiales más comunes de impresión; lo que lo hace que el proceso de maquinizado sea posible de hacerlo desde la casa.

Figura 327. Robot humanoide *Inmoov*.

(Langevin, 2012)

La idea de un proyecto de una prótesis de mano creció a un humanoide de medio cuerpo superior, tomando en cuenta las dimensiones de una persona de estatura promedio; el diseño es tal que los miembros del brazo logran trayectorias que el cuerpo humano hace como movimientos normales.

3. Comparación y selección entre *Poppy Robot* e *Inmoov*. Para la selección del humanoide que mejor se adapta a los objetivos planteados del proyecto se tomaron en cuenta varios criterios de evaluación entre el Poppy Robot e Inmoov tomando en cuenta los parámetros del diseño anatómico, la estructura y su maquinabilidad, técnica de manufactura propuesta y facilidad de construcción e implementación.

Cuadro 63. Criterios de evaluación entre *Poppy Robot* e *Inmoov*.

Criterios de evaluación	<i>Poppy Robot</i>	<i>Inmoov</i>
Escala (respecto a humano promedio)	1:2.5	1:1
Tecnología de impresión 3D	SLA	FDM
Costo de manufactura	Alto	Medio
Mecanismo de transmisión de potencia	No	Si
Grados de libertad	5	
Desgaste de actuadores	Alto	Bajo
Robustez en el diseño	Bajo	Alto
Diseño anatómico	Simple	Complejo

Sólo se analizaron dos opciones, por lo que para la comparación no fue necesario hacer un *trade-story*, el cual permite hacer tomar decisiones cuando se tienen en cuenta varias opciones y debemos asegurarnos de escoger entre todas, la mejor opción para nosotros.

En este caso, existían dos opciones disponibles por lo que hacer una comparación entre ambas bastan para analizar los criterios de interés; estos criterios se determinaron con los objetivos del proyecto para poderlos cumplir.

El criterio de la escala era importante por los requisitos, ya que se nos había solicitado hacer un animatrónico humanoide de un pirata, así que la escala era un requisito importante que debíamos tomar en cuenta; el proyecto *Inmoov* es el primerio proyecto código abierto que permite realizar un robot a tamaño real hecho a base de impresiones 3D.

La tecnología de impresión también era importante, no porque estuviera en nuestros objetivos utilizar una específica, sino por el tiempo que nos tomaría la construcción del prototipo debíamos seleccionar una que tuviéramos a nuestro alcance y fuera de bajo costo la manufactura. La tecnología FDM es con la que contamos en la Universidad y con la que tenemos experiencia trabajando; es la tecnología más barata y con la que podríamos hasta contar en nuestra casa. La tecnología de SLA en Guatemala no existe comercialmente, por lo que deberíamos de haber mandado a maquinar nuestras piezas al extranjero y el costo y tiempo habría incrementado.

El costo es el objetivo principal del proyecto, ya que se desea construir el primer animatrónico en Guatemala y que fuera de bajo costo. La manufactura de menor costo para la construcción del prototipo era más barata la del *Inmoov* debido a que la impresión 3D por FDM ya que el material tiene un bajo costo comparado con una impresión por SLA. Hay que dejar claro que un prototipo puede ser manufactura con impresión 3D, en cambio la versión final del mismo, habría que tomar en análisis otras tecnologías de manufactura y el costo incrementaría.

Siempre que se quiere hacer un proyecto a largo plazo, es necesario tomar en cuenta que nuestros actuadores toleren las exigencias a las que sean expuestos por un prolongado lapso de tiempo. Para ello, es bueno tener un mecanismo que transmita potencia para reducir el esfuerzo o fatiga de los mismos y así prolongar su tiempo de vida. Además, que los mecanismos permiten un movimiento menos robotizado, recreando un movimiento más real.

Los grados de libertad nos dice que tantos movimientos podemos recrear, así que, si nuestro objetivo es hacer un animatrónico, deseamos tener la mayor cantidad de movimientos posibles en cada extremidad para hacer una imitación más fiel del movimiento humano.

En robustez del diseño nos referimos a que tan fácil es hacer modificaciones y adaptaciones; teniendo en cuenta que el diseño del *Inmoov* es por sus mecanismos implementados, es más simple corregir y mejorar algunos de sus movimientos.

El diseño anatómico complejo del *Inmoov* tiene una gran ventaja para nuestro proyecto, ya que nos permite dar una mayor visión de una persona real y pone en contexto al animatrónico para que simule no solo en movimientos sino en apariencia con la de un humano.

4. Mecanismos utilizados por el humanoide *Inmoov*. El diseño del *Inmoov* cuenta con mecanismos para transmisión de potencia y generar los movimientos deseados en cada articulación, según sea el caso de la potencia o fuerza requerida, para que los actuadores no tengan que transmitir el 100% de la potencia al general el movimiento.

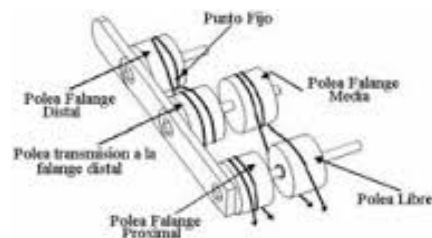
En nuestro caso, del proyecto *Inmoov* nos basamos en sus diseños de mano y antebrazo, bíceps y hombro. Se detallarán los mecanismos y detalles de cada uno de estos y se hablarán de las modificaciones a los mismo si existieron.

a. Mano. El objetivo del francés al iniciar el proyecto fue construir una prótesis de mano para que fuera de código abierto y que las personas fueran capaces de obtenerlo sin ningún costo; por lo que colocó mucho énfasis en el mecanismo de los dedos la mano.

El proyecto *Inmoov* implementa en la mano un mecanismo básico de polea e hilo; el movimiento del dedo queda totalmente restringido a la tensión o compresión del hilo. Para que el hilo logre transmitir este debe estar todos unidos a un punto fijo a las respectivas poleas para así evitar desplazamiento y lograr que el movimiento se transmita.

Este mecanismo produce una gran ventaja respecto a otros ya que, por lo simple del mismo, se reduce el peso de la mano considerablemente y es fácil de implementar ya que podemos usar variedad de hilos que soporten la fricción y tensión a la que están sometidos que no es mucha.

Figura 328. Sistema de poleas para la generación de movimientos.

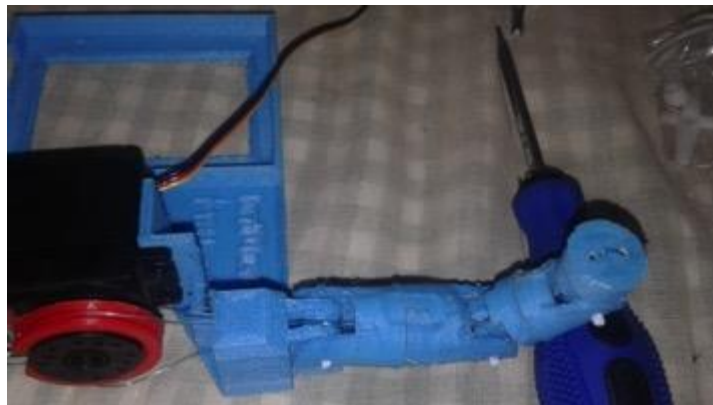


(Pulido, 2012)

Cuando el eje del servo motor gira a una velocidad n , si la polea se encuentra atornillada o soldada al mismo, está también gira a una velocidad n , mientras que la velocidad tangencial v depende del radio de la misma.

La polea de este mecanismo transmite a través de una cuerda cerrada, su movimiento a otra polea o estructura que esté fija en otro mecanismo receptor. La polea que transmite el movimiento se le denomina motora o conductora, en tanto que la que recibe el movimiento recibe el nombre de conducida; en este caso el final del dedo es nuestra polea conducida que esta fija y por los ejes de las falanges transmite el movimiento y estos permiten movimiento rotacional.

Figura 329. Sistema de poleas para la generación de movimientos en los mecanismos de los dedos.



1) Pruebas con el mecanismo de accionamiento. Antes de hacer la mano completa a escala real, se hizo pruebas del mecanismo en un diseño de un solo dedo, donde se ponía a prueba el radio de la polea y él se puso a prueba el hilo de pescar escogido, de un diámetro de 0.5 mm de grosor.

La prueba se hizo con el dedo índice de la mano y con un servomotor, el cual es un servomotor estándar de engranes de plásticos. Teniendo el dedo montado la estructura de soporte con las conexiones del tendón al servomotor, se realizó un programa en la plataforma de Arduino, << plataforma de hardware libre, con un microcontrolador Atmega que tiene una placa y plataforma de desarrollo integrada>> (Arduino, 2016). Se realizó un programa que tuviera el control de la posición del servomotor enviándole la señal a través de comunicación serial.

2) Experimentación con servomotor HS-322HD. El objetivo de este inciso es comprobar el mecanismo de articulación por medio de tendones con un servomotor, que, aunque no es el que se quiere proponer, es de características muy parecidas ya que es con el que se contaba en el momento.

Figura 330. Servomotor HS-322HD



(Hitec, 2016)

3) Resultados y análisis de resultados de mecanismo de accionamiento. El experimento funcionó bien, pero fue bastante útil para mejorar la prueba colocando nuestro servomotor en una posición de 0° ó 180° y con base en ese punto definir si el dedo estaría en extensión o en flexión, y en ese momento tensar el hilo, para que al llegar a la otra posición el hilo no perdiera tensión y alcanzaría su posición contraria fácilmente.

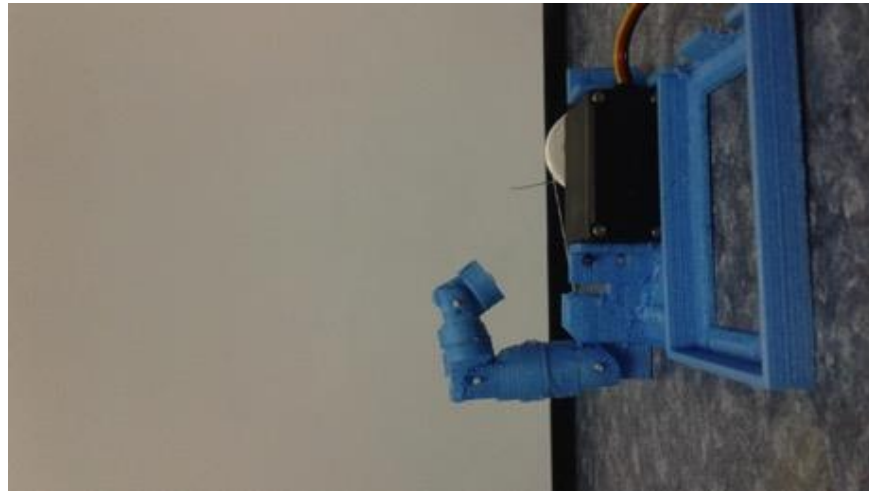
En las pruebas el hilo de pescar de 0.5 mm funcionó bien, ya que estábamos exigiéndolo con una tensión considerable y el hilo no tuvo deformaciones visibles, ni índices de desgaste, ya que se hizo una prueba de estar flexionando y extendiendo el dedo constantemente y este soportó la tensión de buena manera.

En las figuras 331 y 332 muestra el mecanismo del en extensión y en flexión respectivamente.

Figura 331. Mecanismo de dedo extendido con hilo de pescar de 0.5 mm de grosor.



Figura 332. Mecanismo de dedo flexionado con hilo de pescar de 0.5 mm de grosor.



4) Ensamblaje de dedos. Las pruebas del mecanismo nos darían una visión de cómo se comportaría el mecanismo con todos los dedos juntos; del mismo modo nos dio un procedimiento de cómo debíamos proceder a ensamblarlos para obtener los mejores resultados.

El hecho de nosotros definir una posición inicial para los dedos nos permite predecir y calibrar mejor la otra posición, que en ningún caso fue necesario llevar a nuestros servos a la posición opuesta a la inicial, es decir que si empezamos en 0° grados nunca se llegó a 180° por el diámetro de la polea.

b. Codo. El codo es una de las extremidades más útiles que tiene el cuerpo humano, ya que gracias a él podemos hacer muchas de las actividades fundamentales para vivir, como lo es llevar la comida y agua a nuestra boca; del mismo modo podemos levantar peso, por lo que en si es una extremidad que la sometemos constantemente a muchos esfuerzos cotidianamente.

El diseño del mecanismo que tenga la extremidad debe ser robusto y sencillo, por el espacio que se tiene, no podemos poner un mecanismo que tenga gran tamaño ya que no excedería la capacidad de dimensiones que se tiene.

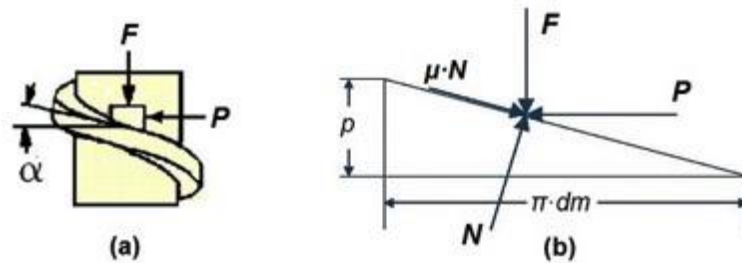
El proyecto *Inmoov* propone un mecanismo de tornillo potencia, el cual debemos analizar para comprobarlo.

Los tornillos, como elementos de sujeción son de los más utilizados en la actualidad para máquinas y estructuras. Estos según la misión que cumplen, también se pueden clasificar en tornillos de sujeción y de potencia.

Los tornillos de potencia, los cuales en este documento son de interés, son tornillos destinados a la transmisión de potencia y movimiento, y son muy útiles ya que tienen la capacidad de convertir el movimiento rotacional a lineal, acompañado de transmisión de potencia.

Un tornillo puede ser considerado, de manera simple como un cilindro con un vástago que se enrolla en un plano inclinado formando filetes de la rosca del tornillo.

Figura 333. Principio de un tornillo de potencia.



(Pulido, 2012)

Al disponer de una tuerca enroscada en el tornillo, al girar el tornillo 360° , la tuerca recorre sobre el plano inclinado una longitud de circunferencia igual a πd_m siendo d_m el diámetro medio de la rosca, y se traslada una distancia x según la dirección axial o longitudinal del tornillo.

La distancia longitudinal x recorrida por la tuerca en una sola revolución se llama paso o avance del tornillo, siendo el ángulo de paso α el dado por la expresión:

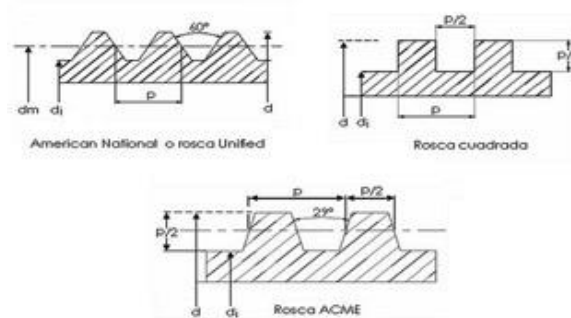
Ecuación 1. Ángulo de paso de tornillo de potencial

$$\alpha = \tan\left(\frac{x}{\pi d_m}\right)^{-1}$$

Generalmente, estos tornillos trabajan sometidos a un rozamiento elevado por la fricción entre la rosca del tornillo y la tuerca. Para ello, es importante diseñar con factores como desgaste y calentamiento excesivo de las superficies es recomendable.

En tornillos de potencia, las roscas más empleadas en el fileteado del tornillo son la rosca cuadrada, la rosca ACMA y la rosca unificada.

Figura 334. Tipos de roscas comúnmente utilizadas para tornillos de potencia.



(Universidad de los Andes, 2015)

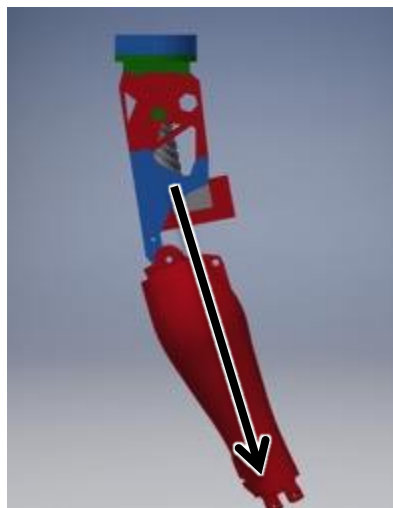
La rosca cuadrada es una de las roscas más utilizadas por que posee mayor rendimiento y eficiencia; la rosca ACME tiene preferencia en este caso, por el ángulo de 29 por el ajuste que consigue esta rosca.

1) Análisis de fuerza y torque para mecanismo. En esta sección se van a mostrar las distintas expresiones matemáticas que se utilizan para calcular el par torsional necesario para hacer girar al tornillo en la elevación o descenso de del brazo y los cálculos resultantes de dicho análisis.

Primero es necesario conocer la carga a la que estará sometida el mecanismo de tornillo de potencia. Para la carga se tomará el peor de los casos, en donde la carga es máxima, ya que, si cumple para este caso, cumplirá para los demás.

El brazo que se analizará será el que tiene todo el mecanismo de la mano y dedos, ya que este mecanismo ejerce una mayor carga a la extremidad del codo.

Figura 335. Brazo humano ensamblado en posición crítica para la extremidad del codo.



En la Figura 346 se muestra porque se toma la carga crítica cuando el brazo codo esta en extensión, debido a que la carga está en la línea de acción del tornillo, por lo que la carga es máxima en ese punto.

La carga en ese punto la tomamos como la masa del brazo multiplicada por la gravedad para tener la fuerza que el tornillo de potencia debe ser capaz de mover para crear el movimiento de elevación.

Cuadro 64. Tabla de masas y pesos de los antebrazos.

Pieza	Masa (kg)	Fuerza (N)
Antebrazo y mano derecha	1.1022	10.81
Antebrazo izquierda	0.5372	5.27

La fuerza que vamos a utilizar para el cálculo será la del antebrazo y mano derecha del Cuadro 64. Para hacer el cálculo se parte de las ecuaciones de equilibrio de las fuerzas que gobiernan el mecanismo.

La fuerza en ese punto es ejercida puntalmente en el mecanismo, por lo que no necesitamos trasladar ninguna fuerza ni su respectivo momento, se toma como una carga puntal al tornillo de potencia.

Como parámetros de diseño del tornillo de potencia se tiene:

α : ángulo de hélice

λ : ángulo de avance

p : paso o avance del tornillo

μ : coeficiente de fricción

d_m : diámetro medio del tornillo

F : fuerzas axiales que actúan sobre el tornillo

P : fuerza necesaria para vencer la fuerza de rozamiento

Varios de estos parámetros vienen definidos por el tornillo que estaba previamente diseñado; vamos analizar el caso en el que tornillo tiene que elevar la carga a un punto máximo.

Es necesario aplicar un par torsional T al tornillo que lo haga girar y consiga elevar axialmente a la carga, para lo cual debe vencer al rozamiento entre la rosca del tornillo y tuerca. El cálculo de una rosca cuadrada es sencillo por el hecho que la carga normal es paralela al eje longitudinal del tornillo; en cambio para la rosca tipo ACME, la normal ya no es paralela al eje longitudinal del tornillo, sino que se sitúa inclinada respecto al eje longitudinal del eje a θ grados.

Ecuación 2. Torque de entrada de tornillo de potencia de rosca cuadrada.

$$T = \frac{F * d_m p + \pi * \mu * d_m}{2 \pi * d_m - \mu * p}$$

El efecto de θ es incrementar la fricción entre la rosca, debido a la acción de acuñamiento de los hilos. Por lo que las ecuaciones de torque en los términos de las ecuaciones anteriores donde interviene la fricción, se deberá dividir por $\cos(\theta)$, con objeto de tener considerado dicho efecto.

Ecuación 3. Torque de entrada para un tornillo de potencia de rosca ACME.

$$T = \frac{F * d_m p + \pi * \mu * d_m * \sec(\theta)}{2 \pi * d_m - \mu * p * \sec(\theta)}$$

En este punto tenemos la capacidad de encontrar el par de torsión necesario en función a los parámetros de nuestro tornillo de potencia y la fuerza del brazo que ejerce sobre el mismo.

La fuerza F la tomamos del Cuadro 64, donde la carga crítica tomamos la del antebrazo derecho junto con la mano de 10.81N; los parámetros d_m, p, θ son parámetros del tornillo definidos. Para el coeficiente de fricción se investigaron materiales parecidos y se tomó como referencia al ABS, el cual su coeficiente máximo es de 0.80, por lo que se tomó el peor de los casos y con base a eso se seleccionó. (Ferrer, 2014)

En los cálculos del tornillo no aparece, pero nosotros tomamos un factor de seguridad de dos para el diseño, debido a que se tienen imperfecciones en las piezas en la manufactura, ya que en algunos casos fue necesario lijar el mecanismo para evitar interferencia entre ellas, por lo que cambiamos el acabado superficial de cada una de las piezas. Para contrarrestarlo tomamos en cuenta un factor de seguridad lo suficiente alto, con el cual nos aseguramos este funciona correctamente.

Figura 336. Diseño de tornillos de potencia dibujados en Inventor



Se hizo el cálculo del torque máximo que debía romper la inercia y generar el movimiento en la posición crítica del movimiento y se determinó que el par torsor debía ser:

Cuadro 65. Resultados de par torsor máximo para mecanismos tornillo de potencia.

Mecanismo	Par torsor máximo (N*m)	Par torsor máximo (kgf*cm)
Tornillo de potencia	1.84	18.73

2) Análisis de resultados de fuerza y torque de mecanismo de tornillo de potencia. En el paso anterior se hicieron los cálculos que dicta la teoría sobre los tornillos de potencia. En general, un tornillo de potencia no es un mecanismo que multiplique el torque, sino solo transmite de un movimiento radial a un movimiento lineal; por estas características el mecanismo es utilizado mucho para la elevación y descenso de fuerzas.

Hay que tomar en cuenta que un mecanismo de tornillo de potencia, su eficiencia es baja, debido a que el movimiento necesita romper el coeficiente de fricción que por lo regular es alto entre superficies para que este tenga auto enclavamiento y cuando este fijo este no ceda y caiga la carga.

Se calculó la eficiencia del tornillo de potencia con la siguiente ecuación:

Ecuación 4. Eficiencia de tornillo de potencia.

$$n = \frac{\cos(\theta) - \mu * \tan(\alpha)}{\cos(\theta) + \mu * \cotg(\alpha)} = 0.25$$

Por lo que es una eficiencia teórica bastante baja, estamos calculando que nuestro actuador transmite solo el 25% de su torque al mecanismo y se desperdicia en fricción más de la mitad. Esto es de tenerlo en cuenta, debido que a la hora de seleccionar el actuador debemos considerar que si necesitamos un actuador de 18.27 kgf*cm realmente necesitamos uno de 11 kgf*cm para que logre moverlo.

Esto no es del todo cierto, debido a que no se encontró el coeficiente de fricción del material PLA y se estimó con uno conocido, así como que la fuerza puede que no se transmita toda en la línea de acción del mecanismo, sino se tenga que descomponer en componentes y ahí hacer el análisis de torque de nuevo.

c. Hombro. El proyecto *Inmoov* en su diseño del hombro implementa un mecanismo básico denominado tornillo sinfín, para hacer su movimiento de flexión y extensión del brazo completo.

Los tornillos sinfín o bien gusanos representan un cuarto tipo de engranaje básico y se asemeja a los tornillos como se muestra en la Figura 348. La dirección de giro de la corona o engrane acoplado depende de la dirección de giro del tornillo y de la dirección de los dientes de la corona, que puede ser de corte derecho o izquierdo.

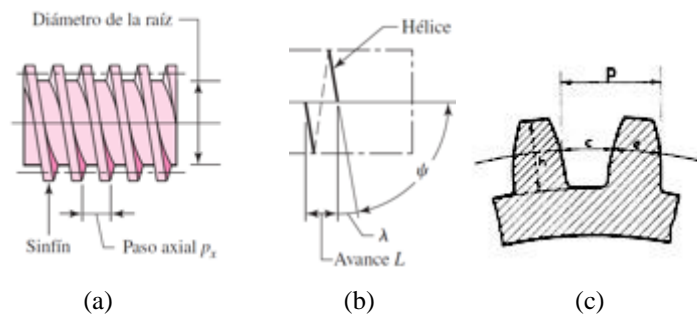
El tornillo sinfín se utiliza para transmitir la potencia entre ejes que se cruzan, por lo regular perpendicularmente entre sí. La relación de velocidad de entrada con la de salida depende de la corona, pero por lo regular se busca multiplicar el torque sacrificando velocidad; así con son mecanismo que no giran rápido, pero tienen bastante torque en el eje de salida.

Figura 337. Tornillo sinfín y corona.



(Universidad de los Andes, 2015)

Figura 338. Nomenclatura para tornillo sinfín.



(Shigley's, 2011)

Para el tornillo sinfín se define un ángulo de la hélice, el cual está definido como el ángulo de avance λ . Cuando se tiene un sistema con ejes a 90° , el ángulo de avance del tornillo y el ángulo de hélice del engranaje p deben ser iguales.

El diámetro de paso del engranaje, se puede definir igual que el diámetro de un engrane recto:

Ecuación 5. Diámetro de paso de engrane de corona.

$$d_G = \frac{N_G p_t}{n}$$

Donde N_G = número de dientes en el engrane.

Para tener una capacidad máxima de potencia en el acople es necesario elegir un diámetro de paso que este dentro del siguiente rango:

Ecuación 6. Rango para seleccionar diámetro de paso.

$$\frac{C^{0.875}}{3} \leq d_w \leq \frac{C^{0.875}}{1.7}$$

Donde C es la distancia entre centros que está definida como:

Ecuación 7. Distancia entre centros de engranes

$$C = \frac{d_w + d_G}{2}$$

El mismo diámetro que se desea calcular es necesario para obtener la distancia ente centros, por lo que el diseño se vuelve iterativo que es necesario hacer varias revisiones como llegar a una conclusión en el diseño. Comúnmente es acostumbrado seleccionar un diámetro de paso deseado para el tornillo sinfín y a partir de este calcular la distancia ente centros y se analiza si se encuentra en el rango ideal.

Se define el avance (L) como la distancia que recorre un punto del hilo del engranaje al de dar este una revolución completa. Existe una relación entre el avance y el ángulo de avance que se define:

Ecuación 8. Ecuación de avance de un engrane.

$$L = p_x N_w$$

Ecuación 9. Ecuación de ángulo de avance.

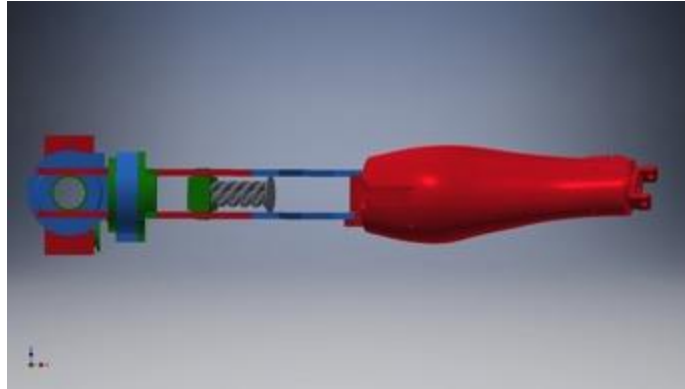
$$\tan \lambda = \frac{L}{\pi d_w}$$

En base a estas relaciones se puede definir un paso axial deseado, un número de hilo para el tornillo y obtener un avance. Una vez se sabe el avance, se puede definir un diámetro para obtener un ángulo de avance deseado, o bien viceversa.

1) **Análisis de fuerza y torque para mecanismo.** El hombro es una articulación crítica para nuestro brazo ya que tiene que vencer toda la carga del brazo para generar movimiento. Se requiere calcular el par torsional necesario para girar al tornillo a la posición deseada; para ello se analizarán las fuerzas en el mecanismo cuando la carga es crítica y luego analizando los cálculos resultantes.

Primero es necesario conocer la carga a la que estará sometida el mecanismo de tornillo sinfín. Para la carga se tomará el peor de los casos, en donde la carga es máxima, ya que, si cumple para este caso, cumplirá para los demás.

Figura 339. Posición donde sucede la carga máxima del hombro.



El brazo que se tomará para análisis, será el que tiene todo el mecanismo de la mano y dedos, ya que este mecanismo ejerce una carga mayor al tornillo sinfín. Tenemos la masa del brazo completo y tomaremos que el centroide está ubicado a $L/2$ del brazo, donde L es la distancia total del brazo tomado desde el centro del hombro.

Cuadro 66. Tabla de masas y pesos de brazos completos.

Pieza	Masa (kg)	Fuerza (N)	Longitud (m)
Brazo derecho	1.87	18.34	0.72
Brazo izquierdo	1.24	12.16	0.63

Para los cálculos, era necesario tener la carga de los brazos y en el punto crítico que debemos analizar, era necesario calcular el torque que producía la carga en el mecanismo, para lo cual se hizo sumatorias de momentos en el eje Y sobre el punto medio del hombro.

La fuerza que ejerce todo el brazo en el hombro, lo obtenemos de la tabla 66.

$$F_o = 18.34N$$

La fuerza crítica del brazo estará en el centroide cuando este esté en la posición presentada en la Figura 339. Tomando en cuenta que estamos analizando el brazo de mayor carga:

$$L = \frac{0.72m}{2} = 0.36m$$

Por lo que nuestro torque máximo que tienen que soportar nuestro mecanismo generado por nuestra carga en la posición de la Figura 339 es de:

$$T_o = 18.34N * 0.36m = 6.60N * m = 67.29kgf * cm$$

Por lo que, si no tuviéramos un mecanismo en la articulación, nuestro torque de entrada debería de ser por lo menos de 70 kgf*cm para que este genere el movimiento; el brazo tiene implementado un mecanismo de tornillo sinfín, que entre sus propiedades es aumentar la potencia en cierta relación que está definida por la corona.

El tornillo sinfín tiene una relación de 15:1, aunque por la manufactura y material del mecanismo del sinfín para el diseño se tomó la peor eficiencia que este podía tener, que era de 40%. Este parámetro de diseño se optó para así asegurarnos que transmita movimiento aun en su peor eficiencia.

Tomando esto en cuenta, se calculó la eficiencia del tornillo y el torque requerido en la entrada se tiene que:

Ecuación 10. Cálculo de eficiencia

$$e = 0.40 * 15 = 6$$

Ecuación 11. Cálculo de torque de entrada para mecanismo de tornillo sinfín

$$T_i = \frac{T_o}{e} = \frac{67.29kgf * cm}{6} = 11.22kgf * cm$$

Se obtuvo el par torsor necesario para transmitir movimiento a la articulación del hombro, tomando en consideración la carga máxima y el momento que este genera sobre dicha articulación.

Cuadro 67. Resultados de par torsor máximo para mecanismos tornillo de potencia.

Mecanismo	Par torsor máximo (N*m)	Par torsor máximo (kgf*cm)
Tornillo sinfín	1.10	11.22

2) Análisis de resultados de fuerza y torque de mecanismo de tornillo sinfín.

En la sección anterior se hizo el cálculo del par torsor para vencer la inercia del mecanismo, tomando en cuenta la peor eficiencia teórica que el tornillo sinfín posee para asegurar que este se movería.

El mecanismo implementado tiene su lubricación, tanto del tornillo como de la corona y la superficie donde actúa, con el fin de reducir la fricción y el desgaste del mismo, por la tecnología de impresión 3D que se utilizó a base de capas, las superficies no quedan con un acabado superficial fino.

Se diseñó el mecanismo con una eficiencia del 40% ya que por las oscilaciones y excentricidad que existe en las piezas, no transmite el torque de entrada en la relación de 1:15 que debería. Se debe asegurar en el análisis de esfuerzos que el factor de seguridad sea alto para asegurar que no exista falla en ninguna de las piezas.

3) **Análisis de esfuerzos estáticos estructural.** El análisis de esfuerzos estructural fue realizado en el *software Ansys*, el cual es: <un ecosistema de programas CAE para diseño, análisis y simulación de partes por elementos finitos FEA> (Ansys, 2016). Ansys es un software que incluye las fases de preparación de malleo, ejecución y post proceso, el programa ejecuta análisis de piezas sometidas a fenómenos físicos usadas en ingeniería y diseño mecánico, puede resolver problemas físicos sometidos a esfuerzos térmicos, fluidos, vibración y aplicaciones específicas, brevemente se describen sus módulos principales por disciplina.

Para el análisis estructural nos basamos en el criterio de Von Mises conocida como la teoría de la distorsión máxima. En si la teoría exhibe que un material dúctil empieza a ceder a una ubicación cuando la tensión de Von Mises iguala el límite de la tensión. En la mayoría de casos, el límite elástico se utiliza como el límite de tensión o rotura. Esa propiedad es del material dependiente de la temperatura; el software tiene un catálogo de materiales con lo que podemos escoger el material o bien crear uno nuevo si no existiera.

El análisis también se hizo para el factor de seguridad por estrés, el cual nos indica la capacidad del material a resistir cargas por tensión; las cuales se miden por la tensión máxima que un material puede soportar.

Para el material PLA fue necesario crear un nuevo material, ya que este no estaba en las librerías de los mismos. Se encontró que el material tiene un límite de la tensión igual a 36 MPa en su peor caso.

d. **Antebrazo.** La estructura del antebrazo está compuesta por la muñeca y el codo; además que tiene una carga considerable en ella, por los mecanismos de los dedos que se implementan con un servomotor cada uno de ellos, además de la carga por el servomotor de la muñeca.

La estructura está totalmente manufacturada con impresión 3D por deposición de material con el filamento PLA; se tomó en cuenta para el análisis que dichas piezas no eran totalmente sólidas, ya que en la manufactura nosotros le programábamos un porcentaje de relleno y el patrón con el que queríamos lo hiciera, en promedio se utilizó un porcentaje de 40% de relleno sólido para el análisis.

Para el antebrazo se tomó en cuenta la fuerza que ejercía la mano y se trasladó con su respectivo momento hasta el punto de giro, donde estábamos analizando la carga, así como la carga misma que ejerce el antebrazo en su centroide hasta el mismo punto de giro.

Se tuvieron los siguientes resultados para la estructura del antebrazo:

Cuadro 68. Resultados para análisis de esfuerzos para la estructura del antebrazo

Esfuerzo	Mínimo (Pa)	Máximo (MPa)
Von Misses	0.062	3.78

Cuadro 69. Resultados para el factor de seguridad de la estructura del antebrazo

Factor de seguridad	Mínimo (Pa)	Máximo (MPa)
Estrés	9.53	15

Figura 340. Esfuerzo de Von-Mises en estructura del antebrazo.

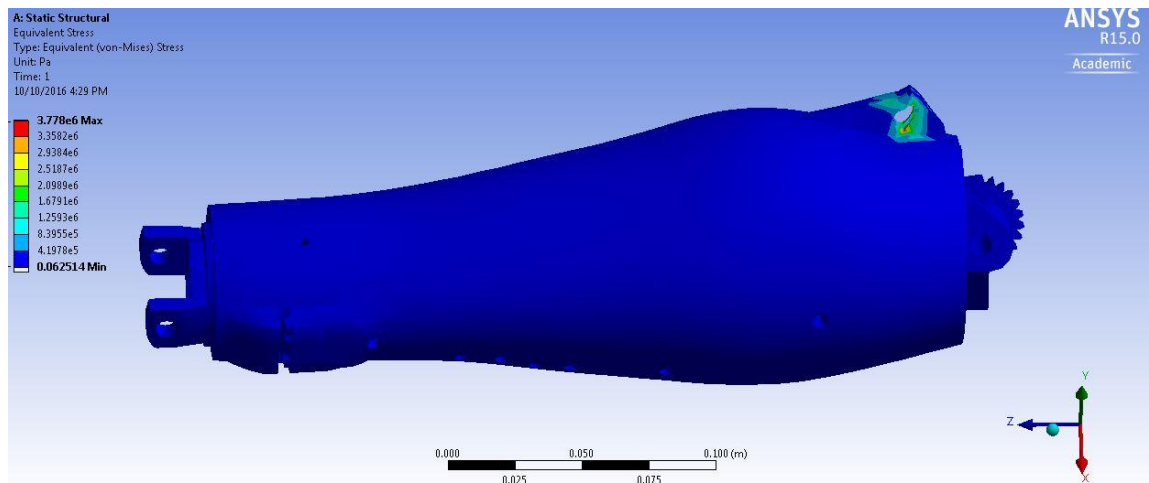
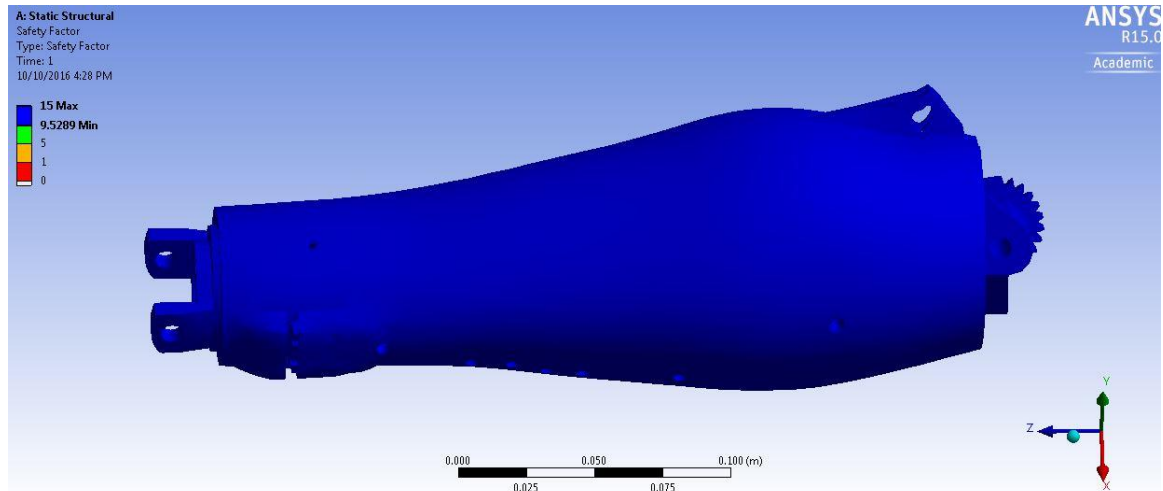


Figura 341. Factor de seguridad a estrés en estructura del antebrazo.



En la Figura 351 y 352 se muestra el resultado al análisis de esfuerzos por Ansys para la estructura del brazo, al costado superior izquierdo se muestran las unidades en las que despliega el rango entre el máximo y mínimo valor del esfuerzo.

El valor de interés es el valor máximo en este caso, ya que debemos compararlo con nuestro valor de tensión del material para comprobar nuestra estructura y su capacidad de soportar las cargas críticas del sistema.

En este caso se tiene que la carga crítica está concentrada en la unión entre el bíceps y el antebrazo que lo que se esperaba por la concentración de esfuerzos que se da en este punto. El máximo de los esfuerzos es menor que la tensión máxima, así que no debería existir deformación; comprobado de igual manera con el factor de seguridad que es de nuevo el mínimo, el cual es muy superior al dos que es recomendable.

e. Bíceps. De igual forma la estructura del bíceps está manufacturada en tecnología de impresión 3D con filamento PLA. Para su análisis se tomaron en cuenta las cargas críticas inducidas por el antebrazo y su mismo peso.

Para este análisis se dividió la estructura del mecanismo para ser más objetivos en el mismo. Se obtuvieron los siguientes resultados para el análisis estructural:

Cuadro 70. Resultados para análisis de esfuerzos para la estructura del antebrazo

Esfuerzo	Mínimo (kPa)	Máximo (MPa)
Von Misses	6.31	19.38

Cuadro 71. Resultados para el factor de seguridad de la estructura del antebrazo

Factor de seguridad	Mínimo (Pa)	Máximo (MPa)
Estrés	12.89	15

Figura 342. Esfuerzo de Von-Mises en estructura del bíceps.

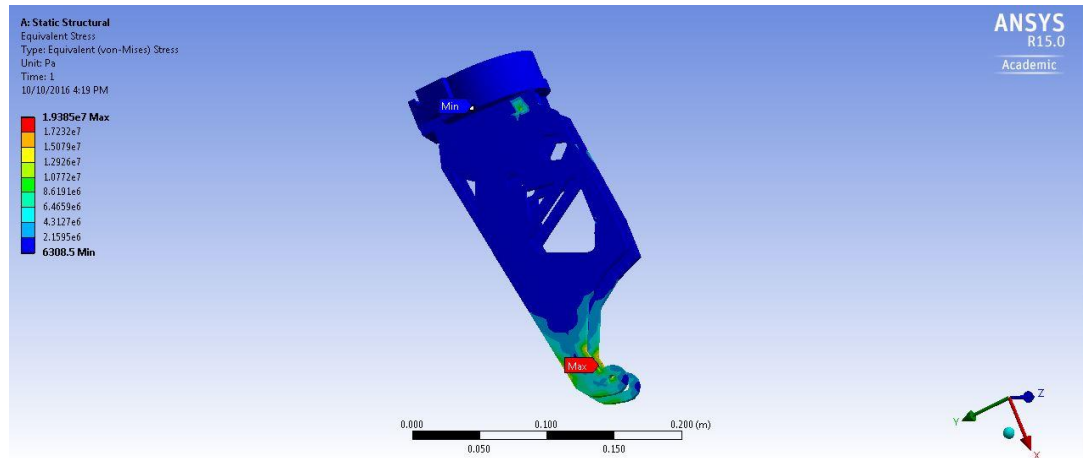
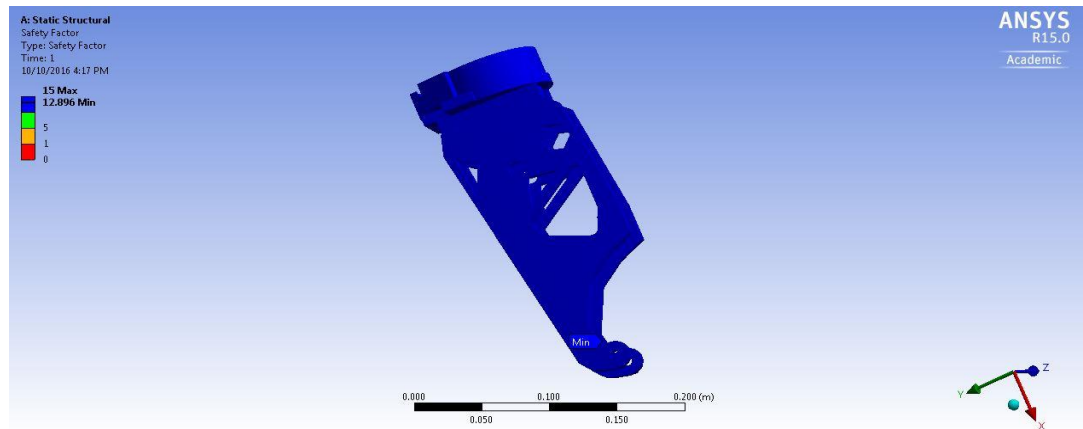


Figura 343. Factor de seguridad a estrés en estructura del bíceps.



Para la estructura del bíceps se tiene una mayor deformación en las orejas de la estructura, donde se conecta a la estructura del antebrazo y recibe toda la carga del tornillo para transmitir el movimiento al antebrazo, así que sin mucho análisis se ve claramente que por la forma en ese punto de la estructura existirá concentración de esfuerzos en ella.

El esfuerzo máximo no sobrepasa el límite, por lo que no existe deformación y el alto factor de seguridad de la Figura 354 nos da validez para afirmar que la estructura no fallara en este punto.

1) Análisis de esfuerzos en mecanismo de bíceps. El mecanismo del tornillo de potencia soporta la mayor carga del antebrazo, por lo que es de interés hacer un análisis por aparte de la estructura del mismo. En ella tomamos en cuenta el par torsor necesario que obtuvimos en el apartado de fuerzas, así como la fuerza que ejerce el antebrazo; para ello tomamos la carga cuando esta es máxima.

Cuadro 72. Resultados para análisis de esfuerzos para mecanismo de tornillo de potencia del codo.

Esfuerzo	Mínimo (kPa)	Máximo (MPa)
Von Misses	3186.30	27.34

Cuadro 73. Resultados para el factor de seguridad para mecanismo de tornillo de potencia del codo.

Factor de seguridad	Mínimo (Pa)	Máximo (MPa)
Estrés	1.32	15

Figura 344. Esfuerzo de Von-Mises en mecanismo de tornillo de potencia del bíceps.

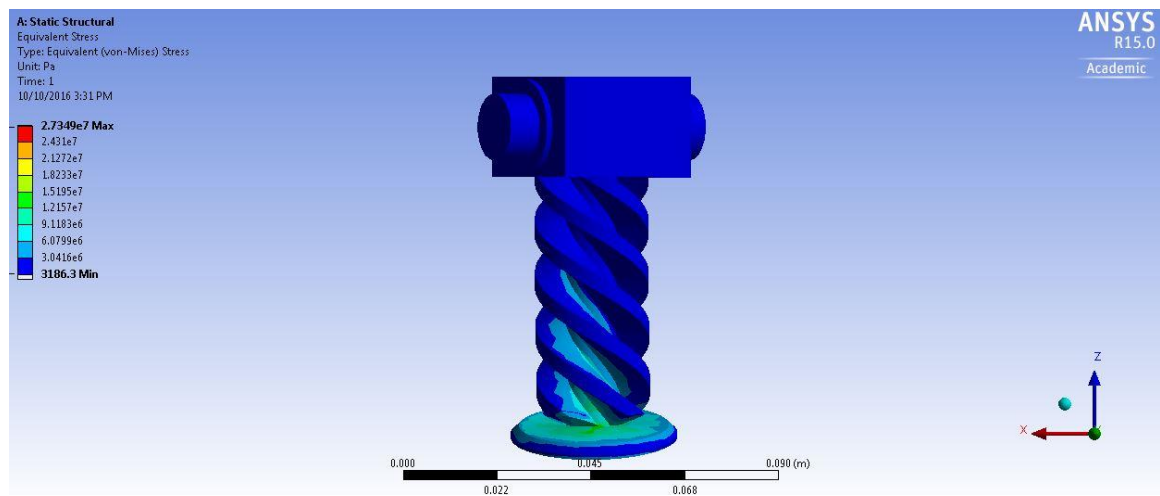
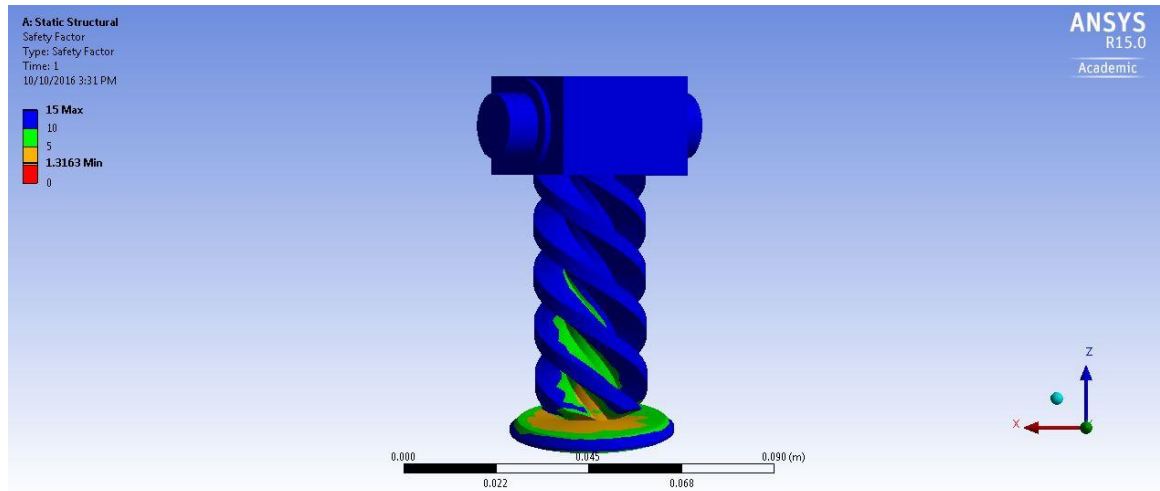


Figura 345. Factor de seguridad de estrés en mecanismo de tornillo de potencia del bíceps.



De las figuras 355 y 356 se tienen los esfuerzos máximos y el factor de seguridad respectivamente. En los esfuerzos se tiene que la concentración se da mayormente en las hélices del tornillo que están en contacto con las hélices de las roscas; para este caso se tiene un factor de 1.32, el cual es menor que el dos que es lo recomendado. Hay que tomar en cuenta que, para el análisis de fuerzas, se tomó en cuenta un factor de seguridad de dos, por lo que la carga real sería mejor y el esfuerzo máximo igual y la pieza no fallaría.

Para el tornillo de potencia hay que tomar en cuenta que no es un mecanismo que multiplique la potencia, sino que está sometido a una carga desgastante constantemente, por lo que en el análisis era de esperarse que el mecanismo sufriera de mucho esfuerzo y desgaste.

f. **Hombro.** En el hombro se hizo el análisis en la estructura y mecanismo y solamente en el mecanismo debido a que nos es de interés saber cómo se transmite la carga en ambas.

Cuadro 74. Resultados para análisis de esfuerzos para la estructura del hombro

Esfuerzo	Mínimo (Pa)	Máximo (MPa)
Von Misses	480.16	8.02

Cuadro 75. Resultados para el factor de seguridad de la estructura del hombro

Factor de seguridad	Mínimo (Pa)	Máximo (MPa)
Estrés	4.49	15

Figura 346. Esfuerzo de Von-Mises en estructura del hombro.

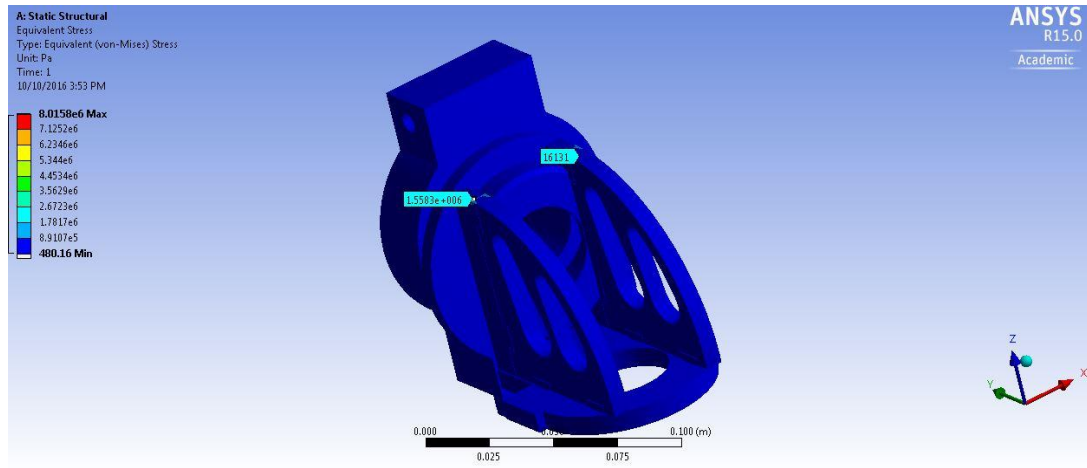
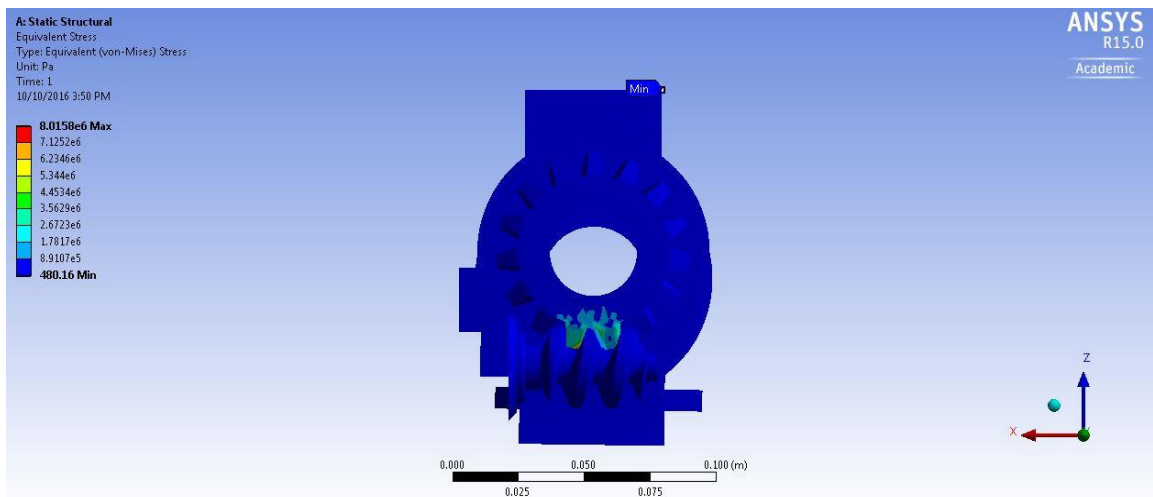
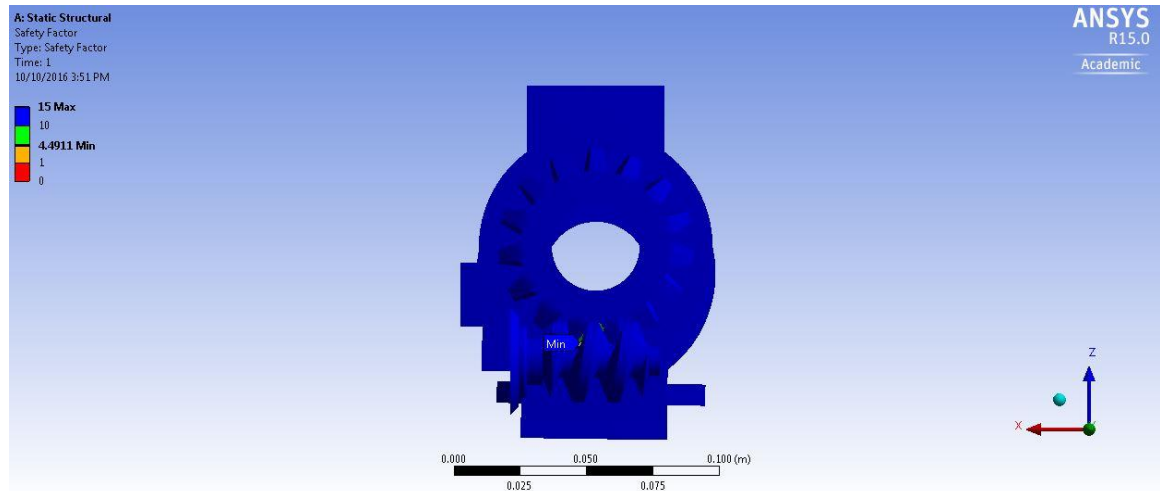


Figura 347. Esfuerzo de Von-Mises en estructura del hombro.



Las figuras 357 y 358 muestran los análisis de esfuerzos para la estructura del hombro, el cual es la articulación con más carga y esfuerzos por la suma de todos. Se muestran dos imágenes para dejar evidencia que la mayor concentración de esfuerzos sucede donde el tornillo sinfín está en contacto con la corona; en la estructura la concentración de esfuerzos se da en las orejas de agarre, lo cual se prevía que existiría mayor flexión y posibilidad de falla. Por ello, físicamente se puso de soporte fibra de carbono para darle mayor soporte a la estructura en esas piezas y evitar fallo.

Figura 348. Factor de seguridad de estrés en estructura del hombro.



El factor de seguridad mínimo para la estructura se dio en el contacto del tornillo sinfín con la corona, por lo mismo, en el cálculo se asumió la peor eficiencia previendo desgaste en el tornillo. De igual forma en el diseño se trabajó con un factor de seguridad de dos, por lo que la carga está siendo sobredimensionada.

1) Análisis de esfuerzos en mecanismo de hombro. Este análisis en particular daría resultados importantes, ya que es el mecanismo que está sometido a una carga mayor. De resultar en falla, sería un fracaso el proyecto. La relación que se tiene entre la corona y el sinfín era de 15:1 por lo que se tiene una relación grande para la multiplicación del torque de entrada.

Cuadro 76. Resultados para análisis de esfuerzos para mecanismo de tornillo sinfín del hombro

Esfuerzo	Mínimo (Pa)	Máximo (MPa)
Von Mises	0	6.64

Cuadro 77. Resultados para el factor de seguridad para mecanismo de tornillo sinfín del hombro

Factor de seguridad	Mínimo (Pa)	Máximo (MPa)
Estrés	5.42	15

Figura 349. Esfuerzo de Von-Mises en mecanismo de tornillo sinfín del hombro.

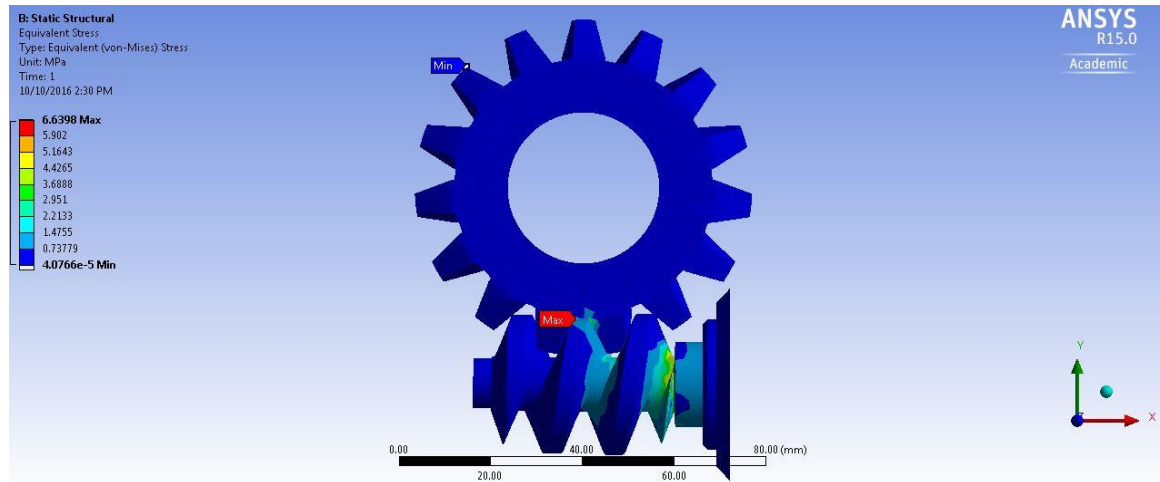
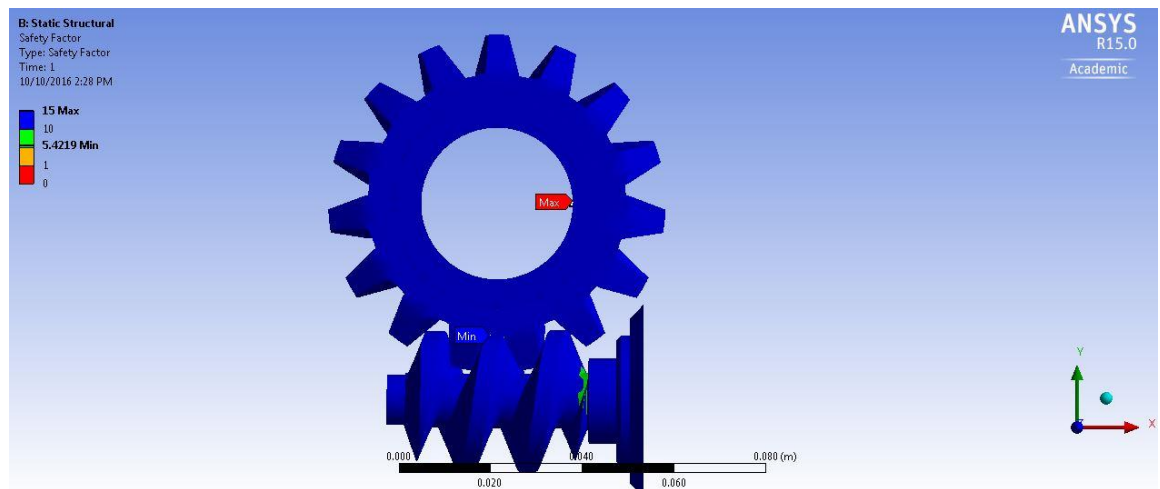


Figura 350. Factor de seguridad de estrés en mecanismo de tornillo sinfín del hombro.



En el diseño y cálculo de la carga se trabajó con factor de seguridad con el fin de asegurarnos que este no fallara. A pesar de ser el mecanismo con la mayor carga, los resultados muestran que se tiene una buena concentración de esfuerzos respecto a la tensión máxima del material.

Para el factor de seguridad se tiene uno de 5.42, aunque en el anterior análisis con la estructura es de 4.49, por lo que tomamos el crítico y nos quedamos con el 4.49 que igualmente es mayor que el factor recomendable en el diseño.

g. Validación de análisis. Fue importante tomar en cuenta que se trabajó con un prototipo en impresión 3D, el cual nos da como resultado una pieza con un porcentaje de solidez, que depende de los parámetros que hayamos ingresado en el software.

Así mismo, es de considerar que en el software no es posible simular la impresión por capas; de la misma forma, no es posible simular el relleno y definir la dirección del mismo. Ya que el material, resiste más a medida que apliquemos la fuerza en contra del patrón de impresión.

Se investigó sobre posibles soluciones a esto, ya que debido a que la impresión 3D es relativamente reciente, los softwares de análisis aún no toman en cuenta estas implicaciones sobre la impresión 3D; en su lugar, en el software ingresa la masa y teniendo su densidad teórica, se puede calcular el volumen de la misma y con ella tener un resultado más confiable.

En esta ocasión, además de tomar en cuenta el volumen real de las piezas para ayudar a que los cálculos fueran más certeros, también se hicieron pruebas destructivas con el material. Para lo cual se necesitó de un banco de pruebas para compresión que fuera capaz no sólo de ejercer presión, sino que lo sensara para tener un estimado de la carga que podía soportar el material a compresión.

Para las pruebas, se utilizó equipo de pruebas de instrumentación de materiales; específicamente para pruebas de compresión. Los valores están normalizados y se rigen por las tablas de ASTM; donde se tuvo dificultad fue que, en dichas tablas y estándares, no aparecía el filamento PLA, por lo que las pruebas debían ser experimentales ya que no se tenía un nivel de comparación.

Figura 351. Equipo Soiltest para pruebas de materiales.



Para las pruebas, se quiso analizar cómo se comportaba el material a cargas en contra del patrón de impresión y capaz y verificar si nuestra carga del brazo igualmente era soportada por el material sin existir antes rotura.

El objetivo de la prueba era llevar el material más allá de la deformación plástica y que hubiera rotura en ella; para ello se procedió la pieza como se muestra en la Figura 362 y se aplicó esfuerzo de compresión hasta la falla.

Se hizo el mismo procedimiento para dos piezas; tal como lo es la pieza RobPart5 y la pieza RobPart3, ambas piezas son del antebrazo y con las piezas que mayor carga reciben por el peso de los actuadores, por lo que queríamos analizar cuál era la carga necesaria para llevarla a rotura.

Para la pieza robPart3, la prueba destructiva se tuvo una fuerza de compresión máxima de 70 libras; lo cual es aproximadamente 32 kg. Nuestro brazo, sobredimensionando la carga, se tiene que es de 2.5 kg, por lo que no representa más del 10% de la carga que soporto la pieza y podemos ahora sí, asegurar que nuestra estructura y mecanismos si soportaran la carga.

Figura 352. Pieza robPart5



La otra pieza que se sometió fue robPart5, la cual se obtuvo una carga del doble de la pieza robPart3; esto también se debió a que tenía más refuerzos que daban rigidez a la pieza. La carga fue de 130 libras. Casi duplicamos la capacidad de esfuerzo con colocar dos refuerzos más que se oponían al movimiento de contracción, por lo que se recomienda que las piezas, en diseño, tengan refuerzos para mejorar la estructura.

E. SELECCIÓN DE ACTUADORES

Ya con los análisis de esfuerzos y las cargas establecidas para el brazo y los diferentes mecanismos fijados para cada articulación, se debía hacer una búsqueda de actuadores que dieran el torque requerido en cada mecanismo para crear el movimiento.

Se dividió la selección de actuadores en tres sub módulos: mano y muñeca, codo y hombro. Era necesario hacer esta división, ya que a medida que vamos subiendo en el brazo, el esfuerzo en las articulaciones de arriba incrementa y debemos analizarlos por separado para que sean objetivos.

Hay que hacer énfasis en que el brazo derecho del animatrónico tiene mano y articulación en todos los dedos y el brazo izquierda se limita a tener sólo muñeca, por lo que la carga para este es mínima comparada con el derecho, así que los análisis que se hicieron y el criterio de selección de actuadores se hará para el peor caso, que es el que tiene una carga mayor; esto con el fin de que puedan en cualquier momento tener dos brazos con dos manos y todos sus dedos articulados en su futuro.

Se diseñó una matriz de decisión para seleccionar el servomotor óptimo para el mecanismo, donde se evaluaron criterios como el torque máximo, la masa, la corriente máxima sin carga, robustez, precio y complejidad de integración.

El torque máximo fue el criterio con mayor peso ya que el mecanismo depende del torque de entrada para generar movimiento, si nosotros no garantizamos tener un torque de entrada mayor al torque mínimo que el sistema necesita, este no será capaz de transmitir el movimiento.

La masa también era un criterio importante, ya que a medida que vamos incrementando la masa del sistema, mayor carga introducimos a los actuadores y mayor capacidad debieran tener estos; por lo que era importante tomar en cuenta la carga que tendrían los actuadores.

El módulo de potencia debiera garantizar la demanda de corriente de los actuadores, aunque era importante tener previsto de cuanto esta sería; al tener una cantidad de servomotores conectados, la posibilidad de una caída de voltaje o una demanda excesiva de corriente está latente, por lo que al considerar la corriente máxima podríamos ayudar al módulo de potencia a dimensionar su fuente de poder.

La robustez la consideramos ya que, por experiencia en proyectos pasados, si un actuador no es robusto en el sentido de ciclo de vida del mismo, al exigir una carga constante por un tiempo considerable, esta falla.

El precio era importante ya que queremos hacer un prototipo de bajo costo y los actuadores, por la cantidad que se requieren, tienen un porcentaje considerable en el costo total del prototipo.

La complejidad de integración la tomamos en cuenta, aunque su peso fue el más bajo, debido a la cantidad de actuadores que tendríamos, si la complejidad se incrementa la integración de todos los módulos también lo haría.

A cada criterio se le pondero con un factor de peso que dependía que tan importante era el aspecto a evaluar, en todos los casos el factor de peso fue el mismo, ya que queríamos seleccionar en base al mismo criterio todos los actuadores.

Cuadro 78. Tabla de factor de peso para criterios en la selección de actuadores.

Tabla de factor de peso	
Variable	Peso (1-4)
Torque máximo a 5V. (kgf*cm)	3
Masa (g)	2
Corriente Max (mA)	2
Robustez	3
Precio	3
Complejidad de integración	2

1. Actuadores con mayor capacidad de torque

a. Mano. Tomando en cuenta la mayor fuerza requerida por los dedos se investigaron sobre cuatro posibles actuadores que cumplieran con los criterios de requerimiento para el mecanismo.

Las opciones que se tomaron en cuenta fueron:

Cuadro 79. Matriz de características para selección de servos de los dedos.

Variable	MG90S	HS-322HD	MG995	MG996R
Torque máximo a 5V. (kgf*cm)	2.2	3.67	11	14
Masa (g)	13.4	42.8	55	55

Continuación cuadro 79

Variable	MG90S	HS-322HD	MG995	MG996R
Corriente Max (mA)	100	180	240	500
Robustez	6	9	9	9
Precio (Q)	50	80	80	80
Complejidad de integración	5	5	3	3

Luego de investigar las características de cada servomotor, se realizó una tabla de valores normalizados donde se multiplica el valor normalizado entre 1 – 10, por su factor de peso del Cuadro 78 para luego sumar el total para cada opción; al obtener los datos se selecciona con mayor valor en el cuadro con los valores normalizados.

Cuadro 80. Matriz de decisión para selección de servos de los dedos.

Matriz de decisión							
MG90S		HS-322HD		MG995		MG996R	
Norm	Total	Norm	Total	Norm	Total	Norm	Total
1	3	2	6	8	24	10	30
1	2	7	14	10	20	10	20
10	20	7	14	6	12	1	2
1	3	7	21	7	21	10	30
10	30	1	3	1	3	1	3
1	2	1	2	10	20	10	20
TOTAL	60		60		100		105

Se determinó utilizar el servomotor MG-996R por los criterios antes mencionados para el mecanismo de los dedos y muñeca.

1) Análisis y resultados para la selección de servomotor. Se determinó con base en criterios definidos anteriormente como la mejor opción el servomotor MG996R. Para simplicidad se escogió un solamente una opción y se implementaron en todos los mecanismos de los dedos el mismo modelo de actuador, el que cumpliera con todos los criterios y cubriera la carga máxima necesaria para el mecanismo.

Para la muñeca se utilizó el mismo modelo de servomotor, al no tener una carga crítica y tener un mecanismo que no demanda de mucho torque de entrada, este era suficiente.

b. Codo. Para el codo se tiene un mecanismo de tornillo helicoidal que requiere un torque de entrada de $1.84 \text{ N}\cdot\text{m}$, como se muestra en el Cuadro 65. Este torque se determinó en el punto crítico y sobredimensionando la carga de entrada. Para esta articulación se investigaron estas opciones:

Cuadro 81. Matriz de características para selección de servos del codo.

Variable	MG996R	HS-805BB	S3306	MX-106T
Torque máximo a 5V. ($\text{kgf}\cdot\text{cm}$)	14	24.7	24.7	85
Masa (g)	55	128	148	152
Corriente Max (mA)	500	830	860	6000
Robustez	6	9	9	9
Precio (Q)	80	300	450	3800
Complejidad de integración	5	3	5	3

Cuadro 82. Matriz de decisión para selección de servomotores para mecanismo del codo.

Matriz de decisión							
MG996R		HS-805BB		S3306		MX-106T	
Norm	Total	Norm	Total	Norm	Total	Norm	Total
1	3	2	6	2	6	10	30
1	2	9	18	8	16	10	20
1	1	1	1	1	1	10	10
10	30	10	30	10	30	10	30
10	30	10	30	10	30	1	3
1	2	1	2	10	20	10	20
TOTAL	68		87		103		113

Se determinó utilizar el servomotor MX-106T por los criterios antes mencionados para la articulación del codo.

1) Análisis y resultados para la selección de servomotor del codo. La potencia en este mecanismo con el torque de entrada tiene una relación de 1:1, por lo que si la carga demanda un torque de entrada de $1.84 \text{ N}\cdot\text{m}$, el actuador debe ser capaz de proporcionarlo.

Para la selección se cuidó que el torque requerido no estuviera muy cercano al torque máximo del actuador para que este en operación normal no estuviera constantemente exigido y su ciclo de vida fuera reduciendo considerablemente.

En las opciones se seleccionó el servomotor MX-106T de *Dynamixel*, la cual diseña los mejores servomotores del mercado; estos están hechos para aplicaciones de robótica en general, por lo que se logra implementar muy bien para este proyecto. El costo del motor seleccionado es muy alto, por lo que se recomienda utilizar el S3306 o bien el HS-805BB que en puntuación no está muy alejado del seleccionado e igualmente funcionara de forma correcta ya que cubre la demanda del mecanismo.

c. **Hombro.** El hombro es la articulación de mayor carga en el sistema del brazo debido a que es la suma de todas las cargas del brazo completo. Su mecanismo tiene en su diseño una relación de 1:15, nosotros para dimensionar el torque de entrada, además de sobredimensionar la carga con un factor de 2, se tomó la peor eficiencia que el tornillo sinfín tiene que es de 40% para que en el peor caso este igualmente fuera capaz de transmitir y generar el movimiento.

Cuadro 83. Matriz de características para selección de servos del codo.

Variable	HS-815BB	HS-805BB	S3306	MX-106T
Torque máximo a 5V. (kgf*cm)	24	24,7	24.7	85
Masa (g)	140	128	148	152
Corriente Max (mA)	830	830	860	6000
Robustez	8	9	9	9
Precio (Q)	350	300	450	3800
Complejidad de integración	4	5	3	3

Cuadro 84. Matriz de decisión para selección de servomotores para mecanismo del hombro.

Matriz de decisión							
HS-815BB		HS-805BB		S3306		MX-106T	
Norm	Total	Norm	Total	Norm	Total	Norm	Total
1	3	1	3	1	3	10	30
9	18	9	18	1	2	10	20
1	2	1	2	1	2	10	20
10	30	10	30	10	30	10	30
10	30	10	30	10	30	1	3
10	20	10	20	10	20	10	20
TOTAL	103		103		87		123

Se determinó utilizar el servomotor MX-106T por los criterios antes mencionados para la articulación del hombro.

1) Análisis y resultados para la selección de servomotor del hombro. La potencia en este mecanismo con el torque de entrada tiene una relación de 1:15, por lo que si la carga demanda un torque de entrada de $1.84\text{N}\cdot\text{m}$, el actuador debe ser capaz de proporcionarlo.

Para la selección se cuidó que el torque requerido no estuviera muy cercano al torque máximo del actuador para que este en operación normal no estuviera constantemente exigido y su ciclo de vida fuera reduciendo considerablemente.

En las opciones se seleccionó el servomotor MX-106T de *Dynamixel*, la cual diseña los mejores servomotores del mercado; estos están hechos para aplicaciones de robótica en general, por lo que se logra implementar muy bien para este proyecto.

El costo del motor seleccionado es muy alto, por lo que se recomienda utilizar el S3306 o bien el HS-805BB que en puntuación no está muy alejado del seleccionado e igualmente funcionara de forma correcta ya que cubre la demanda del mecanismo.

2. Actuadores con mayor capacidad de respuesta veloz. Una vez terminada la fase de pruebas e integración con los demás módulos, se observó que los mecanismos funcionaban correctamente, pero que los movimientos eran lentos y robotizados; regresando al concepto de animatrónica, vemos que debemos simular el aspecto y movimiento.

Para ello, además de analizar nuevos mecanismos para mejorar la velocidad de movimiento, se investigaron otros actuadores capaces de generar movimiento de forma más veloz.

A diferencia del inciso anterior, para el torque máximo, se agregó el criterio de velocidad en nuestra matriz de decisión, donde era importante considerar este criterio con un peso mayor, ya que era nuestro principal criterio para este apartado.

a. Mano. Tomando en cuenta una mayor velocidad para el movimiento de los dedos se investigaron sobre cuatro posibles actuadores que cumplieran con los criterios de requerimiento para el mecanismo.

Las opciones que se tomaron en cuenta fueron:

Cuadro 85. Matriz de características para selección de servos de los dedos.

Variable	HSG-8315BH	SC-1257TG	SC-1258TG	RC 100SS
Torque maximo a 5V. (kgf*cm)	4.3	10	12	12.1
Masa (g)	60	52.4	52.4	54.9
Corriente max (mA)	200	300	240	350
Robustez	8	9	9	9
Precio (Q)	550	390	420	250
Velocidad	0.05	0.07	0.08	0.09

Cuadro 86. Matriz de decisión para selección de servos de los dedos.

Matriz de decisión							
HSG-8315BH		SC-1257TG		SC-1258TG		RC 100SS	
Norm	Total	Norm	Total	Norm	Total	Norm	Total
1	3	9	27	9	27	10	30
1	2	10	20	10	20	9	18
10	20	5	10	9	18	1	2
1	3	9	27	10	30	10	30
1	3	7	21	6	18	8	24
10	40	6	24	4	16	1	4
TOTAL	71		129		129		108

Se recomienda utilizar uno de los servomotores SC-1257TG o SC-1258TG, ya que con ambos se obtuvo el mismo valor total en nuestra matriz de decisión y tienen características similares en cuanto al torque y velocidad; además que son de la misma familia de servomotores, varían en cuanto a dimensiones del motor.

b. Codo. Para el codo se tiene un mecanismo de tornillo de potencia que requiere un torque de entrada de $1.84 \text{ N}\cdot\text{m}$, como se muestra en el Cuadro 65. Este torque se determinó en el punto crítico y sobredimensionando la carga de entrada. Buscamos un servomotor con estas características de torque, pero que su desplazamiento sea más veloz y produzco un movimiento más suave y rápido.

Para esta articulación se investigaron estas opciones:

Cuadro 87. Matriz de características para selección de servos del codo.

Variable	MG996R	HS-805BB	S3306	MX-106T
Torque máximo a 5V. (kgf*cm)	14	24.7	24.7	85
Masa (g)	55	128	148	152
Corriente Max (mA)	500	830	860	6000
Robustez	6	9	9	9
Precio (Q)	80	300	450	3800
Complejidad de integración	5	3	5	3

Cuadro 88. Matriz de decisión para selección de servomotores para mecanismo del codo.

Matriz de decisión							
MG996R		HS-805BB		S3306		MX-106T	
Norm	Total	Norm	Total	Norm	Total	Norm	Total
1	3	2	6	2	6	10	30
1	2	9	18	8	16	10	20
1	1	1	1	1	1	10	10
10	30	10	30	10	30	10	30
10	30	10	30	10	30	1	3
1	2	1	2	10	20	10	20
TOTAL	68		87		103		113

F. MANUFACTURA Y CONSTRUCCIÓN DE ESTRUCTURA MECÁNICA

1. Manufactura y selección de material para estructura mecánica

a. Tipo de manufactura de estructura. Para la estructura del brazo mecánico se investigaron materiales y diversos tipos de manufactura para luego escoger la opción que mejor se adecuara a nuestras necesidades y a nuestro presupuesto.

En enunciados anteriores describimos como fue el análisis y selección del diseño y en base a que parámetros de criterios nos basamos para escoger la mejor; en este caso se escogió al *Inmoov* porque

sobresalía en varios de los criterios que supusimos importantes, entre ellos el tipo de manufacturado que se podía utilizar.

Así que la manufactura se escogió desde el momento en el que se analizó y se determinó cuál de los dos diseños se haría. La impresión 3D con la tecnología FDM, de la cual se habla en el marco de teoría de este mismo documento. Esta técnica es bastante utilizada y se cuenta con ella dentro de las instalaciones de la universidad, por lo que todo el proceso de manufactura se debió hacer dentro de la universidad.

La impresora que se decidió utilizar fue una impresora 3D de código abierto Prusa i3, la cual es una máquina que tiene por iniciativa crear una máquina autorreplicable que pueda ser utilizada para prototipo rápido de manufactura.

Esta impresora puede imprimir distintos materiales disponibles en el mercado, de los cuales se habló en el marco de teoría de este mismo documento, entre ellos imprime PLA o bien ABS; existen diferencias no sólo mecánicas entre los distintos materiales, sino también en los acabados de las piezas. En ABS los acabados que se logran son de mejor calidad que los acabados logrados en Pla.

Las aplicaciones varían para cada uno de los materiales, en general son ser utilizados ambos ya que las propiedades varían poco respecto a la otra; la impresora 3D juega un papel importante ya que dependiendo de sus características así podríamos o no imprimir ambos materiales.

En el caso del ABS la temperatura de fundición es 230°C, se tiene que tener una cama caliente a 80°C para que la pieza en la base permanezca en plana y no se pandee; además que tenemos que tener en cuenta que todo esto requiere mayor potencia y debemos estar seguros que nuestra fuente de poder soportará toda la carga.

Para el PLA es más simple la impresión en términos de requerimientos de la impresora, ya que la temperatura de fundición es de 180°C, que comparado con el ABS es menor, no se necesita tener cama caliente, es decir que la impresión va en frío y sólo es necesario el ventilador para el extrusor cuando este lo requiera.

b. Selección de material. La selección del material se basó entre los filamentos ABS y PLA, se analizaron las propiedades de cada uno y las necesidades que el proyecto requería y se hicieron criterios de selección que el proyecto para la mejor opción.

Cuadro 89. Análisis de materiales ABS y PLA.

Material	Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS)	Ácido Poliláctido (PLA)
Características principales	Más sólido y resistente a impactos.	Menor tendencia a la deformación.
Aplicaciones	Industriales	Domésticas
Ajuste de calor	220°C – 250°C	180°C – 220°C
¿Requiere cama caliente?	Si requiere	No requiere
Facilidad de impresión	Difícil	Sencillo
Post-procesamiento	Se puede cortar, ligar, pintar y pegar.	Se puede cortar, ligar o pegar.
Precio	Accesible	Accesible

(MakeItFrom 2009)

Los criterios se basaron a las necesidades del proyecto; el criterio que tenía más peso era las características del material, ya que tenían que satisfacer nuestra aplicación. En este caso si encontramos diferencias, ya que el ABS sobresale sobre el PLA, teniendo características más resistentes al desgaste y a impactos. En nuestro caso no estará sometido a impactos, pero si tiene que soportar desgaste, aunque el PLA igualmente lo puede soportar, el ABS sobresale en esta característica.

En el criterio de las aplicaciones, me pareció importante destacarlo ya que conociendo en que aplicaciones se utilizan con mayor regularidad, podríamos sacar conclusiones sobre el material y cuál podríamos utilizar para nuestro proyecto. El ABS tiene mayor aparición en aplicaciones industriales por su característica de desgaste y resistente a impactos que comparado con el PLA que es más de uso doméstico y de aplicaciones diversas.

El ajuste de calor es de considerar ya que tenemos que asegurarnos de que seamos capaces de imprimir el material en las impresoras que se tengan en disposición; al igual que el criterio sobre la cama caliente, donde ambos criterios nos definían en que impresoras podíamos imprimir cada material.

La facilidad de impresión nos referimos a que cuidados hay que tomar a la hora de imprimir, además que cuando el modelo o pieza tarda un tiempo considerable, la impresión tiende a no terminar bien, por sobrecalentamiento de los motores o bien fajas que se aflojan y desfasan las capas. En ABS es más susceptible a este tipo de inconvenientes ya que por el calor que necesita la cama, las fajas tienden a ceder, además que la potencia requerida es mayor y puede que la fuente falle.

El post-procesamiento es un criterio que nos basamos según nuestra experiencia con la impresión 3D, ya que el material tiende a expandirse y las medidas tienden a cambiar ligeramente por lo que en ocasiones es necesario lijar cuando existen varias piezas que tienen que ensamblarse. En ambos casos es posible hacerles post-procesamiento a los modelos, aunque existen algunos procesos que no pueden hacerse en el PLA o bien cuesta más, como pintar las piezas; nuestro objetivo no se basa en ello, por lo que no tiene tanto peso, pero sí es importante darlo a conocer.

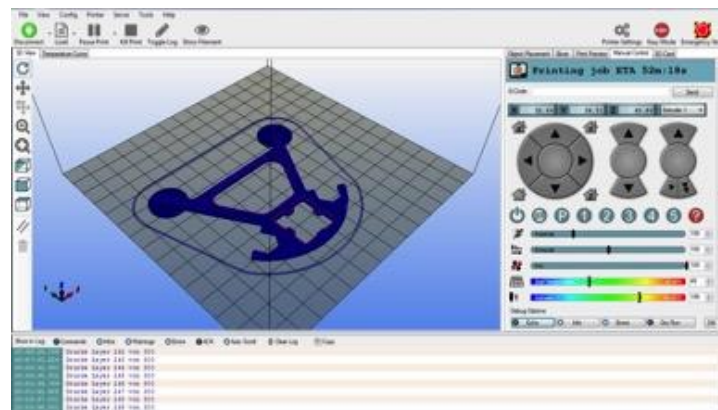
El precio como antes se ha mencionado anteriormente, si era un criterio importante debido a que se desea construir un prototipo a bajo costo, así que debíamos escoger el mejor material al mejor precio; en este caso ambos materiales tienen el mismo precio por lo que con cualquier decisión, nos aseguramos cumplir con el objetivo del bajo costo.

Una de las razones por la cual se seleccionó el PLA fue por su facilidad de uso y nos beneficiaba ya que teníamos limitación de tiempo.

c. Proceso de manufactura. El proceso de manufactura consiste en imprimir los modelos en la impresora 3D, para ello era necesario tener los modelos en una extensión STL que viene de las siglas “*Stereo Litography*” ya que necesitamos definir nuestra geometría 3D de los modelos, para que el *software* de impresión la reconozca y genere el código útil para el control.

El software que se utilizó para generar el código de las impresoras 3D es “*Repetier Host*” de código abierto y frecuentemente utilizado por la comunidad que se dedica a este tipo de impresión.

Figura 353. Interfaz gráfica de Repetier Host

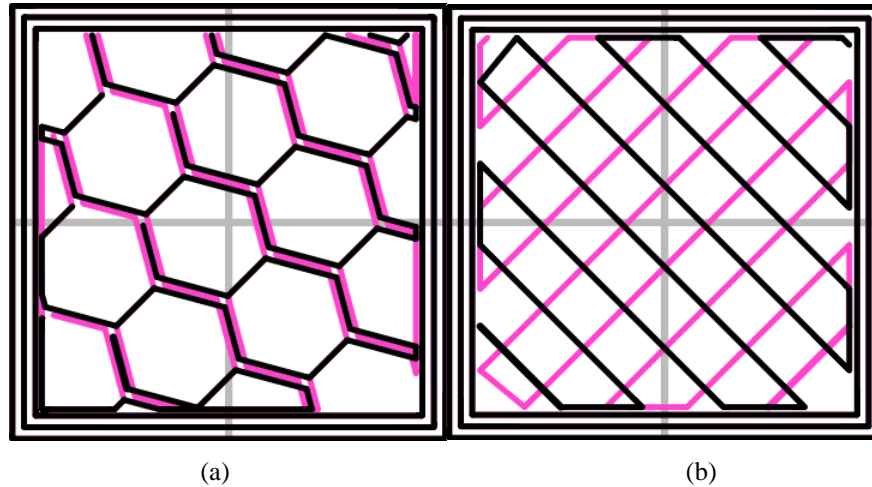


(Slicer, 2016)

En este software se hacen las configuraciones de material, velocidad, temperatura de extrusor y cama y se programa el porcentaje de sólido que se desea; este último parámetro es importante ya que define el volumen del modelo, del mismo modo podemos cambiar el patrón que deseamos para nuestras piezas.

Se tienen disponibles los patrones lineal y hexagonal que son los más utilizados según la aplicación. El patrón lineal es comúnmente utilizado para piezas que no estarán sometidas a esfuerzos de flexión, ya que con este patrón las piezas son más susceptibles a fallar a la flexión por las fibras. En el caso del patrón hexagonal, las piezas soportan tanto los esfuerzos de corte como los de flexión en mayor capacidad.

Figura 354. Patrones lineal (a) y hexagonal (b) para piezas impresas 3D.



(Slicer, 2016)

Se utilizaría estos dos tipos de patrones para las piezas según los esfuerzos de tensión y compresión estarían sometidos por efectos del mecanismo en sí, o bien por el peso que soportarían.

El volumen fue variando de la misma forma que el patrón, según la aplicación se decidía su porcentaje de relleno. Se fue variando entre un porcentaje de 20% hasta un porcentaje de 50% de relleno.

El proceso de manufactura duró alrededor de doce semanas en total, donde se imprimieron un total de al menos 42 piezas por brazo, ya que en algunos casos se tuvo que repetir piezas por defectos de impresión o por falla.

Cuadro 90. Repetier Host para mano y antebrazo con cantidad de filamento y tiempo estimado.

Mano y antebrazo			Tiempo	
Cant.	Pieza	Filamento (mm)	Horas	Minutos
1	<i>Thumb</i>	3366	1	42
1	<i>Index</i>	1603	1	0
1	<i>Majeure</i>	1979	1	9
1	<i>Auriculaire</i>	1008	0	44
1	<i>Pinky</i>	<u>1278</u>	1	25

Continuación cuadro 90

1	<i>Bolt_entretoise</i>	1989	1	21
1	<i>Wristlarge</i>	7750	2	59
1	<i>Wristsmall</i>	3147	1	13
1	<i>topsurface4.stl</i>	4574	1	55
1	<i>coverfinger</i>	1325	0	35
1	<i>robcap3</i>	2752	1	5
1	<i>robpart2</i>	9560	5	11
1	<i>robpart3</i>	6635	5	45
1	<i>robpart4</i>	11838	6	29
1	<i>robpart5</i>	13709	6	10
	Total	72513	32	7

Cuadro 91. Tabla obtenida de Repetier Host para muñeca con cantidad de filamento y tiempo estimado.

Muñeca			Tiempo	
Cant	Pieza	Filamento (mm)	Horas	Minutos
1	<i>rotawrist2</i>	3050	2	11
1	<i>rotawrist1</i>	5953	3	55
1	<i>rotawrist3</i>	1347	1	10
1	<i>WristGears</i>	1349	0	59
1	<i>CableHolderWrist</i>	535	0	45
	Total	12234	6	3

Cuadro 92. Tabla obtenida de Repetier Host para bíceps con cantidad de filamento y tiempo estimado.

Bíceps			Tiempo	
Cant	Pieza	Filamento (mm)	Horas	Minutos
1	<i>GearHolder</i>	430	0	45
2	<i>HighArmSide</i>	4083	2	17
1	<i>Pistonanticlock</i>	3472	2	9
1	<i>Pistonbaseanti</i>	2482	1	20
1	<i>RotGear</i>	5042	2	25
1	<i>RotMit</i>	5485	2	45
1	<i>RotPotentio</i>	351	0	45
1	<i>RotTit</i>	3578	2	16
1	<i>RotWorm</i>	1439	1	51
1	<i>Rotcenter</i>	8459	3	41

Continuación cuadro 92

Bíceps			Tiempo	
Cant	Pieza	Filamento (mm)	Horas	Minutos
1	<i>armtopcover1</i>	7986	4	22
1	<i>armtopcover2</i>	5575	2	58
1	<i>armtopcover3</i>	12651	6	20
1	<i>elbowshaftgear</i>	2303	1	42
1	<i>gearpotentio</i>	241	0	37
2	<i>lowarmside</i>	3325	1	59
2	<i>reinforcer</i>	4000	1	20
1	<i>servobase</i>	2852	1	26
1	<i>servoholder</i>	4104	2	14
1	<i>spacer</i>	809	0	57
		78667	33	11

Cuadro 93. Tabla obtenida de Repetier Host para hombro con cantidad de filamento y tiempo estimado

Hombro			Tiempo	
Cant	Pieza	Filamento (mm)	Horas	Minutos
1	<i>ClaviBack</i>	4379	1	55
1	<i>ClaviFront</i>	4869	2	8
1	<i>PistonClavi</i>	3883	2	16
1	<i>Pistonbase</i>	2841	1	13
2	<i>PivConnector</i>	<u>2403</u>	1	19
1	<i>PivGear</i>	5276	2	29
1	<i>PivMit</i>	6115	2	57
1	<i>PivPotentio</i>	351	0	27
1	<i>PivPotholder</i>	2377	1	17
1	<i>PivTit</i>	4119	2	29
1	<i>PivWorm</i>	1619	0	59
1	<i>Pivcenter</i>	10125	4	7
1	<i>servoHolster</i>	4354	2	22
1	<i>servoholder</i>	3962	2	14
		56673	22	6

2. **Construcción de estructura mecánica.** Esta sección fue pensada hacerse a modo tutorial, para que cualquier persona sea capaz de armar y desarmar el brazo en su totalidad. Para la construcción del brazo animatrónico completo, se documentó por separado cada una de las partes del brazo.

a. **Mano y antebrazo.** Listado de piezas necesarias para construir una mano y antebrazo derecho:

- 1 *Thumb*
- 1 *Index*
- 1 *Majeure*
- 1 *Auriculaire*
- 1 *Pinky*
- 1 *Bolt_entretoise*
- 1 *Wristlarge*
- 1 *Wristsmall*
- 1 *topsurface*
- 1 *coverfinger*
- 1 *robcap3*
- 1 *robpact2*
- 1 *robpact3*
- 1 *robpact4*
- 1 *robpact5*
- 1 *rotawrist2*
- 1 *rotawrist1*
- 1 *rotawrist3*
- 1 *WristGears*
- 1 *CableHolderWrist*

Para la mano y antebrazo se debe empezar por unir las piezas que sean necesarias; en el antebrazo las piezas que van unidas con pegamento son Robpart2 con Robpart5 y Robpart3 con Robpart4.

Figura 355. Unión con pegamento de Robpart2 con Robpart5.



Se debe tener el cuidado de pegar las piezas cuidadosamente ya que éstas están unidas con demás piezas; al pegar erróneamente provocamos que las demás uniones no se puedan hacer.

Figura 356. Unión con pegamento de Robpart3 con Robpart4.



El pegamento que se utilizó fue el comercialmente conocido “*super glue*” con bicarbonato, la cual genera una reacción química y cristaliza la unión haciéndola inseparable. La técnica que se utilizó para la unión de las piezas fue soldadura plástica, la cual consiste en utilizar pegamento cianocrilato (superbonder®),

superglue®) con bicarbonato y haga una reacción química entre ellas y unan las piezas de forma casi permanente.

Figura 357. Unión con pegamento de Robpart2 con Robpart5 y RotaWrist.



Es conveniente que esta unión se haga cuidadosamente, ya que es una parte crítica del ensamble la cual une varias piezas en la estructura del antebrazo.

Figura 358. Unión de RobCap con ShaftGear y las piezas Robpart2 – Robpart5.



Figura 359. Unión de antebrazo completo.



Una vez unido el antebrazo, es necesario empezar a preparar las partes de los dedos para empezar a ensamblarlas entre ellas para luego proceder a hacer la unión con el antebrazo y muñeca.

El servo seleccionado para muñeca se debe colocar en RotaWrist, en nuestro caso fue un servomotor MG - 996R.

Figura 360. Servomotor para mecanismo de muñeca



Colocar el engrane respectivo al servomotor para mecanismo de muñeca.

Figura 361. Engrane para mecanismo de muñeca



Antes de ensamblar el mecanismo de la muñeca, asegurarse de engrasarlo para que los dientes de los engranes reduzcan la fricción entre ellos y el esfuerzo del motor y el sonido disminuyan. Se utilizó una grasa número dos de viscosidad.

Figura 362. Engrasar mecanismo de muñeca antes de ensamblar.



Figura 363. Mecanismo de la muñeca listo para ensamblar con el antebrazo.



Antes de ensamblar el antebrazo, se debe de armar la mano por separado para hacer una integración de mano, muñeca y antebrazo.

Para la mano, se necesitó hacer un post-proceso en las piezas debido a que estas tenían mucha fricción entre ellas y para reducir el esfuerzo de los motores que harían el mecanismo, se limaron todas las piezas y con una broca de 2 mm se dio forma cuidadosamente a todos los agujeros que estos tenían ya definidos.

Figura 364. Preparando ensamblaje de los dedos.



Para los dedos se recomienda trabajar en un lugar de trabajo limpio y ser muy ordenados para el ensamblaje ya que los dedos tienen piezas muy parecidas que pueden confundirse y podemos armar incorrectamente la mano.

Figura 365. Limar piezas antes de ensamblar.



Figura 366. Limar piezas antes de ensamblar.



Luego asegurarnos que no haya fricción entre los dedos debemos de pegar las piezas que deben ir unidas con pegamento; para ello debemos tener los centros de las piezas alineadas para que sea fácil enhebrar el hilo por ellas.

Figura 367. Ensamblar piezas del dedo.



Figura 368. Dedo meñique.



Figura 369. Dedo anular.



Figura 370. Dedo medio.



Figura 371. Dedo índice.



Figura 372. Dedo pulgar.



Para la unión de la mano, con las muñecas y el antebrazo es necesario montar los motores que se hayan seleccionado antes al antebrazo y colocar las poleas que harán el movimiento de cada uno de los dedos; así como preparar diez tiras de hilo de pescar de 55 cm de largo.

Figura 373. Ensamble de hilo de pescar con dedos de la mano.



Figura 374. Ensamble de hilo de pescar con mano.



Al final del dedo es necesario unir los dos hilos que van al dedo con un nudo sencillo y para asegurarse que no se desate, colocamos un punto de pegamento.

Figura 375. Unión de hilos al final del dedo.



Figura 376. Ensamblaje de mano con hilos de pescar.

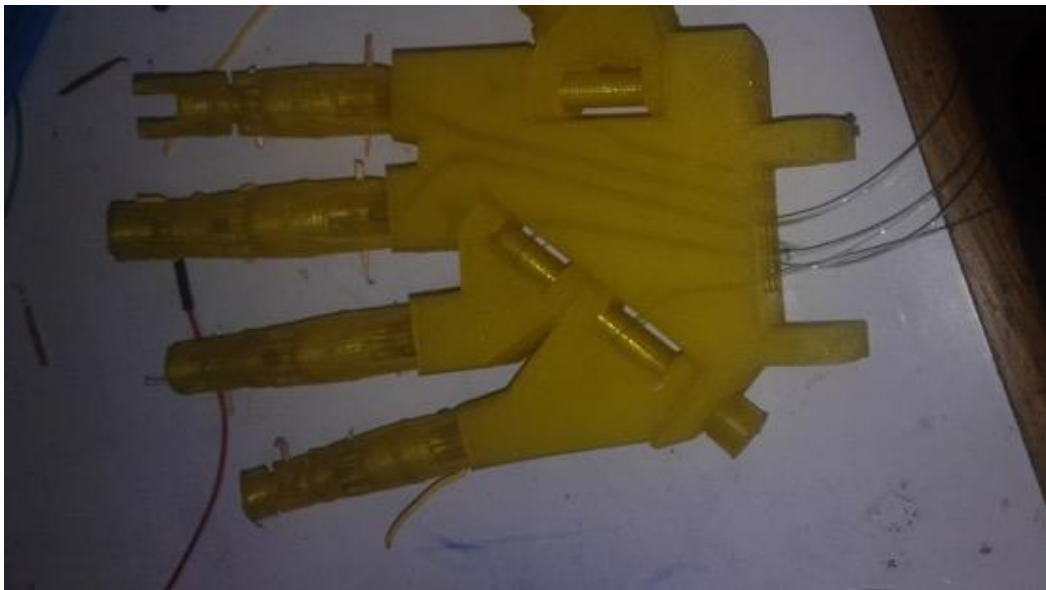


Figura 377. Ensamblaje de mano completa con hilos de pescar.



Figura 378. Ensamblaje de hilos de pescar con poleas de los motores.

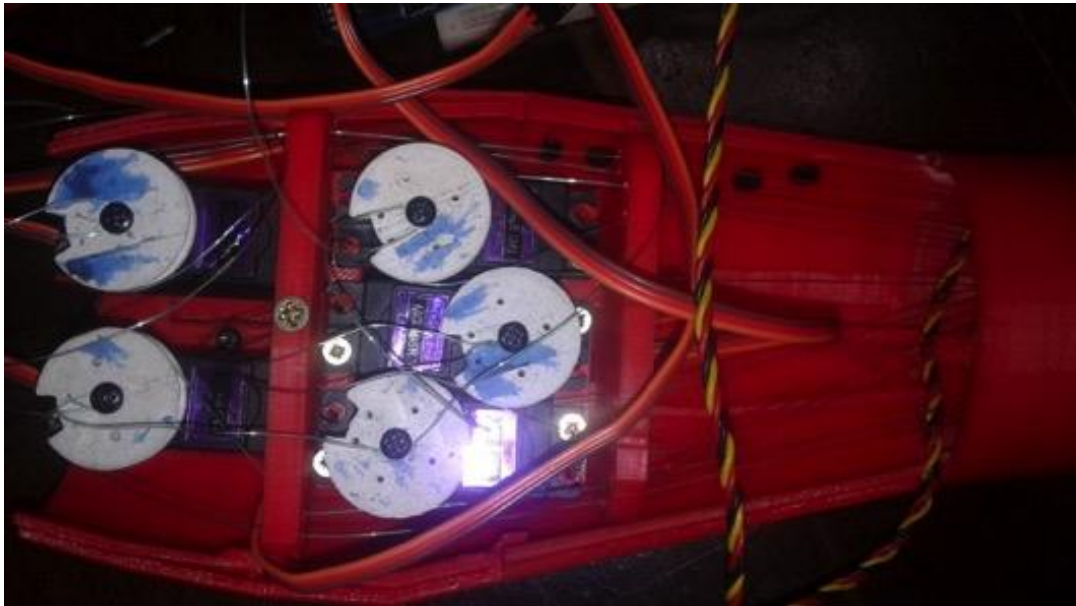


Figura 379. Ensamblaje completo de antebrazo.



b. Bíceps. Listado de piezas necesarias para construir un bíceps derecho:

- *1 GearHolder*
- *2 HighArmSide*
- *1 Pistonanticlock*
- *1 Pistonbaseanti*
- *1 RotGear*
- *1 RotMit*
- *1 RotPotentio*
- *1 RotTit*
- *1 RotWorm*
- *1 Rotcenter*
- *1 elbowshaftgear*
- *2 lowarmside*
- *2 reinforcer*
- *1 servobase*
- *1 servoholder*
- *1 space*

El ensamblaje del bíceps es más simple que el de la mano y antebrazo y no requiere de post-proceso en ninguna de las piezas, por lo que recurriremos al ensamblaje propiamente de todas las piezas.

Se empieza con la unión de las piezas *HighArmSide* y *LowArmSide* que nos darán la forma del bíceps y en ellos montaremos el mecanismo del codo uniendo el antebrazo con él.

Figura 380. Unión de *HighArmSide* y *LowArmSide*.



En esta unión podemos agregar pegamento en las orejas que se unirán para hacerla rígida y asegurarnos que el mecanismo no las separe mientras se ejecuta. No es necesario hacer una soldadura plástica para unirla ya que no existe suficiente fuerza axial en el mecanismo que pueda separarlas.

Unimos las otras dos piezas y preparamos todos los demás materiales que necesitamos para construir el bíceps.

Figura 381. Piezas que forman el bíceps.

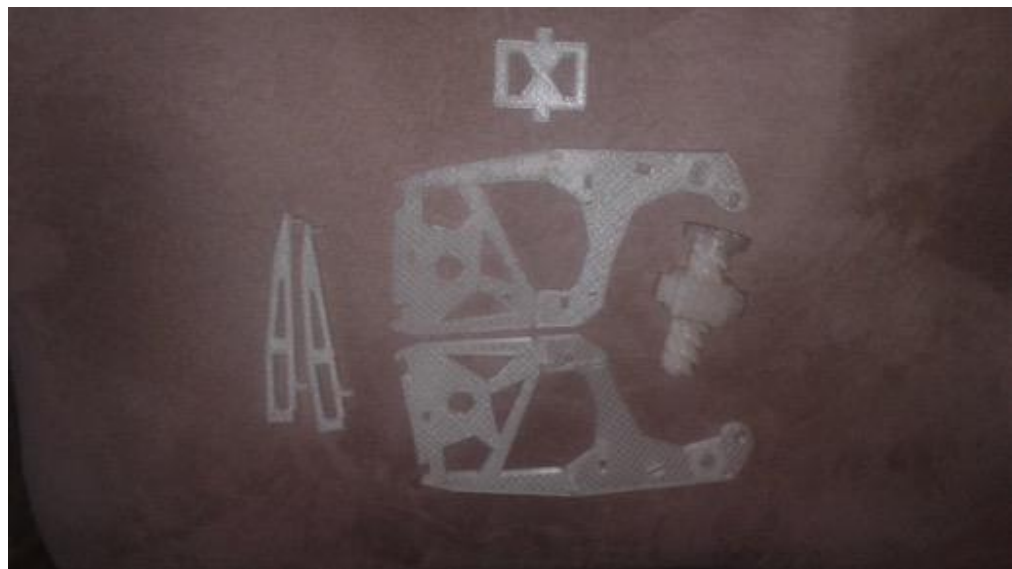
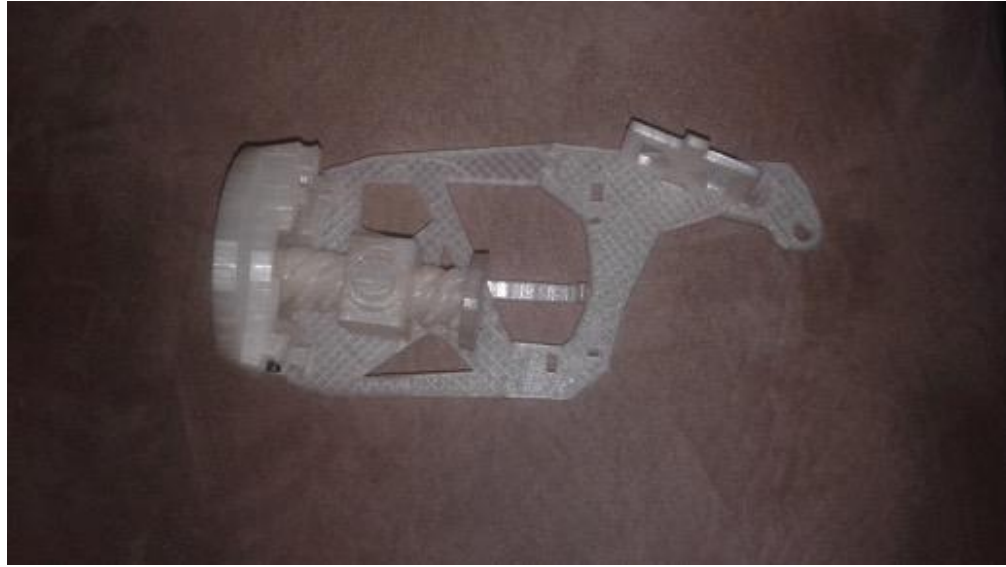


Figura 382. Ensamblaje de piezas del bíceps.



Para la otra cara del bíceps podemos aplicar pegamento en las orillas para que sea una unión permanente y nos aseguremos de que no se separarán mientras estén en movimientos los mecanismos.

Figura 383. Vista lateral del ensamblaje del bíceps.



Figura 384. Vista frontal del ensamblaje del bíceps total.



Para el hombro ya sólo es necesario ensamblarlo junto con el antebrazo para formar el mecanismo del codo.

c. Hombro. Listado de piezas necesarias para construir un hombro derecho:

- 2 PivConnector
- 1 PivGear
- 1 PivMit
- 1 PivTit
- 1 PivWorm
- 1 Pivcenter

Para el hombro era necesario ensamblar el mecanismo del movimiento, el cual era un tornillo sin fin con su engranaje.

Antes de ensamblar el mecanismo, era necesario ensamblar el tornillo al motor, el cual nosotros lo hicimos por medio de un acople de MDF que se diseñó para transmitir la potencia del motor al tornillo.

Figura 385. Ensamblaje de tornillo a motor.



Figura 386. Mecanismo del hombro sin grasa.



Por la fatiga que tienen las caras de los dientes con el tornillo, al mecanismo es importante engrasarlo, para reducir esfuerzos, fricción y ruido.

Figura 387. Mecanismo del hombro con grasa.



Figura 388. Mecanismo final listo para ensamblar.



G. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE SUBRUTINAS PARA MOVIMIENTO

Para el control de los movimientos deseados de cada articulación, fue necesario programar subrutinas de movimiento; con el fin de verificar cada mecanismo y obtener el rango de operación para cada uno de ellos.

Para ello se utilizó la interfaz de Arduino® para el diseño de subrutinas, el cual es: <una plataforma de prototipos de electrónica de código abierto basa en hardware y software flexible y fácil de usar e implementar>. (Arduino, 2016)

Hay muchos otros microcontroladores y plataformas de microcontroladores disponibles en la actualidad; Arduino fue seleccionado por simplificar el proceso de trabajo con microcontroladores y ofrece muchas ventajas como lo es su precio, su multiplataforma que puede ser implementado en Windows, Linux o Mac, su entorno de programación simple y claro, código y hardware abierto, por lo que existen muchas librerías que son implementadas para Arduino hoy en día.

Figura 389. Arduino UNO.



(Arduino, 2016)

1. Dedos de mano y muñeca. La selección de actuadores para los mecanismos de los dedos de la mano y muñeca dio como resultado un servomotor MG-996R; por lo que el diseño e implementación de las subrutinas debían estar definidas para este modelo.

Para los dedos se diseñó una simple implementación donde se controlaba la posición de un servomotor manualmente ingresando la posición deseada. El objetivo de esto fue determinar la posición inicial y final del que el servo debía tener para que el cada dedo tuviera el movimiento de flexión y extensión definido.

El rango de operación fue obtenido con las pruebas que se hicieron de las subrutinas y se obtuvo que el rango para que cada dedo fue:

Cuadro 94. Tabla de rango de posición de cada dedo.

Dedo de la mano	Posición contraída	Posición extendida
Pulgar	0°	140°
Índice	180°	55°
Medio	0°	180°
Anular	0°	150°
Meñique	0°	150°

Figura 390. Dedos de la mano en extensión y muñeca en pronación

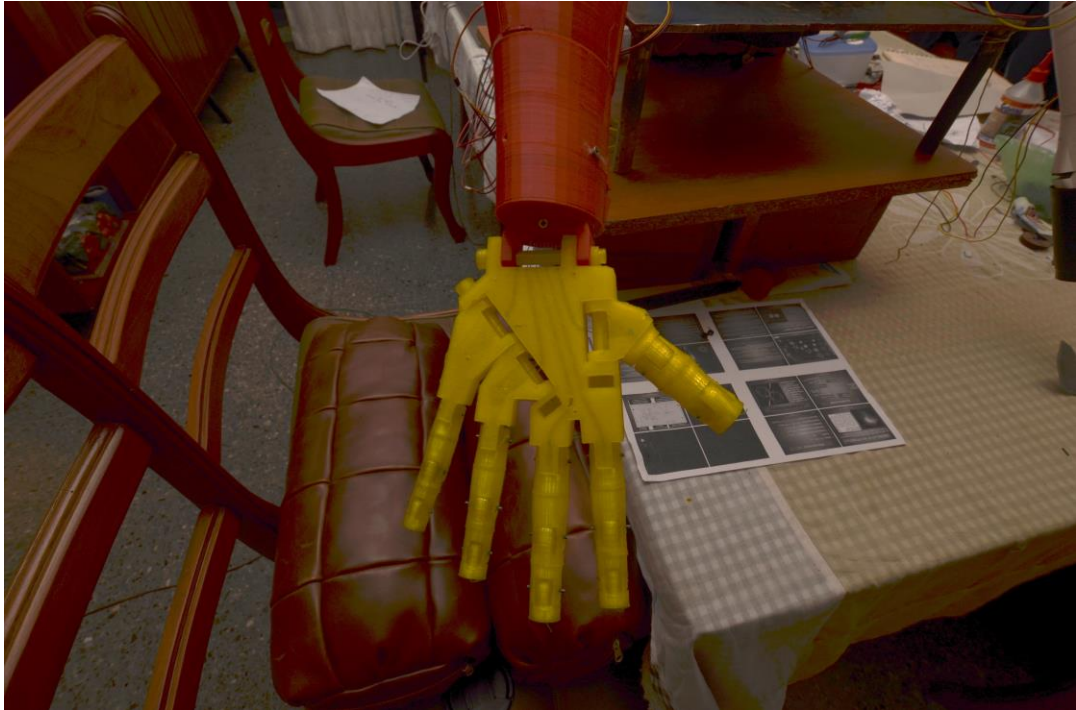


Figura 391. Dedos de la mano en compresión.



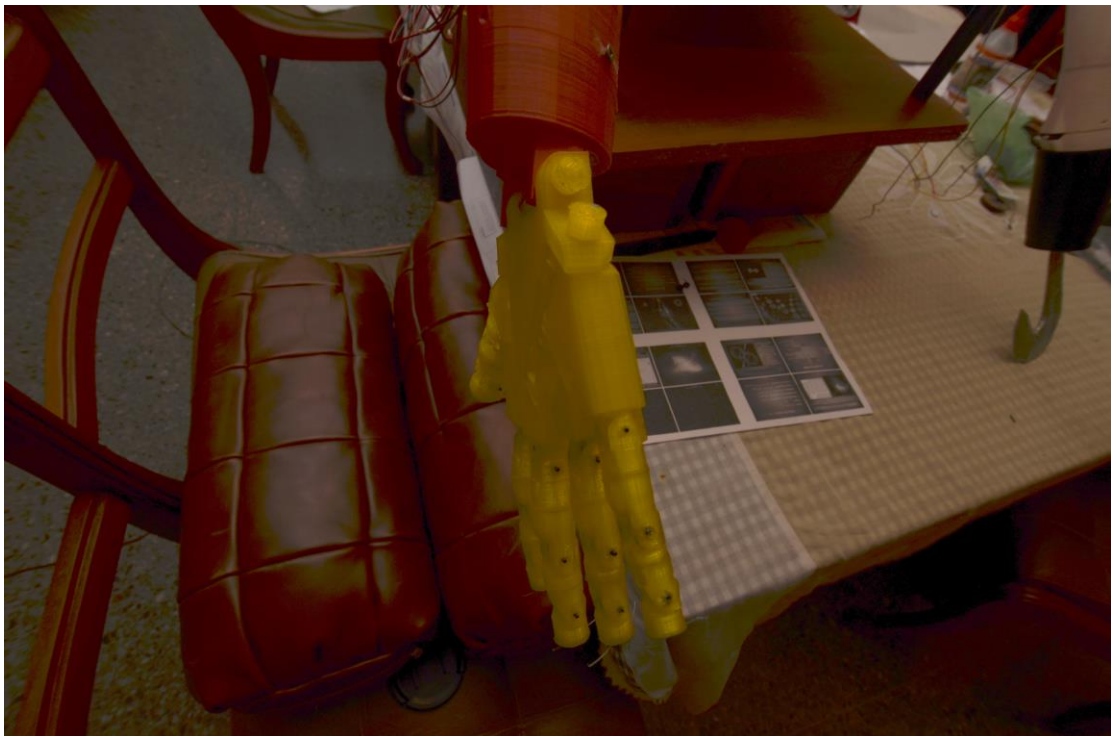
Una vez definido el rango de movimiento, se hicieron subrutinas para abrir y cerrar la mano, así como movimiento de cada dedo coordinado individual.

Para la muñeca se tenía una relación en el mecanismo de 1:1 por lo que la cantidad de movimiento angular iba ser de igual magnitud en sentido contrario en la mano. Para la programación se estableció que nuestro 0 sería la posición de la mano no rotada en el cuerpo humano e igualmente sería el 0° del motor, para así poder hacer la pronación y supinación en dicha articulación.

Cuadro 95. Tabla de rango de posición de cada dedo.

Dedo de la mano	Pronación	Supinación
Muñeca	0°	140°

Figura 392. Muñeca en pronación.



2. Codo. Para el codo en la selección de actuadores se determinó que la opción a implementar sería un servomotor inteligente MX-106T de Dynamixel®. Por lo que antes de implementar el movimiento se investigó sobre este tipo de actuadores.

Los servomotores Dynamixel® tienen implementado comunicación serial Half-Duplex, por lo que el servomotor nos puede dar retroalimentación. Este modelo de servomotor tiene implementado para retroalimentarnos información de su voltaje de entrada, voltaje de salida, posición si estuviera en modo servo, así como retroalimentación de su temperatura de operación.

Para implementarlo en Arduino® era necesario descargar una librería de Dynamixel® la cual la proveía la misma institución. La librería puede implementarse tanto en la plataforma de Arduino Uno, Mega y Nano; nosotros escogimos la plataforma del Arduino Uno por practicidad ya que era con el que se contaba.

La implementación consistió en: hacer la configuración respectiva del servomotor, donde se especifican los parámetros como velocidad de operación, temperatura de operación, modo de operación, si bien sería modo servo o continuo, la velocidad de transferencia de datos o comunicación con la computadora <baudrate>.

Para nuestro caso, esta extremidad se programó en modo servo, ya que por el paso de hélice del tornillo de potencia este con 360° de giro generaba movimiento de flexión y extensión del codo suficiente para emularlo

Cuadro 96. Tabla de rango de posición de articulación codo.

Articulación	Flexión	Extensión
Codo	360°	0°

Figura 393. Codos en posición de extensión.



Figura 394. Codos en posición de flexión.



3. **Hombro.** Para el hombro se implementó una subrutina diferente, ya que se configuró inicialmente en modo continuo, ya que no queremos que el actuador nos de la referencia, sino que el movimiento del brazo sea el que nos de la referencia sobre su posición.

Para el diseño se utilizó un potenciómetro, que estaríamos leyendo por una entrada analógica del Arduino, donde se hace una conversión de la lectura que va desde 0 – 1023 ya que se tiene una resolución de 10 en el ADC del microcontrolador. El potenciómetro nos sirve para darnos la referencia del sistema que en este caso es el brazo.

Al hacer la implementación de este modo, se tiene un sistema de control de lazo cerrado, donde retroalimentamos nuestra referencia con un sensor analógico que estamos comparando con la posición deseada constantemente hasta que este sensor nos indique que su posición es igual a la posición que establecimos, este se detenga y se mantenga en dicha posición.

Se implementó un movimiento de 0 – 180°, por lo que fue necesario hacer en programación un mapeo de la señal del potenciómetro para que en su máximo giro no fuera 360° sino que lo mapeáramos en 180°.

Cuadro 97. Tabla de rango de posición de articulación hombro.

Articulación	Flexión	Extensión
Hombro	0°	180°

Figura 395. Hombro derecho en posición de extensión.

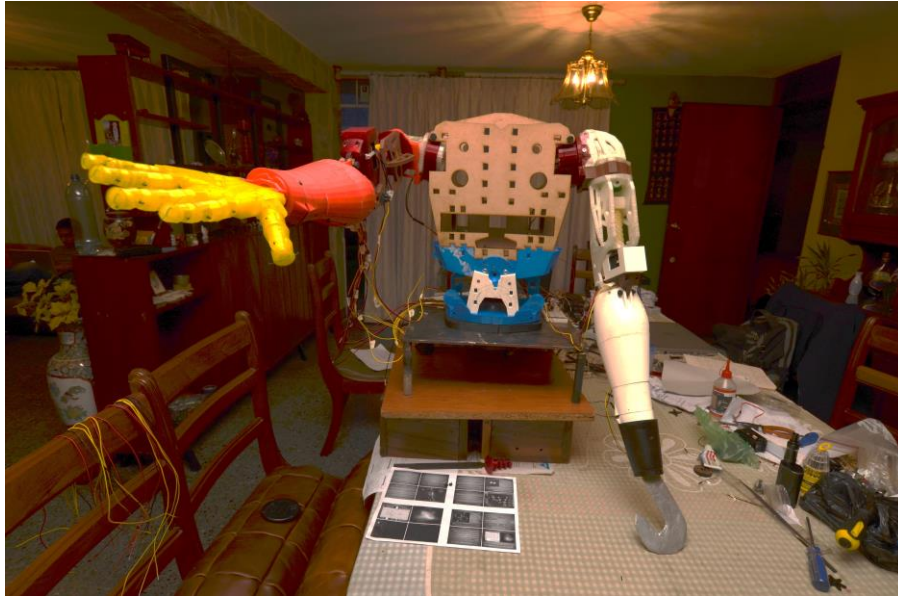


Figura 396. Hombro izquierdo en posición de extensión.



Figura 397. Hombros en posición de flexión.



H. PRUEBAS E INTEGRACIÓN

El objetivo del megaproyecto era construir un animatrónico funcional de un pirata de medio cuerpo superior que emulara el comportamiento humano. Por lo que el proyecto se dividió en cuatro diferentes módulos para alcanzar nuestro objetivo final. Cada módulo tenía sus objetivos individuales que buscaban satisfacer el objetivo del módulo del megaproyecto.

Mi módulo se centraba en la construcción de ambos brazos, tomando en cuenta extremidades de hombro, codo, muñeca y en solamente uno de los brazos, la mano con sus dedos, mientras que el otro brazo sólo consideraba un garfio, ya que el tema del animatrónico era hacer un pirata humanoide.

El módulo del torso, contemplaba la construcción de la cintura y el pecho; la cintura permitiría al animatrónico girar sobre su eje, simulando el movimiento de rotación humano. El pecho debía contemplar la integración de los hombros junto con la integración del módulo de sensores.

El módulo de reconocimiento de gestos y audio permite la interacción máquina – humano en el animatrónico, donde la persona tiene la capacidad de mantener una conversación al mismo tiempo que se procesa sus movimientos y se almacenan cada uno de ellos para que, el animatrónico pueda responder al que tenga asignado.

Por último, está el módulo de control y potencia, el cuál por la parte de potencia se seleccionó las fuentes de poder con la capacidad de alimentar a todos los actuadores que tiene el animatrónico, así como proveer seguridad y aislamiento entre control y alimentación. Por la parte de control, debía animar al animatrónico con movimientos y rutinas programadas que reaccionarán con los gestos reconocidos.

Todos estos módulos en conjuntos formarían al humanoide de medio cuerpo superior y le darían vida; lo importante en esta sección era hacer suficientes pruebas que garantizaran un buen y suave movimiento de las extremidades y del mismo modo no arriesgar el trabajo realizado por cada uno de los módulos.

Se montaron ambos brazos al módulo del torso con el fin de analizar las cargas que estas provocan en el mecanismo de rotación del torso; además de darle soporte a la extremidad del hombro para poder empezar a realizar las pruebas para un brazo.

En las pruebas iniciales se consideraron suficientes medidas de seguridad o cuidado que garantizaran que las pruebas se podían hacer sin el cuidado de fracturar o dañar alguno de los mecanismos; cada uno de los módulos antes de ser integrados, debían saber los rangos de operación para cada articulación y conocer sus posiciones máximas y mínimas ya con carga.

Figura 398. Brazos y torso ensamblados.



Figura 399. Integración de módulo de control, reconocimiento de gestos y audio, torso y brazos.

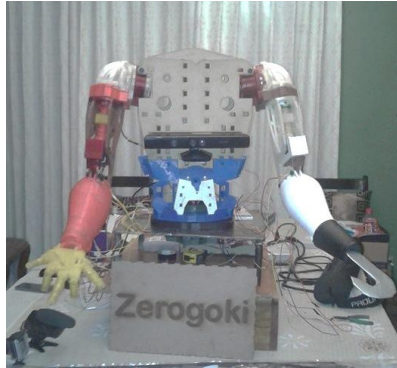


Figura 400. Integración de módulo de control, reconocimiento de gestos y audio, torso y brazos.

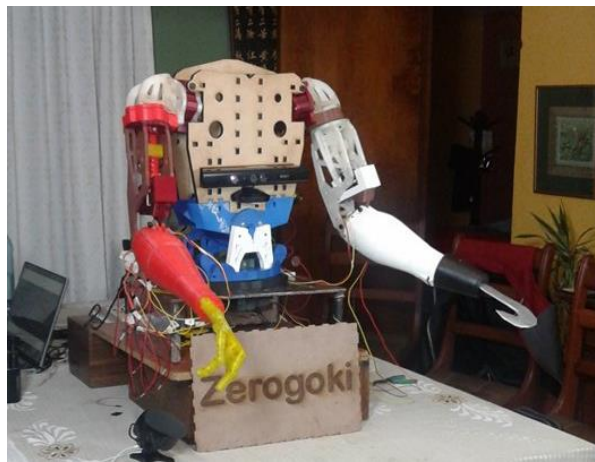


Figura 401. Integración de módulo de control, reconocimiento de gestos y audio, torso y brazos



I. COSTOS

El objetivo general del proyecto era construir un animatrónico de bajo costo ya que en el mercado la tecnología es muy cara de adquirir para parques recreación donde tienen un presupuesto limitado.

El brazo animatrónico del pirata que se implemento debía seguir el objetivo general del proyecto, por lo que se consideraron los costos necesarios para construirlo. En el mercado, sólo una mano animatrónica tiene un costo que asciende los \$2,500; hacemos referencia a precios del mercado para justificar si el costo de nuestro prototipo es de menor costo comparado con los existentes.

1. **Material de manufactura.** Para la manufactura del animatrónico ya se habló sobre que tecnología se implementó para la construcción, así como el material seleccionado para el mismo. Se utilizó el equipo con el que ya contaba la Universidad como dos impresoras 3D de manufactura FDM donde se manufacturó la totalidad de las piezas necesarias para construirlo.

El filamento de impresión escogido fue el PLA, pero en términos de costos comparado con ABS, tienen el mismo costo, así que no influye el costo del material en la elección que se hiciera.

Cuadro 98. Tabla de costo de material de impresión.

Cant.	Descripción	Costo unitario	Costo total	Proveedor
9	Libra de filamento de impresión PLA de 3mm	Q. 350	Q. 3,150.00	Mini - 3DFactory
Total			Q. 3,150.00	

Para el proyecto por ser un prototipo se consideró la manufactura de impresión 3D, así mismo para que el costo fuera menor. El tipo de manufactura y material debería de cambiar en un futuro si se piensa implementar a una manufactura de máquinas y herramientas y con un material más resistente al desgaste, ya que el PLA funcionó bien para mostrar el funcionamiento de los mecanismos de los brazos, pero no está diseñado para un continuo desgaste.

2. **Actuadores.** Para los actuadores se mostrarán dos diferentes posibilidades, debido que para este proyecto contó con la ayuda de la Universidad con los actuadores; los cuales representan una carga considerable en los costos del mismo.

En la sección de selección de actuadores se hizo una tabla de decisión en la que se consideraron varias opciones de actuadores, donde uno de los criterios era el precio y este tenía bastante peso por el hecho de querer un prototipo de bajo costo.

Se analizaron varias opciones de actuadores en el mercado que cumplían con los requerimientos; para este inciso de costo, se analizará la posibilidad que nunca hubiéramos tenido los actuadores y se hubiera tenido que hacer el gasto, así como también la opción que se tomó de optar por actuadores que se tuviera en disposición.

Cuadro 99. Tabla de costo de actuadores utilizados.

Cant.	Descripción	Costo unitario	Costo total	Proveedor
4	MX-106T	Q. 4,450.86	Q. 17,803.45	Mini - 3DFactory
8	MG-996R	Q. 70.00	Q. 560.00	Amazon
Total			Q. 18,363.45	

Cuadro 100. Tabla de costo de actuadores recomendados.

Cant.	Descripción	Costo unitario	Costo total	Proveedor
4	HS-805BB	Q. 500.00	Q. 2,000.00	Mini - 3DFactory
8	MG-996R	Q. 70.00	Q. 560.00	Amazon
Total			Q. 2560.00	

3. **Análisis y resultados de costos.** Para el análisis y resultado de costos se tiene que considerar que no se tomó en cuenta en costo la impresora 3D, gastos diversos en tornillos y herramientas, ya que se contaba con esos materiales.

El costo total de los brazos animatrónicos, contemplando el material de impresión y los actuadores empleados haciendo a los Q. 20,923.45.

Tomando en cuenta que la universidad facilitó los actuadores MX-106T, se gastó únicamente Q.560.00 de los actuadores para los dedos y mecanismo de muñecas, que sumando el material da como total Q. 3,710.00 en dos brazos animatrónicos construidos.

La otra posibilidad a considerar es que, de haber hecho el gasto de los actuadores que se recomiendan, el costo total podría ascender a Q. 5,710.00 que también sigue siendo un precio razonable.

Si comparamos estos costos obtenidos con el precio de una mano animatrónica que en el mercado ronda en los Q.19,000.00; es de considerar que estamos comparando solamente la mano, que incluye los 5 dedos y el movimiento de muñeca, contra los dos brazos completos que incluyen una mano completa y dos mecanismos de muñeca, así como el movimiento de flexión y extensión del codo y hombro.

IX. MÓDULO DE RECONOCIMIENTO DE GESTOS Y AUDIO

A. RESUMEN

El presente módulo buscó implementar y desarrollar algoritmos de procesamiento de audio y video, para lograr una interacción natural, reconociendo ciertos gestos y palabras entre el usuario y el animatrónico. Para lograr dicha interacción se plantearon bases de datos de palabras, frases y gestos que el animatrónico fuera capaz de reconocer. Se creó una red de sensores para la recopilación de datos necesarios para la interpretación del comportamiento de las personas. Se implementó y desarrolló un algoritmo capaz de reconocer palabras dirigidas hacia el animatrónico. Se implementó y desarrolló un algoritmo para el reconocimiento de gestos efectuados por el usuario en la interacción con el mismo, además de ser capaz de por medio de la medida entre los hombros del usuario identificar si es un niño o una persona adulta. Y se implementó un sistema de respuesta sonora para darle a éste la capacidad de responder de manera auditiva.

Se logró que el animatrónico fuera capaz de reconocer palabras y gestos de un usuario ubicado a una distancia entre 1.2 y 2 metros del mismo, con un porcentaje de efectividad mayor a 90% para los gestos y una confiabilidad mayor al 68%, en un ambiente de laboratorio.

Se recomienda la investigación e implementación de nuevas técnicas para la reducción del ruido y mejorar la confiabilidad y calidad de la recaudación de datos auditivos para el reconocimiento de voz, además de incrementar la base de datos de gestos a reconocer.

B. INTRODUCCIÓN

El módulo de reconocimiento de gestos y audio es parte del megaproyecto “animatronics”. El término animatrónico refiere a utilizar componentes robóticos y electrónicos combinados para lograr emular el comportamiento de un ser vivo. Dicho animatrónico es capaz de tener movimientos en los brazos y en el torso, además de poder reconocer algunos gestos y palabras del usuario para lograr interactuar con el mismo.

El presente módulo busca lograr que el animatrónico sea capaz de recopilar e interpretar la mayor cantidad de datos sobre el comportamiento del usuario y su entorno para poder interactuar naturalmente con personas. Dicha interacción, a grandes rasgos, está constituida por tres aspectos generales. El primero es, a partir de la medida entre los hombros del usuario, reconocer si el usuario es un niño o una persona adulta, de esta manera se hace que el animatrónico utilice un comportamiento adecuado. El segundo es reconocer los gestos que la persona podría realizar hacia el animatrónico, una vez ya reconocidos estos gestos el mismo es capaz de responder adecuadamente a cada uno de ellos. El último aspecto es reconocer las palabras del usuario dirigidas al animatrónico, analizarlas e identificar qué palabra o frase es para que el mismo responda, de una forma sonora congruente a lo interpretado.

Debido a su facilidad de uso y la basta documentación que existe al respecto, además de estar constituido por los instrumentos básicos necesarios, el Kinect fue el sensor mejor calificador para ser la red de sensores utilizados en este módulo. El rango para conseguir una mejor realización de reconocimiento de audio y gestos es de 1.2 a 2 metros de distancia entre el Kinect y el usuario. Se recomienda estar ubicado aproximadamente a 1.5 metros.

C. OBJETIVOS

1. General

- Implementar y desarrollar algoritmos de procesamiento de audio y video, para lograr una interacción natural, reconociendo ciertos gestos y palabras entre el usuario y el animatrónico.

2. Específicos

- Definir una base de datos de palabras a reconocer, para que el animatrónico pueda interactuar en una pequeña conversación.
- Definir una base de datos de gestos a reconocer, para que el animatrónico pueda responder con gestos.
- Crear una red de sensores por medio de la cual se logren recopilar los datos necesarios para la interpretación del comportamiento del usuario.
- Implementar y desarrollar un programa capaz de reconocer palabras dirigidas hacia el animatrónico.
- Implementar y desarrollar un programa de reconocimiento de gestos efectuados por el usuario para lograr que el animatrónico reaccione adecuadamente a los mismos.
- Implementar y desarrollar un algoritmo que mida el tamaño de torso del usuario para identificar si es un niño o una persona adulta.
- Implementar un sistema de respuesta sonoro por medio del cual el animatrónico pueda responder al usuario.

D. METODOLOGÍA

1. **Selección de sensores.** Tanto para el reconocimiento de audio como para el reconocimiento de gestos, el primer paso es identificar los principales sensores y dispositivos de captación de datos necesarios para dichas tareas. Para ello se realizó una pequeña investigación de los sensores disponibles en el mercado y se tomaron en cuenta aquellos que contaban con las mejores características que se adecuaban mejor al proyecto.

Para el reconocimiento de gestos se tomaron en cuenta: cámaras RGB, cámaras IR, sensor de gestos APDS-9960 y controlador Wii Remote.

Para el reconocimiento de audio y voz se tomaron en cuenta: micrófonos omnidireccionales, unidireccionales y bidireccionales. Se encontraron algunos dispositivos en el mercado que cuentan con características interesantes para ser utilizados tanto para el reconocimiento de gestos como para el reconocimiento de audio, entre ellos se pueden mencionar: el PlayStation Move combinado con el PlayStation Eye, y el Kinect disponible para la consola de videojuegos Xbox360 y para el sistema operativo Windows.

Es importante mencionar que se estableció con los demás módulos del proyecto que el sistema operativo a utilizar para controlar todos los módulos sería Windows por lo que todos los sensores a tomar en cuenta debían ser compatibles con dicho sistema operativo.

Las principales características que se buscaron en el reconocimiento de gestos fueron: que el sistema lograra ser capaz de reconocer a una o varias personas ubicadas a una distancia prudente de interacción con el animatrónico; que lograra ser capaz de hacer un rastreo continuo de la ubicación aproximada de cada una de las partes del cuerpo del o de los usuarios y que fuera capaz de reconocer ciertos gestos usualmente utilizados en la interacción humana. En base a las características antes mencionadas, se evaluó cada uno de los sensores tomados en cuenta para saber si cumplían con los requerimientos establecidos. Otro aspecto importante para escoger los sensores a utilizar fue que pudieran ser acoplados tanto con los demás sensores de la red como con las otras partes del proyecto en general.

Las principales características que se buscaron en el reconocimiento de audio y voz en este proyecto fueron: que el sistema lograra recopilar datos auditivos del ambiente, que lograra reconocer la voz humana, que reconociera las palabras dirigidas hacia el mismo por parte de cualquier usuario y que fuera capaz de analizar las palabras recibidas y responder acorde a las mismas. En base a las características antes mencionadas, cada uno de los sensores tomados en cuenta fueron evaluados para saber si cumplían con los requerimientos establecidos.

Tras realizar dicha investigación; se concluyó que la red de sensores ideal para esta aplicación debería de estar constituida por una cámara RGB, una cámara IR y un arreglo de micrófonos de alta fidelidad. Las cámaras serían las encargadas de recopilar los datos para el reconocimiento de gestos y los micrófonos de recopilar los datos para el reconocimiento de audio y voz. Sin embargo; como el presente módulo pertenece a solo un prototipo, se decidió no realizar una gran inversión en sensores de la más alta calidad y precio, sino utilizar una red de sensores ya creada y disponible en el mercado a un precio accesible: el sensor Kinect. El que incluye todos los sensores antes mencionados, además de un motor de inclinación útil para ajustar las cámaras dependiendo del entorno en el que se encuentre.

2. **Selección de lenguaje de programación.** El primer lenguaje de programación evaluado para el reconocimiento de audio fue Python junto con el IDE, Spyder. Python cuenta con varias librerías de utilidad para la adquisición de datos de audio, entre ellas se puede mencionar “PyAudio”. Sin embargo, existe otra librería de mucha mayor utilidad llamada “SpeechRecognition” que como su nombre lo indica, es dedicada a la recaudación de datos de audio enfocado al reconocimiento de voz. Esta cuenta con varios métodos y parámetros de gran utilidad para un mejor reconocimiento dependiendo de las condiciones del ambiente, entre ellos se pueden mencionar: “Microphone()”, encargado de representar un micrófono físico en la computadora; “Recognizer()”, encargado de representar un conjunto de parámetros y funcionalidades del reconocimiento de audio; “recognizer_instance.energy_threshold”, encargado de establecer un límite de nivel de energía para que aquellos sonidos que no sobrepasen ese valor sean ignorados y los que lo pasen sean considerados como voz; “recognizer_instance.pause_threshold”, encargado de establecer el tiempo de silencio luego de hablar para indicar el fin de la frase; “recognizer_instance.recognize_google”, encargado de realizar el reconocimiento de voz utilizando el “API” de reconocimiento de voz de google; entre otros también importantes. Para más información acerca de la librería se puede visitar la siguiente dirección: https://github.com/Uberi/speech_recognition/blob/master/reference/library-reference.rst (Zhang, 2016).

Sin embargo, el uso de esta librería presentó ciertos problemas para el fin del proyecto. Ya que, para realizar el reconocimiento de las palabras, la librería se conecta con las librerías de google vía internet, por lo que sin una conexión a internet el reconocimiento de voz era imposible. Además; la velocidad de respuesta de dicha librería depende totalmente de la conexión a internet. Esto resulta poco práctico para el animatrónico debido a que la conexión a internet no siempre es posible, además que, si se pretende tener una respuesta fluida por parte del mismo, es necesaria una conexión muy buena con alta velocidad. Es por ello que se siguieron investigando otras opciones de lenguajes de programación. Se encontró que por medio del lenguaje C# en Visual Studio también era posible realizar reconocimiento de voz utilizando el sensor Kinect y lo más importante, sin uso de la conexión a internet. El lenguaje C# utiliza el "Microsoft.Speech.Recognition Namespace" para realizar esta tarea. Se empezó a trabajar con este lenguaje y se notó que la comunicación con el Kinect era muy fluida, ya que cuenta con muchas herramientas para el manejo del mismo y lo más importante, que también es posible realizar el reconocimiento de gestos con esta herramienta (se ampliará al respecto más adelante). Al hacer uso de librerías y paquetes de Microsoft, C# es una herramienta valiosa e ideal para el reconocimiento de voz para esta aplicación.

Para el reconocimiento de gestos, el primer lenguaje de programación utilizado fue Processing. Processing, que cuenta con librerías totalmente compatibles con las cámaras que componen el Kinect por lo que se empezó a trabajar con el mismo. La librería SimpleOpenNI cuenta con algunos ejemplos en donde se implementa el reconocimiento del cuerpo completo entre otras acciones. Uno de los ejemplos más importantes y útiles para esta aplicación es el archivo “hands.pde”, en el que se hace el reconocimiento de uno de los gestos más comunes en la interacción humana: el saludo. El programa emerge una ventana en

donde se muestra una imagen IR del panorama visto por la cámara; cuando el usuario realiza el gesto de saludo, éste lo reconoce e inicia un monitoreo continuo de la posición en tres dimensiones de la mano con la que se hizo el saludo y colorea un patrón de puntos durante el recorrido inmediato de la mano. Como puede observarse en la siguiente figura.

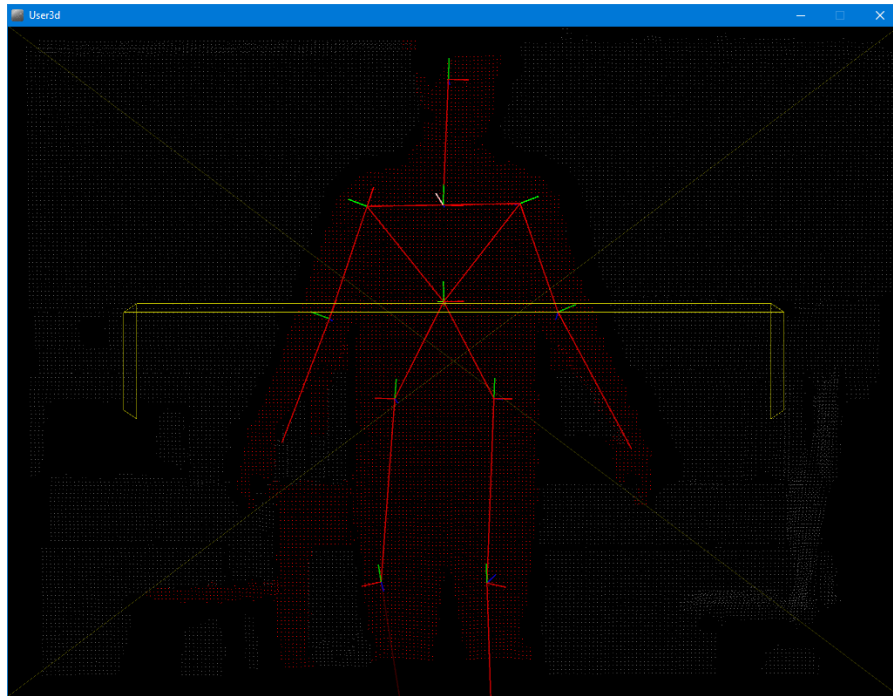
Figura 402. Pantallazo de ejemplo “hands.pde”



(Rheiner,2012)

Otro archivo importante dentro de los ejemplos disponibles dentro de SimpleOpenNI es “user3d.pde”, el que consiste en el análisis del cuerpo humano completo y la detección de 20 articulaciones presentes en éste. En base a este programa es posible identificar la posición en tres dimensiones de las articulaciones y hacer un bosquejo de las uniones entre ellas (ver Figura 415). Luego de ver estos ejemplos se llegó a la conclusión que en Processing, con ayuda de esta librería, era posible llegar a hacer un análisis completo de los gestos realizados por los usuarios que interactuaran con el animatrónico. Sin embargo, los problemas surgieron al momento de querer unir el reconocimiento de gestos con el reconocimiento de audio y voz.

Figura 403. Pantallazo ejemplo “user3d.pde”



(Rheiner,2012)

Como hasta ese momento los reconocimientos se hacían en lenguajes de programación y programas distintos, fue necesario encontrar una vía de comunicación entre ambos. La forma más sencilla de implementar esta comunicación fue creando un archivo de texto en donde el encargado del reconocimiento de gestos (Processing) escribiera los datos más importantes de los gestos reconocidos y el encargado del reconocimiento de audio (Python) leyera estos datos, los interpretara y respondiera de acuerdo a los mismos en conjunto con las palabras reconocidas. Los resultados hasta ese momento eran satisfactorios; pero siempre existía la molestia de tener que utilizar dos lenguajes de programación y programas distintos, además de la necesidad del uso de internet anteriormente mencionado, por lo que se siguió investigando acerca de qué otros lenguajes de programación podían tener acceso a todas las funcionalidades del Kinect.

Como ya se mencionó, se encontró una forma de realizar ambos reconocimientos en el mismo lenguaje y explotar al máximo los recursos del Kinect, tanto las cámaras y sensores como el arreglo de micrófonos. En Microsoft Visual Studio es posible manejar todos estos recursos del Kinect y con ayuda de algunas librerías y paquetes de Microsoft realizar un reconocimiento de gestos y audio sin necesidad del uso de internet. Las dos razones principales por las que se decidió utilizar Microsoft Visual Studio, específicamente el lenguaje C#, es que se logró realizar el reconocimiento de gestos y audio en un mismo programa y el reconocimiento de voz en español sin necesidad de una conexión a internet y con una velocidad de respuesta adecuada para una interacción fluida con el animatrónico. Otro aspecto importante a mencionar es que en el “Developer Toolkit Browser v1.8.0” (Kinect for Windows) se encuentran varios ejemplos de aplicaciones que se pueden

realizar por medio del uso del Kinect y Microsoft Visual Studio, los que están disponibles en lenguaje C#, C++ y Visual Basic.

3. **Configuración de sensor Kinect y entorno de programación.** Es importante mencionar que los siguientes pasos de instalación solo aplican para máquinas con Windows nativo, no para máquinas virtuales con Windows, ni con otro sistema operativo.

a. **Instalación SDK de Kinect for Windows 1.8.** Para poder instalar el SDK es necesario seguir los siguientes pasos (Microsoft, 2016):

1. Descargar el instalador desde el siguiente enlace: <https://www.microsoft.com/en-us/download/details.aspx?id=40278>.
2. Asegurarse que el Kinect no esté conectado a ningún puerto USB de la computadora.
3. Si se tiene alguna versión anterior de SDK de Kinect for Windows instalada, es necesario desinstalarla.
4. Remover cualquier otro driver del Kinect.
5. Cerrar Visual Studio.
6. En la carpeta de descargas, hacer doble click sobre el instalador descargado en el paso 1: KinectSDK-v.1.8-Setup.exe.
7. Luego que el SDK se haya instalado correctamente, conectar el Kinect a alimentación externa y a uno de los puertos USB de la computadora. Los drivers se cargarán automáticamente.
8. El Kinect debería funcionar correctamente.
9. Es recomendable descargar el “Kinect for Windows Developer Toolkit”, este contiene algunos códigos de ejemplo, herramientas y otros recursos que pueden ayudar en el desarrollo de la utilización del Kinect.

b. **Instalación “Developer Toolkit Browser v1.8.0 (Kinect for Windows)”.** Para poder instalar el “Developer Toolkit”, es necesario seguir los siguientes pasos (Microsoft, 2016):

1. Asegurarse de tener instalado “Kinect for Windows SDK v1.8”
2. Descargar el archivo “KinectDeveloperToolkit-v1.8-Setup.exe” desde el siguiente enlace: <https://www.microsoft.com/en-us/download/details.aspx?id=40276>.
3. Hacer doble click sobre el archivo descargado. El mismo instalador es compatible con Windows de 32-bit o 64-bit.
4. Ejecutar el programa instalado y verificar que se pueda navegar por el “Developer Toolkit”.

c. **Otros requerimientos.** Otros archivos necesarios para el desarrollo del presente módulo son los siguientes (Microsoft, 2016):

- Descargar e instalar el “MicrosoftSpeechPlatformSDK.msi” compatible para su sistema operativo en el siguiente enlace: <https://www.microsoft.com/en-us/download/details.aspx?id=14373>.
- Descargar e instalar el “KinectSpeechLanguagePack_es-MX.exe” del siguiente enlace: <https://www.microsoft.com/en-us/download/details.aspx?id=34809>.
- Descargar e instalar el archivo “MSSpeech_SR_es-MX_TELE.msi” del siguiente enlace: <https://www.microsoft.com/en-us/download/details.aspx?id=21924>.
- Descargar e instalar el archivo “MSSpeech_TTS_es-MX_Hilda.msi” del siguiente enlace: <https://www.microsoft.com/en-us/download/details.aspx?id=21924>.
- Descargar e instalar Microsoft Visual Studio 2010 o 2012 en cualquiera de sus versiones.

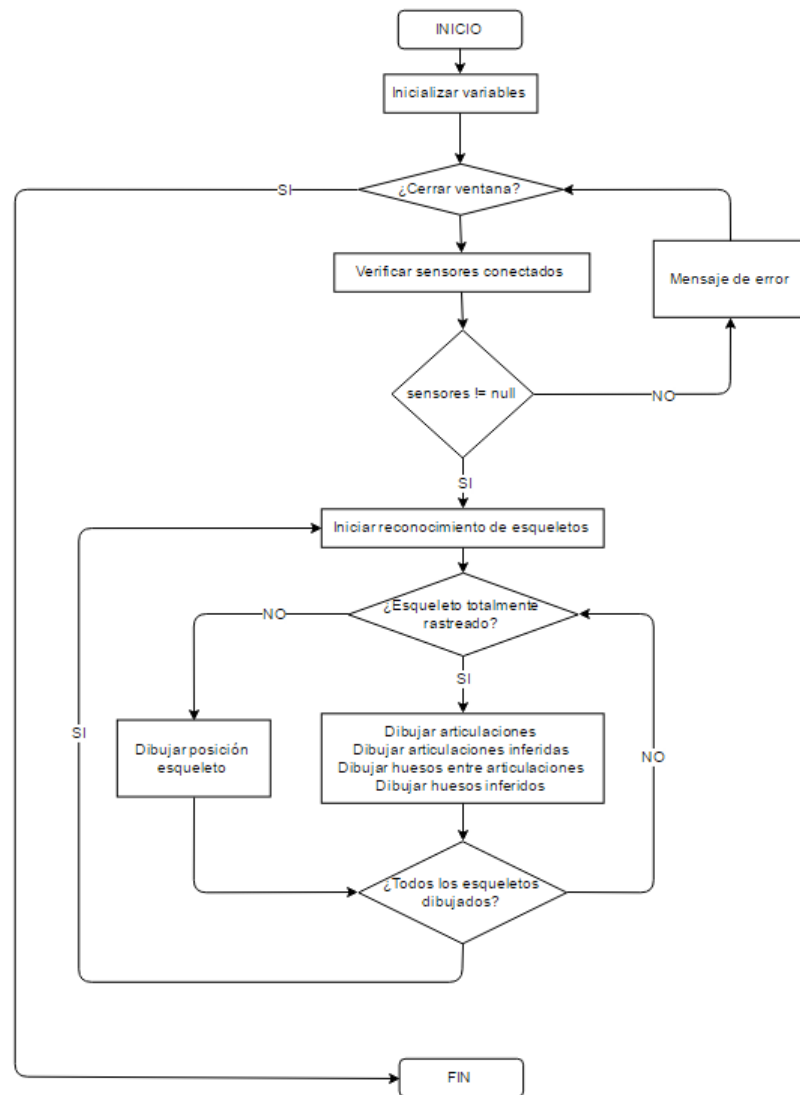
Antes de empezar a utilizar el Kinect, es importante verificar que todo se esté bien instalado. Para ello se recomienda realizar los siguientes pasos (Microsoft, 2016):

- Conectar la fuente de alimentación externa del sensor Kinect.
- Conectar el sensor Kinect a un puerto USB de la computadora utilizada.
- Se instalarán algunos drivers necesarios, esperar mientras se terminan de instalar.
- El LED verde del sensor debe parpadear.
- Ir al administrador de dispositivos en el panel de control (Panel de control\Hardware y sonido), debajo del “Microsoft Kinect” deben aparecer los siguientes nodos: “Microsoft Kinect Audio Array Control”, “Microsoft Kinect Camera” y “Microsoft Kinect Device”.

4. Implementación y desarrollo de algoritmo de reconocimiento. El algoritmo implementado y desarrollado en este módulo se basó principalmente en dos ejemplos existentes. Uno se encuentra disponible en el “Developer Toolkit Browser v1.8.0 (Kinect for Windows)”, sección “Samples: C#”, llamado “Skeleton Basics- WPF”. El otro se encuentra disponible en la siguiente dirección electrónica: <https://channel9.msdn.com/Series/KinectQuickstart/Audio-Fundamentals>; sección “Resources”, opción “Download the Quickstart slides and samples”, carpeta “audio/KinectAudioDemo”, archivo llamado “KinectAudioDemo.sln”.

El primer ejemplo consiste en realizar un rastreo continuo de las articulaciones del cuerpo humano y representar un bosquejo de las uniones de las mismas en pantalla. En la Figura 404 se muestra el diagrama de flujo del procedimiento realizado.

Figura 404. Diagrama de flujo ejemplo “Skeleton Basics - WPF”



Con base en este ejemplo se realizó toda la parte de reconocimiento de gestos para el presente proyecto. El primer paso fue estudiar y analizar el código completo del mismo, para poder identificar todos los recursos con los que se contaba y los que hacían falta poder realizar un reconocimiento de gestos satisfactorio. Luego de tener claro cada uno de los segmentos de código, se determinó la posición exacta de cada una de las articulaciones (en píxeles). Conociendo la posición de cada una de las articulaciones, se logró hacer el análisis de la relación entre ellas y de esta manera determinar los gestos realizados por el usuario.

Cuadro 101. Variables de interés, reconocimiento de gestos

Nombre variable	Descripción
hombroDer	Variable tipo Joint que permite determinar la posición en “X” y “Y” del hombro derecho del usuario
hombroIzq	Variable tipo Joint que permite determinar la posición en “X” y “Y” del hombro izquierdo del usuario
manoDer	Variable tipo Joint que permite determinar la posición en “X” y “Y” de la mano derecha del usuario
manoIzq	Variable tipo Joint que permite determinar la posición en “X” y “Y” de la mano izquierda del usuario
cabeza	Variable tipo Joint que permite determinar la posición en “X” y “Y” de la cabeza del usuario
codoDer	Variable tipo Joint que permite determinar la posición en “X” y “Y” del codo derecho del usuario
codoIzq	Variable tipo Joint que permite determinar la posición en “X” y “Y” del codo izquierdo del usuario
difHombros	Distancia en pixeles entre los hombros del usuario

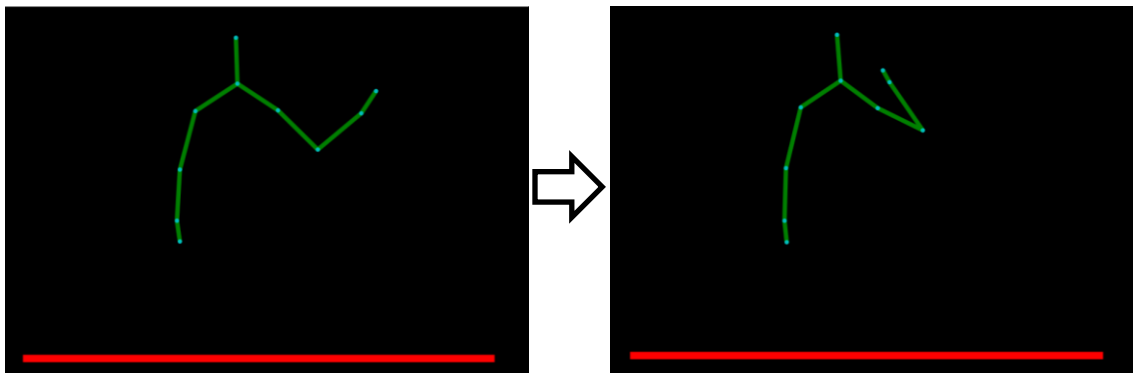
Por ejemplo, comparando la posición en “Y” de cada mano con la posición en “Y” de la cabeza es posible determinar si una de las manos está levantada, identificar cual exactamente es la que está arriba (izquierda o derecha) o bien si ambas manos están levantadas. Es decir, si “manoDer.Position.Y” es mayor a “cabeza.Position.Y” quiere decir que la mano derecha está levantada, si “manoIzq.Position.Y” es mayor a “cabeza.Position.Y” quiere decir que la mano izquierda está levantada y si “manoDer.Position.Y” y “manoIzq.Position.Y” son mayores que “cabeza.Position.Y” quiere decir que ambas manos están levantadas.

Otro gesto reconocido fue tener los brazos extendidos, como indicando querer dar un abrazo. Para este gesto fue necesario hacer uso de una relación de tamaño propia del cuerpo que está interactuando, la longitud entre los hombros del usuario (variable “difHombros”). Si la posición de la mano derecha (“manoDer.Position.X”) sobrepasa un punto de referencia, establecido a una vez la longitud entre los hombros del hombro derecho (“hombroDer.Position.X + difHombros”), y la posición de la mano izquierda (“manoIzq.Position.X”) sobre pasa otro punto de referencia, establecido a una vez la longitud entre los hombros del hombro izquierdo (“hombroIzq.Position.X – difHombros”), quiere decir que el usuario está realizando el gesto de “brazos abiertos”.

Otro gesto a reconocer y comúnmente utilizado en una interacción humana es “cruzar los brazos”. La forma que se utilizó para identificar este gesto fue identificar la posición en “X” de cada una de las manos y validar si cada una se encontraba en la otra mitad del cuerpo, es decir, si la mano derecha se encontraba

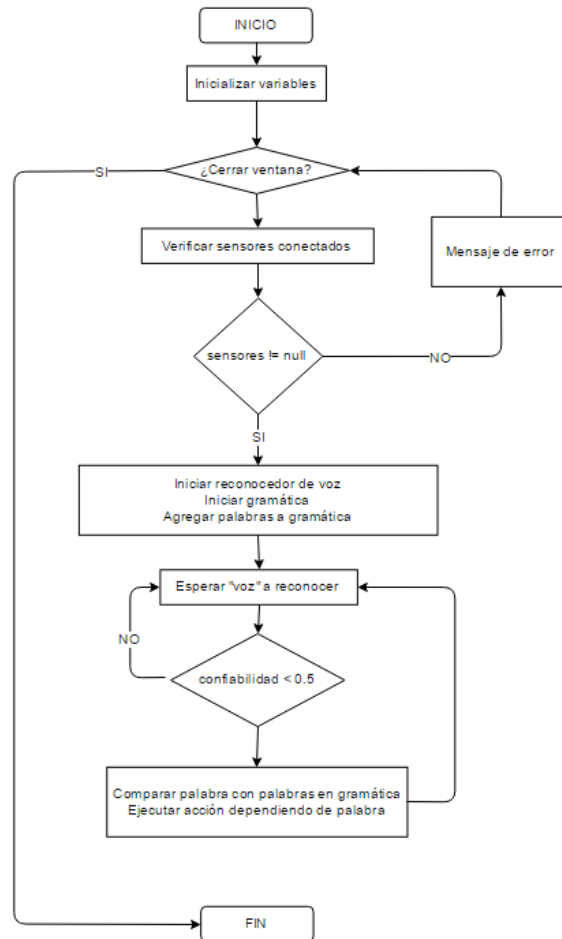
posicionada del lado izquierdo del cuerpo y viceversa (“manoDer.Position.X < cabeza.Position.X & manoIzq.Position.X > cabeza.Position.X”). Por último, se implementó el gesto de “saludar” agitando alguna de las dos manos. Para este gesto fue necesario, no sólo conocer la posición actual de la mano, sino también la posición pasada (ver Figura 405) de la misma para identificar si la mano se encontraba haciendo el movimiento de ir de lado a lado realizando el gesto de saludo. En este caso también se utilizó la posición en “X” de cada mano (“manoDer.Position.X” y “manoIzq.Position.X”) comparándola con la posición en “Y” y “X” del codo (“codoDer.Position.X”, “codoIzq.Position.X”, “codoDer.Position.Y” y “codoIzq.Position.Y”) del mismo brazo. Se implementó un contador para cada mano, y si cambia cierta cantidad de veces de lado del codo del mismo brazo, se interpreta como el gesto de saludo agitando la mano. Este gesto fue implementado para ambas manos.

Figura 405. Secuencia movimientos para reconocimiento de saludo



El segundo ejemplo consiste en hacer un reconocimiento de audio y voz en el idioma inglés con algunas palabras básicas y acciones sencillas en la interfaz gráfica. En la Figura 406 se muestra el diagrama de flujo del procedimiento realizado.

Figura 406. Diagrama de flujo ejemplo “KinectAudioDemo”



Tomando como base este ejemplo se procedió a hacer el reconocimiento de algunas palabras en idioma español. Para lo que fue necesario instalar algunos paquetes de Microsoft del idioma español. Una vez teniéndolo listo fue necesario empezar a pensar en el modo en que el animatrónico respondería a las palabras reconocidas. La primera solución planteada e implementada fue que dependiendo de la palabra reconocida se reprodujera un archivo de sonido con la respuesta pregrabada. Esta solución sería aceptable para una base de datos pequeña de palabras a reconocer y sus respectivas respuestas, pero debido que el objetivo era que el animatrónico lograra responder a la mayor cantidad de palabras y frases posibles, se vio en la necesidad de implementar otra solución.

La solución propuesta fue utilizar librerías de sintetizadores de voz a partir de texto, utilizando la técnica conocida como “text to speech” (en su traducción directa, texto a voz). En este caso se utilizó “System.Speech.Synthesis”, es importante mencionar que para poder utilizar este sintetizador es necesario tener instalada por lo menos una voz “text to speech” de Microsoft o algún otro proveedor. Con esta solución se logró eliminar la necesidad de tener que grabar cada una de las respuestas posibles, sino que ahora la

respuesta podía estar en una variable de tipo “string” y simplemente ser reproducida por este sintetizador. Poco a poco se fueron agregando palabras a la gramática del animatrónico para que su reconocimiento fuera más amplio y pudiera sostener una conversación cada vez más grande.

Hasta ese momento, la única manera de poder agregar palabras a la gramática del animatrónico era agregándolas directamente al código del programa por lo que surgió la idea de crear alguna forma de poder agregar más palabras, con sus respectivas respuestas, mientras el programa estuviera en ejecución. Es decir, sin necesidad de tener que parar el programa, modificar el código y volver a ejecutarlo. El primer paso para lograr esto fue pasar la gramática reconocida por el animatrónico a un formato “.xml”, de esta manera todas las palabras reconocidas no estarían directamente en el código sino en un archivo independiente del programa. Sin embargo, esta no es la solución completa para poder agregar palabras y respuestas en ejecución. Para ello se agregó un botón en la interfaz gráfica del programa que al ser presionado muestra una ventana solicitando la palabra o frase nueva a ser reconocida y la respuesta que el animatrónico debería dar. En la misma se agregó una opción en donde se pueden agregar nombres que el animatrónico debería ser capaz de reconocer. Para que el nombre pueda ser reconocido debe ser precedido de la frase “mi nombre es #nombre#”. La respuesta predeterminada para esta frase es: “Hola #nombre#, es un gusto conocerte”.

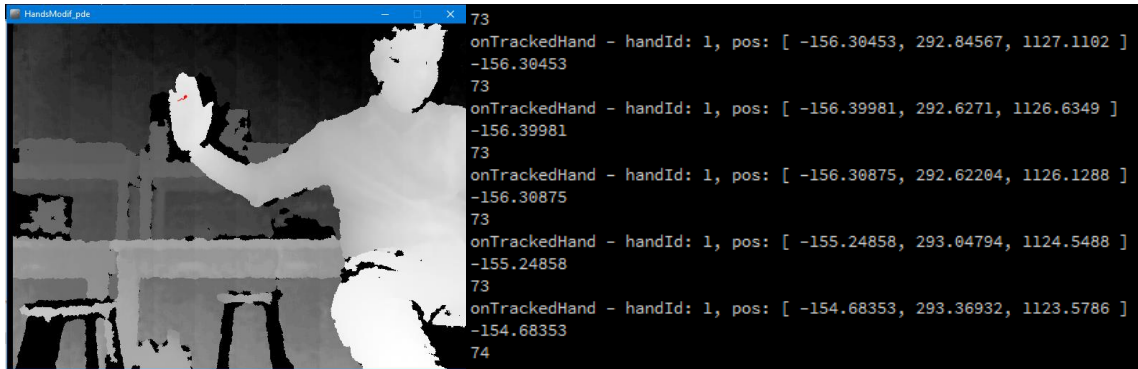
Al momento de presionar el botón “agregar” en esta ventana, automáticamente se incluye la palabra ingresada a la gramática del animatrónico, además de añadirla a otro archivo “.xml” en donde se guardan las palabras y respuestas nuevas. Este segundo archivo “.xml” es el encargado de darle la capacidad al animatrónico de poder responder en sonido lo que es esperado por el usuario. Al reconocer una de las palabras nuevas ingresadas, el programa se dirige al archivo “.xml”, busca la palabra, ubica la respuesta correspondiente y la almacena en la variable necesaria para ser reproducida. De esta manera se consiguió que el animatrónico, pasara de lograr reconocer únicamente las palabras establecidas en su gramática y responder con respuestas predeterminadas, a reconocer todas las palabras y frases que el usuario pueda imaginar y también responder de la manera que el usuario desee.

El último paso implementado en este módulo fue que el animatrónico fuera capaz de reconocer los gestos establecidos anteriormente, pero realizados por más de una persona al mismo tiempo. Debido a que el rastreo de esqueletos realizado por el Kinect puede ejecutarse tan solo para dos cuerpos al mismo tiempo como se mencionó en el marco teórico, se implementó el reconocimiento de gestos tan sólo para dos personas. En realidad, el reconocimiento de gestos para cada cuerpo se hace por separado y no al mismo tiempo, pero debido a la velocidad de procesamiento del Kinect y el programa se percibe como que se realizara el reconocimiento de gestos simultáneamente. Todos los resultados importantes de ambos reconocimientos se muestran en una interfaz gráfica sencilla tan solo para que el operador del animatrónico pueda conocer el estado de cada reconocimiento.

E. RESULTADOS

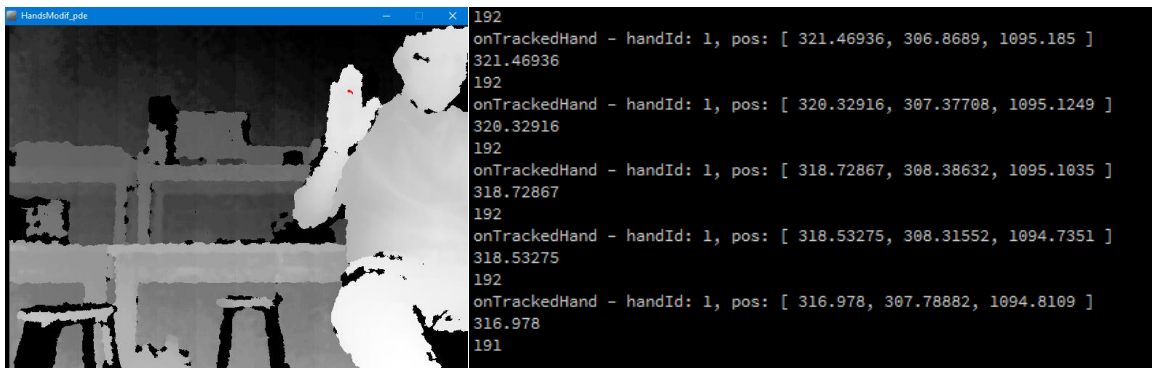
1. Primeras pruebas reconocimiento de gestos y audio

Figura 407. Reconocimiento de posición de mano (parte 1), enviando datos a reconocimiento de audio



(Rheiner,2012)

Figura 408. Reconocimiento de posición de mano (parte 2), enviando datos a reconocimiento de audio



(Rheiner,2012)

Figura 409. Pruebas de audio con micrófono omnidireccional unido a reconocimiento de gestos

```

In [6]: runfile('C:/Users/foncy_000/Desktop/SpeechRecognition/Gestos/HandsModif_pde/speech.py',
wdir='C:/Users/foncy_000/Desktop/SpeechRecognition/Gestos/HandsModif_pde')
Google Speech Recognition could not understand audio
buenas tardes
Buenas tardes bucanero
130
Google Speech Recognition could not understand audio
Buenos días
No se que decir al respecto
160
queso
No se que decir al respecto
155
Google Speech Recognition could not understand audio

```

Figura 410. Pruebas de audio con micrófono unidireccional unido a reconocimiento de gestos

```

In [1]: runfile('C:/Users/foncy_000/Desktop/SpeechRecognition/Gestos/HandsModif_pde/speech.py',
wdir='C:/Users/foncy_000/Desktop/SpeechRecognition/Gestos/HandsModif_pde')
Hola
Hola amigo, ¿como estas?
135
Google Speech Recognition could not understand audio
buenas tardes
Buenas tardes bucanero
135
Buenos días
No se que decir al respecto
170
Mi nombre es Luis
No se que decir al respecto
170
Google Speech Recognition could not understand audio
Mi nombre es Luis
No se que decir al respecto
183

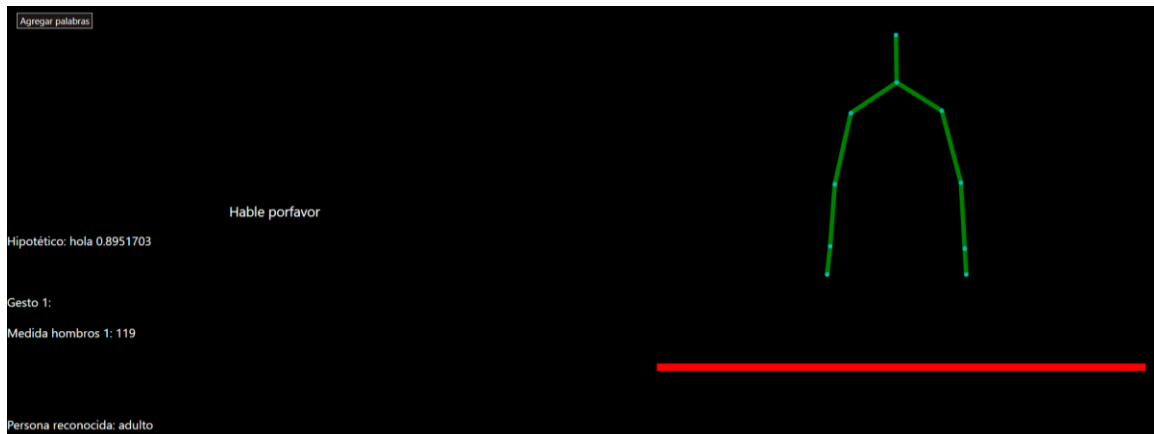
```

2. Reconocimiento de audio

Cuadro 102. Base de datos inicial palabras a reconocer

Palabra a reconocer	Respuesta
“hola”	“Hola, ¿cómo te llamas?”
“rojo”	“Haz dicho la palabra rojo”
“verde”	“Haz dicho la palabra verde”
“azul”	“Haz dicho la palabra azul”
“buenas tardes”	“Buenas tardes amigo”
“buenos días”	“Buenos días compañero”
“¿qué haces?”	“Platicando contigo”
“¿cuántos años tienes?”	Años y meses
“¿qué hora es?”	Hora exacta
“¿qué día es hoy?”	Día de la semana
“¿cuándo es tu cumpleaños?”	“El 1 de enero”
“¿cómo te llamas?”	“Mi nombre es Pepita”
“¿en dónde estás?”	“UVG, sede central”
“gracias, igualmente”	“¿Cómo estás?”
“bien gracias, ¿y tú?”	“Muy bien, gracias”
“mi nombre es pablo”	“Hola Pablo, es un gusto conocerte”
“mi nombre es luis”	“Hola Luis, es un gusto conocerte”
“mi nombre es jose”	“Hola Jose, es un gusto conocerte”

Figura 411. Reconocimiento “hola”



Cuadro 103. Pruebas reconocimiento de palabras en base de datos

Palabra a reconocer	Confiabilidad [%]
“hola”	99.20
“rojo”	98.97
“verde”	99.62
“azul”	97.58
“buenas tardes”	99.88
“buenos días”	99.73
“¿qué haces?”	9879
“¿cuántos años tienes?”	99.52
“¿qué hora es?”	99.81
“¿qué día es hoy?”	99.86
“¿cuándo es tu cumpleaños?”	99.67
“¿cómo te llamas?”	99.77
“¿en dónde estás?”	98.62
“gracias, igualmente”	99.46
“bien gracias, ¿y tú?”	99.81
“mi nombre es pablo”	99.02
“mi nombre es luis”	92.79
“mi nombre es jose”	99.94

Cuadro 104. Resumen pruebas de confiabilidad, reconocimiento de voz a diferentes distancias

No. prueba	Distancia: 1.2 metros Promedio confiabilidad [%]	Promedio confiabilidad, 2m [%]	Promedio confiabilidad, 3m [%]
1	75.50	69.40	71.10
2	82.50	59.50	80.20
3	95.90	73.20	50.00
4	73.00	67.20	56.10
5	92.50	84.30	72.40
6	88.80	72.50	64.00
7	85.50	52.50	61.50
8	85.00	83.50	88.50
9	91.40	37.00	0.00
10	96.50	81.90	94.90
11	74.10	73.70	65.50
PROMEDIO	85.50	68.60	64.00

3. Reconocimiento de gestos

Cuadro 105. Base de datos gestos a reconocer

Gesto a reconocer
Saludo con mano derecha
Saludo con mano izquierda
Levantar mano derecha
Levantar mano izquierda
Levantar ambas manos
Abrir los brazos
Cruzar los brazos

Figura 412. Reconocimiento gesto “saludo con mano derecha”



Figura 413. Reconocimiento gesto “saludo con mano izquierda”

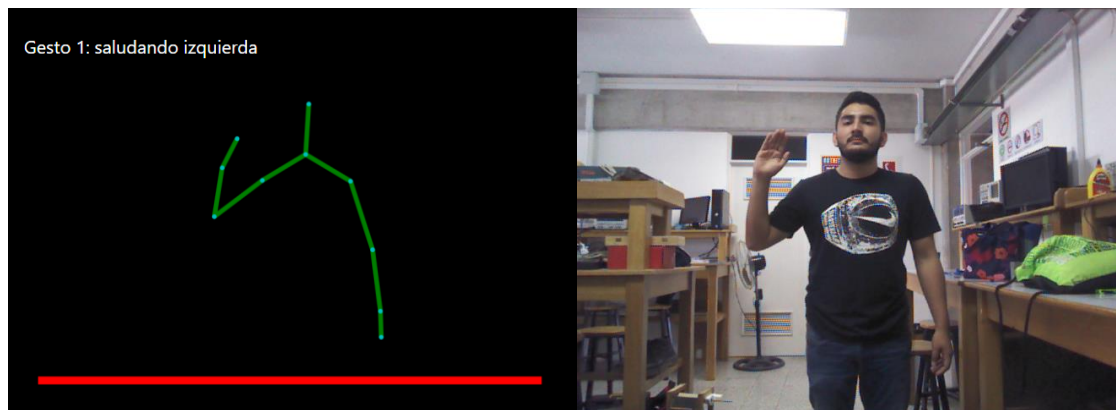


Figura 414. Reconocimiento gesto “levantar mano derecha”

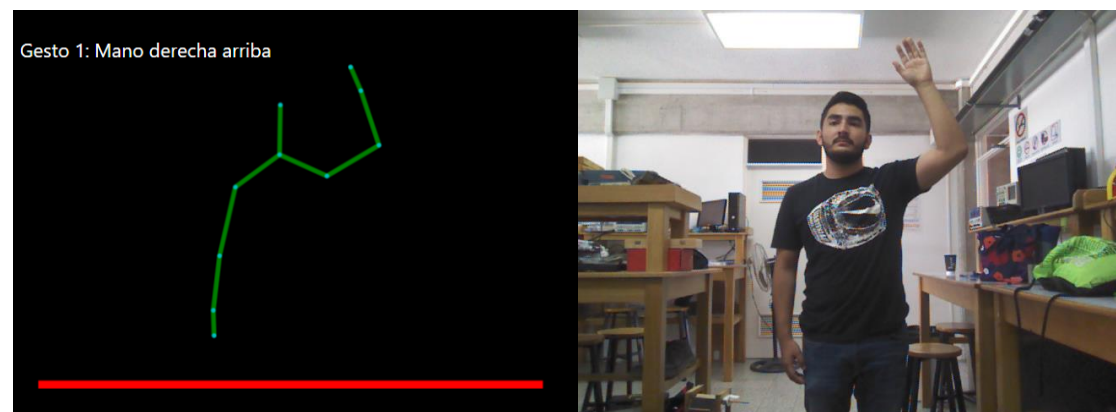


Figura 415. Reconocimiento gesto “levantar mano izquierda”



Figura 416. Reconocimiento gesto “levantar ambas manos”

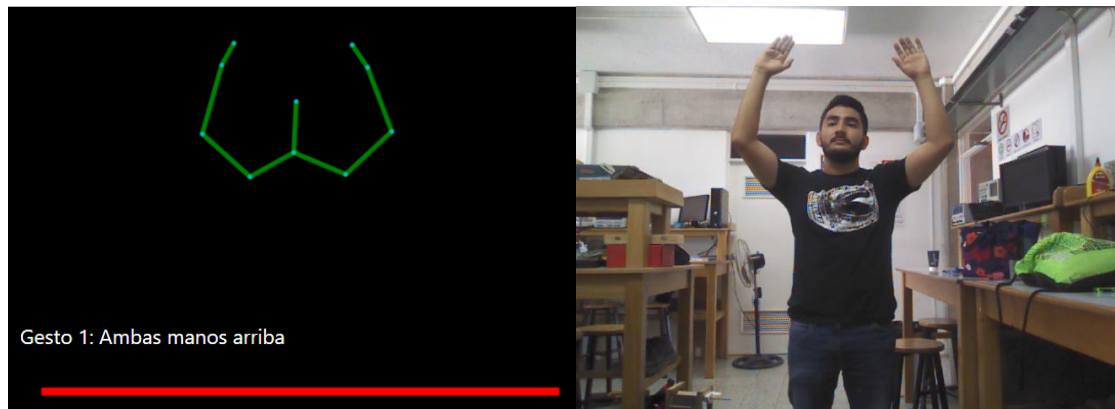


Figura 417. Reconocimiento gesto “abrir los brazos”

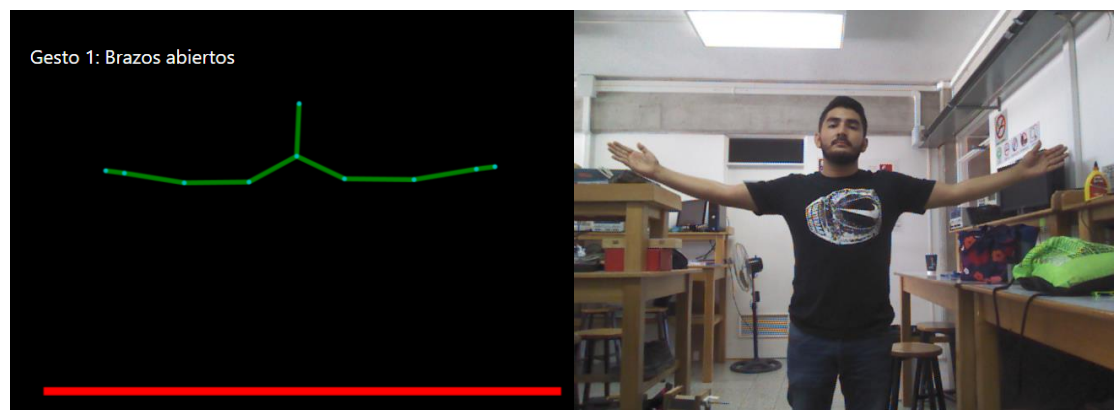


Figura 418. Reconocimiento gesto “cruzar los brazos”

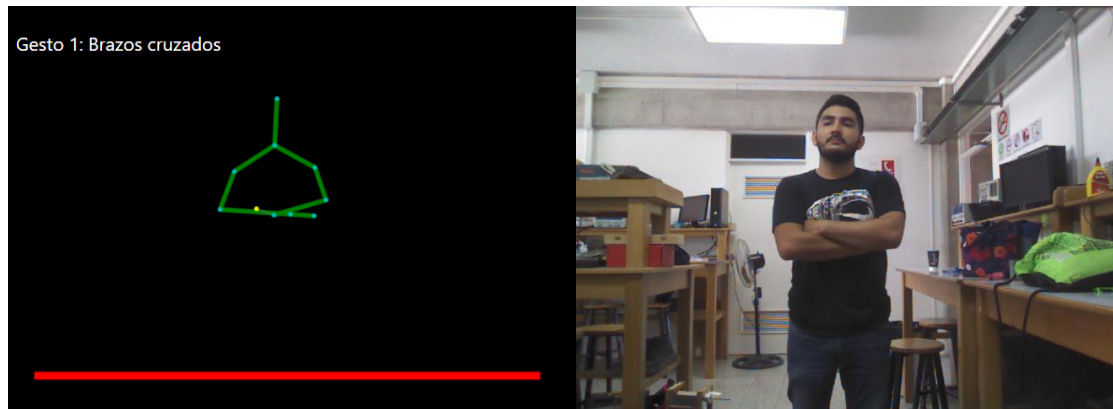
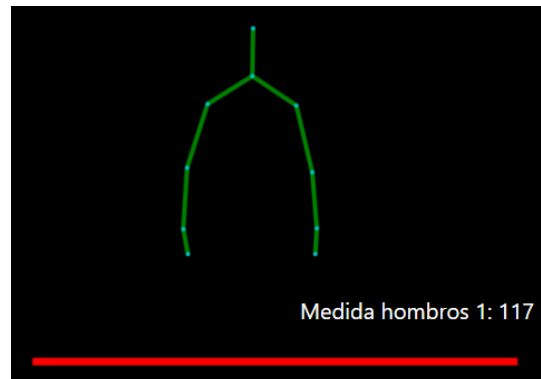


Figura 419. Reconocimiento de medida de distancia entre hombros de usuario



Cuadro 106. Resumen 1 pruebas de reconocimiento de gestos a diferentes distancias

No. Prueba	Distancia [m]	Saludo [%]	Cruzar brazos [%]	Mano der. Arriba [%]	Mano izq. Arriba [%]	Ambas manos arriba [%]	Abrir brazos [%]
1	1.2	80.0	70.0	100.0	100.0	100.0	100.0
	2	70.0	50.0	100.0	100.0	100.0	100.0
	3	90.0	90.0	100.0	100.0	100.0	100.0
2	1.2	90.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
	2	80.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
	3	80.0	30.0	100.0	100.0	100.0	100.0
3	1.2	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
	2	70.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
	3	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
4	1.2	80.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
	2	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
	3	100.0	40.0	100.0	100.0	100.0	100.0

Continuación cuadro 106

No. Prueba	Distancia [m]	Salud o [%]	Cruzar brazos [%]	Mano der. Arriba [%]	Mano izq. Arriba [%]	Ambas manos arriba [%]	Abrir brazos [%]
5	1.2	100.0	80.0	100.0	100.0	100.0	100.0
	2	80.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
	3	100.0	10.0	100.0	100.0	100.0	100.0
6	1.2	70.0	60.0	100.0	100.0	100.0	100.0
	2	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
	3	80.0	80.0	100.0	100.0	100.0	100.0
7	1.2	100.0	90.0	100.0	100.0	100.0	100.0
	2	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
	3	80.0	80.0	100.0	100.0	100.0	100.0
8	1.2	90.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
	2	90.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
	3	90.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
9	1.2	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
	2	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
	3	100.0	90.0	100.0	100.0	100.0	100.0
10	1.2	90.0	90.0	100.0	100.0	100.0	100.0
	2	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
	3	50.0	60.0	100.0	100.0	100.0	100.0
11	1.2	100.0	90.0	100.0	100.0	100.0	100.0
	2	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
	3	100.0	80.0	100.0	100.0	100.0	100.0

Cuadro 107. Resumen 2 pruebas de reconocimiento gestos a diferentes distancias

Distancia [m]	Promedio gestos reconocidos [%]
1.2	90.0
2	92.73
3	78.64

Figura 420. Prueba 1 reconocimiento de gestos con dos personas

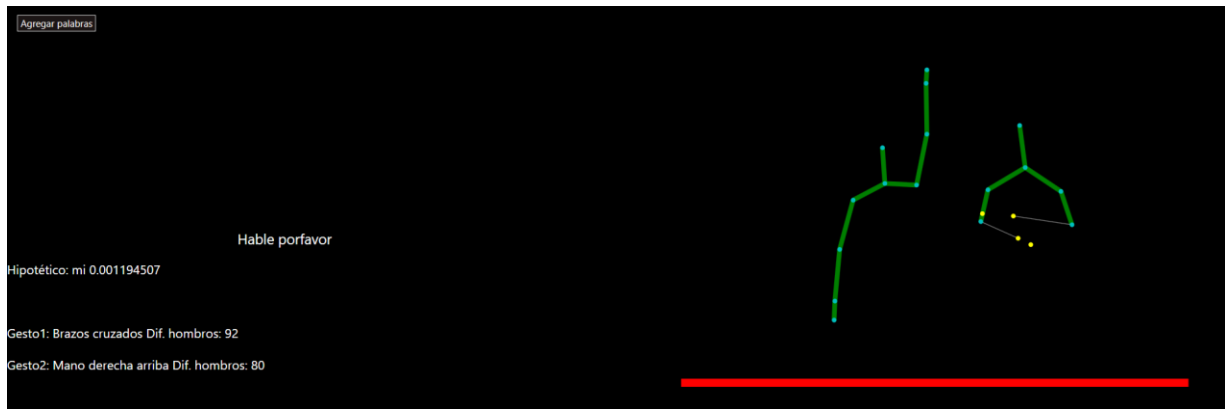


Figura 421. Prueba 2 reconocimiento de gestos con dos personas

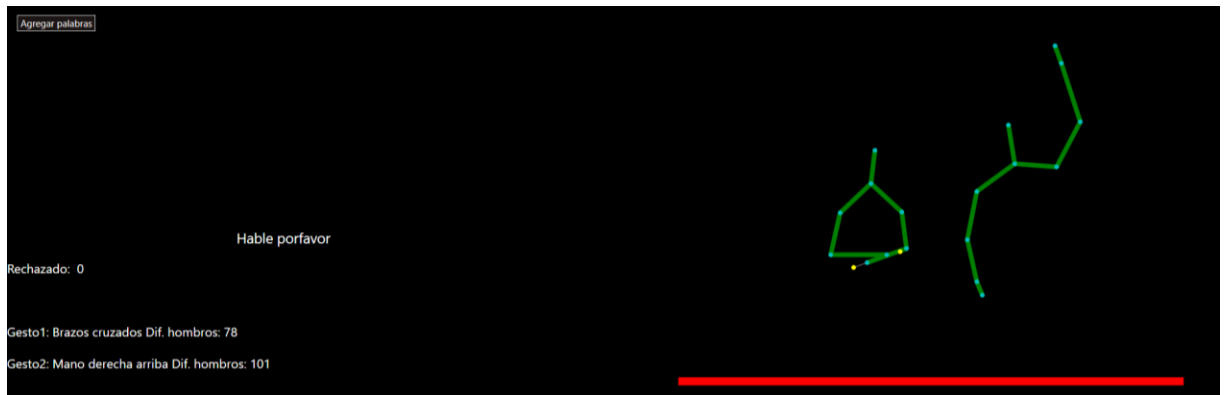
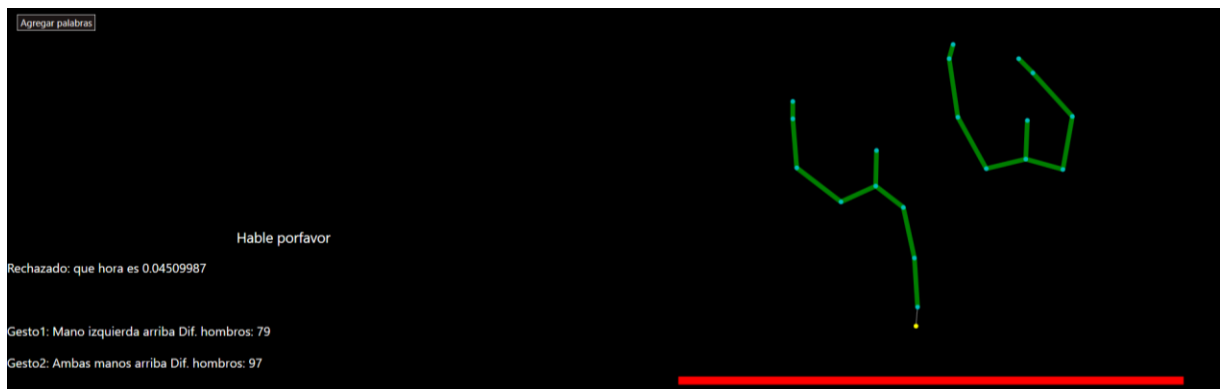


Figura 422. Prueba 3 reconocimiento de gestos con dos personas



Cuadro 108. Pruebas medidas entre hombros a 1.5 metros del sensor

Años	Medida [píxeles]	Medida [cm]
4	93	30
6	91	29
6	88	28
7	95	32
8	95	32
9	82	28
9	79	30
9	82	28
10	80	29
10	96	35
10	95	33
11	95	32
11	97	36
11	97	36
12	94	33
12	96	35
12	94	34
13	95	36
13	94	34
14	94	34
14	113	38
15	103	41
16	105	39
17	105	37
17	106	39
23	119	49
27	121	50
38	115	33
39	113	38
39	113	38
52	95	40
53	102	40

F. ANÁLISIS DE RESULTADOS

El objetivo general de este módulo fue implementar y desarrollar algoritmos de procesamiento de audio y video, para lograr una interacción natural, reconociendo ciertos gestos y palabras entre el usuario y el animatrónico. Se plantearon objetivos específicos con el fin de que cumpliendo cada uno de ellos se lograra alcanzar el objetivo general. El primer objetivo específico era definir una base de datos de palabras a reconocer, para que el animatrónico pueda interactuar en una pequeña conversación. Dicha base de datos se puede observar en el Cuadro 103 ubicado en la sección de resultados. En la misma se establecieron palabras y frases clave que el animatrónico debería de reconocer para poder tener una pequeña conversación con el usuario. Entre estas palabras y frases se incluyeron algunas preguntas comúnmente utilizadas en conversaciones, como “¿qué haces?” o “¿cómo te llamas?” y otras preguntas que una computadora puede contestar como “¿qué hora es?” o “¿qué fecha es?”, el globalmente conocido saludo “hola” entre otras que se creyeron de utilidad.

A pesar de que esta fue la base de datos inicial, se planteó e implementó una forma en que ésta pudiera ser expandida por cualquier persona en el futuro sin necesidad de tener conocimiento de programación.

El segundo objetivo específico planteado fue definir una base de datos de gestos a reconocer, para que el animatrónico pueda responder con gestos. La base de datos planteada para cumplir con este objetivo se presenta en el Cuadro 106 en la sección de resultados. Entre los gestos establecidos en la base de datos se pueden mencionar el comúnmente conocido como “saludo”, que implica agitar una de las manos de lado a lado y levantar alguna de las manos por encima de la cabeza, entre otros.

El tercer objetivo específico fue crear una red de sensores por medio de la cual se logren recopilar los datos necesarios para la interpretación del comportamiento del usuario. Para cumplir dicho objetivo se realizó una investigación acerca de los sensores conocidos en el mercado para la adquisición de datos, tanto para el reconocimiento de gestos como para el reconocimiento de voz.

El primer sensor en ser evaluado y descartado para el reconocimiento de gestos fue el ADPS-9960. Aunque este sensor es, hoy en día, utilizado por algunos “smartphones” para el reconocimiento de gestos, debido a sus características de reconocimiento no se adecuaba del todo al proyecto. Sus características de reconocimiento se enfocan o restringen a la interacción con un teléfono móvil, es capaz de reconocer gestos de tan sólo una mano a la vez, algunos gestos realizados con los ojos y la interacción de contacto físico con el mismo, entre otros. El segundo sensor en ser descartado fue el controlador Wii Remote por varias razones. A pesar de que sí es posible conectar este controlador a una computadora con el sistema operativo Windows, el principal problema es que el reconocimiento de gestos con el Wii Remote se reduce simplemente a la lectura de los sensores presentes en el controlador. Es decir, que los gestos reconocidos son basados en la posición, velocidad y movimientos del controlador. No existe la opción de tener una lectura continua de

ninguna otra parte del cuerpo, tan sólo de la mano con la que se esté tomando el controlador. Otro aspecto importante a mencionar es que, si el controlador se pierde, se pierde la posibilidad de lograr cualquier tipo de interacción con el sistema. Tan sólo con el análisis de estos aspectos, fue suficiente para percatarse que este sensor no se acoplaba del todo a las necesidades del proyecto.

Las cámaras RGB e IR en conjunto con el uso de procesamiento de imágenes son los sensores de reconocimiento de gestos que más se adecuaron a las necesidades del proyecto. La cámara RGB sería la encargada de capturar el panorama general del ambiente y la cámara IR la encargada de capturar datos (i.e. la posición en tres dimensiones) de los objetos específicos de interés, en este caso la persona a interactuar con el animatrónico. Como casi todos los productos en el mercado, en cámaras RGB e IR existe una amplia gama tanto de calidad como de precio. Debido a que el presente proyecto es tan sólo un prototipo de lo que puede llegar a ser un animatrónico altamente sofisticado, se decidió no invertir en cámaras de tan alta calidad y precisión. Más adelante se explicará qué solución fue la planteada para este proyecto.

El primer sensor a ser evaluado, para el reconocimiento de audio y voz, fue el micrófono omnidireccional. Por su característica principal de recepción de audio, que toma en cuenta todas las ondas sonoras recibidas desde cualquier ángulo, este micrófono es muy susceptible al ruido y a recibir e interpretar sonidos que no son de interés. Sin embargo, existen algunas técnicas para utilizar este tipo de micrófonos con una recepción de sonido aceptable, por ejemplo, el utilizar otro micrófono para efectuar cancelación de ruido. El segundo micrófono evaluado fue el bidireccional; debido a que tan sólo es de interés el sonido proveniente del frente del animatrónico, el micrófono bidireccional no es el más adecuado para la aplicación.

Otro micrófono evaluado para este caso fue el micrófono unidireccional. Debido a que este micrófono capta únicamente el sonido proveniente de una dirección en específico, es el idóneo para utilizar en casos en los que se quiera enfocar en recopilar datos en un lugar en específico. Sin embargo, como para esta aplicación es necesario captar y reconocer sonidos provenientes por todo el frente del animatrónico, se decidió que lo ideal era utilizar un arreglo de micrófonos y por medio de técnicas en software, procesar el audio, poder identificarlo y conseguir una buena confiabilidad. La confiabilidad del reconocimiento de audio depende mucho de la fidelidad de los micrófonos utilizados, pero, nuevamente, como este proyecto es solo un prototipo, se decidió no invertir en micrófonos de alto costo. Más adelante se explicará la solución planteada.

Además de evaluar y analizar las características de sensores dedicados, se tomaron en cuenta algunos más completos que ya traen integrados otros dispositivos para distintas aplicaciones. El primero en ser evaluado fue el PlayStation Move en combinación con el PlayStation Eye. Estos dos dispositivos trabajan en conjunto con la consola de videojuego PlayStation para darle seguimiento a algunos movimientos efectuados por el usuario que interactúa con dicha consola. Con ayuda del PlayStation Eye, esta opción cumple con los requisitos de reconocimiento de audio. Sin embargo, el más grande problema con este conjunto es la gran

dependencia del controlador. Todas las mediciones realizadas por la consola (posición en tres dimensiones del usuario, movimiento de mano, velocidad, etc.) son basadas en el tamaño y sensores integrados en el controlador. Aunque es una forma útil para la consola, en la aplicación de este proyecto, sería molesto para el usuario tener que utilizar un controlador y basar todos sus movimientos en este controlador para poder interactuar con el animatrónico. Además, igual que con el Wii Remote, si el control es extraviado o dañado, se pierde la posibilidad de cualquier interacción con el sistema.

Es por ello que se llegó a evaluar el último sensor para esta aplicación, el Kinect. El Kinect cuenta con una cámara RGB, un emisor IR, un receptor IR y un arreglo de micrófonos los cuales lo hacen la red de sensores idónea para este proyecto. Por medio de la cámara RGB y el emisor/receptor IR es posible hacer la recopilación de datos para hacer el análisis de reconocimiento de gestos de los usuarios y con ayuda del arreglo de cuatro micrófonos es posible hacer la recopilación de datos para el reconocimiento de audio y voz, además de poder implementar algunas técnicas de cancelación de eco y supresión de ruido debido al uso de varios micrófonos y no solo uno. Aunque se hubieran podido comprar cámaras de alta calidad y precisión y micrófonos con fidelidad muy grande, el costo para lograr armar esta red sería muy elevado. Además, la complejidad de lograr unir las funcionalidades de todos los sensores y poder manejar todos desde la misma unidad de control (i.e. computadora) hubiera sido mucho más complicado. El Kinect ofrece la ventaja de tener ya todos los sensores unidos en el mismo “paquete” y pueden ser manejados desde la misma plataforma (esto se ampliará más adelante).

Otro de los objetivos específicos planteados fue implementar y desarrollar un programa capaz de reconocer palabras dirigidas hacia el animatrónico. Para cumplir con dicho objetivo fue necesario investigar acerca de los distintos lenguajes de programación que se pueden utilizar para dicha aplicación, además que fueran compatibles con el sensor escogido anteriormente. El primer lenguaje de programación utilizado fue Python. En las figuras 421 y 422 se muestran los resultados obtenidos con dicho lenguaje de programación. El principal problema que se tuvo con este lenguaje fue que la librería utilizada necesitaba tener acceso a internet para funcionar, además que la velocidad de respuesta dependía totalmente de la velocidad de la conexión a internet utilizada. Sin embargo, este primer intento sirvió para hacer pruebas con distintos tipos de micrófonos, micrófonos omnidireccionales y unidireccionales. Se hicieron varias pruebas con la librería “SpeechRecognition” de Python, obteniendo resultados satisfactorios tanto en idioma inglés como en idioma español, estas primeras pruebas fueron realizadas con el micrófono integrado en una “laptop”. Durante estas pruebas se empezó a notar que el sistema era muy susceptible al ruido, el ruido en el ambiente causaba que el reconocimiento fuera erróneo. Por esta razón, se decidió empezar a modificar algunos parámetros de los mencionados anteriormente, como el “recognizer_instance.energy_threshold” para establecer un límite de niveles de energía a tomar en cuenta, y empezar a trabajar con un micrófono omnidireccional externo a la computadora.

Los resultados obtenidos con el micrófono omnidireccional se presentan en la Figura 421. Como se puede observar, de seis intentos realizados para que el programa lograra reconocer la voz, tres de ellos no fueron reconocidos y tres si lo fueron (50% de efectividad). Sin embargo, uno de estos tres intentos reconocidos no fue interpretado satisfactoriamente lo cual se traduce a un 33.33% de efectividad del total de pruebas realizadas. La combinación del micrófono unidireccional con algunos parámetros adecuados en la librería, como “recognizer_instance.energy_threshold” = 4000 y “recognizer_instance.pause_threshold = 0.8”, resultó en una mejor adquisición de datos. Los resultados obtenidos con el micrófono unidireccional se muestran en la Figura 422. Como se puede observar, de siete intentos realizados, tres de ellos no fueron reconocidos y cuatro si lo fueron (57% de efectividad). De los cuatro intentos reconocidos, los cuatro fueron interpretados satisfactoriamente, lo cual nos indica que tiene una mejor efectividad y confiabilidad que el micrófono omnidireccional.

El segundo lenguaje de programación utilizado para poder cumplir este cuarto objetivo específico fue C#, en el entorno de programación Visual Studio. Por medio de este lenguaje fue posible utilizar el arreglo de micrófonos disponible en el sensor Kinect. En la Figura 423 se presenta la captura de pantalla de la prueba realizada para el reconocimiento de la palabra “hola”. En el Cuadro 104 se presentan los resultados del reconocimiento de voz para cada una de las palabras o frases presentes en la base de datos inicial planteada anteriormente. El valor numérico presente al lado de cada una de las palabras reconocidas es el valor de confiabilidad de reconocimiento brindado por el reconocedor utilizado en el algoritmo. Para evaluar el desempeño del programa y determinar la distancia óptima de reconocimiento de voz se realizaron una serie de pruebas a once distintos sujetos con características de voz distintas. La prueba consistió en decir una frase en específico diez veces a 1.2, 2 y 3 metros de distancia del Kinect, se tomó nota de la confiabilidad dada por el programa en cada una de las corridas. Es importante mencionar que estas pruebas se realizaron bajo condiciones de laboratorio, es decir, que se realizaron en un cuarto cerrado sin mayor cantidad de ruido ambiental, y el sensor Kinect a 1.05 metros del suelo. Se utilizaron estas distancias debido a que el rango recomendado para el uso del Kinect en modo predeterminado es entre 1.2 a 3.5 metros. El desglose completo de los resultados de estas pruebas se encuentra en la sección de anexos. Además, los resultados de estas pruebas, en conjunto con las pruebas de reconocimiento de gestos, ayudarían a determinar la distancia óptima o recomendada para la interacción con el animatrónico.

En el Cuadro 105 se presenta el resumen de los resultados de estas pruebas. Se puede observar que el mejor promedio de confiabilidad conseguido fue a 1.2 metros de distancia del sensor Kinect, la distancia más cercana utilizada en estas pruebas. También se puede observar que con forme la distancia entre el usuario y el Kinect se hace más grande, el promedio de confiabilidad se hace más pequeño. El comportamiento observado en estos datos resulta lo esperado debido a que mientras el usuario se encuentra más lejos, las ondas de voz llegan cada vez más débiles a los micrófonos del Kinect, lo cual resulta en una interpretación errónea o bien una interpretación con poco porcentaje de confiabilidad. En lo que respecta al reconocimiento

de voz, se puede decir que mientras el usuario esté más cerca del Kinect resulta en una mejor captura e interpretación de datos. Sin embargo, este no es el único parámetro a tomar en cuenta para indicar una distancia recomendada para la interacción con el animatrónico. Más adelante se analizarán los resultados de las pruebas realizadas con el reconocimiento de gestos.

Otro de los objetivos específicos a alcanzar era implementar y desarrollar un programa de reconocimiento de gestos efectuados por el usuario para lograr que el animatrónico reaccione adecuadamente a los mismos. Para cumplir con dicho objetivo fue necesario investigar acerca de los distintos lenguajes de programación que se pueden utilizar para dicha aplicación, además que fueran compatibles con el sensor escogido anteriormente. Las primeras pruebas realizadas para este reconocimiento se presentan en las figuras 419 y 420, realizadas con ayuda del lenguaje de programación Processing. En estas pruebas se hacía el reconocimiento del gesto “saludo” realizado por el usuario y se efectuaba un rastreo continuo de la mano con la que se hizo el gesto. Por medio de este rastreo fue posible determinar la posición en tres dimensiones de esta misma mano, para empezar a tener datos específicos de los gestos. Se decidió imprimir en consola la posición en “X” de la mano. Como era de interés que este reconocimiento tuviera una comunicación fluida con el reconocimiento de voz se decidió implementar esta comunicación de una forma sencilla pero efectiva. Se implementó una comunicación vía archivo de texto. En esta solución el programa de reconocimiento de gestos escribía la posición en “X” de la mano en un archivo, mientras que el programa de reconocimiento de audio (en ese momento Python) leía el dato y lo imprimía en su consola junto a la palabra o frase reconocida. Este proceso se puede ver plasmado en las figuras 419, 420, 421, 422.

Debido a problemas con el reconocimiento de audio se decidió migrar al lenguaje de programación C# en el entorno Visual Studio y se logró implementar ambos reconocimientos en este mismo lenguaje. En las figuras de la 424 a la 430 se muestran los resultados del reconocimiento de cada uno de los gestos planteados en la base de datos junto a una imagen real del gesto realizado por el usuario y la interpretación del programa. Es importante mencionar que todas las imágenes de resultados de reconocimiento de gestos están reflejadas, es decir, que se ven como vistas en un espejo. Para evaluar el desempeño del programa y determinar la distancia óptima de reconocimiento de gestos se realizaron una serie de pruebas a once distintos sujetos. La prueba consistió en realizar cada uno de los gestos planteados en la base de datos diez veces a 1.2, 2 y 3 metros de distancia del Kinect, se tomó nota de cuántas veces fue reconocido cada uno de los gestos para reconocer la distancia ideal para el reconocimiento de los mismos. El desglose completo de los resultados de estas pruebas se encuentra en la sección de anexos. El resumen de los porcentajes de efectividad de estas pruebas se presenta en los cuadros 107 y 108. En el Cuadro 108 se puede observar que el mejor porcentaje de efectividad (92.73%) se consiguió a una distancia de 2 metros del sensor, sin embargo, el porcentaje conseguido a 1.2 metros no está muy lejano a este (90.0%). Por lo que se puede decir que el rango de distancia con la que se consigue un mejor reconocimiento de gestos está entre 1.2 y 2 metros. En base a estos resultados y los conseguidos con las pruebas de reconocimiento de voz, se encontró que el rango de distancias óptimo

para el buen rendimiento de los dos reconocimientos es de 1.2 a 2 metros. Tomando en cuenta que el reconocimiento de audio trabaja mejor a menores distancias, se recomienda trabajar a una distancia aproximada de 1.5 metros.

Además de reconocer gestos realizados por una persona a la vez, se logró que el programa de reconocimiento de gestos lograr capturar y analizar los datos de dos usuarios en pantalla a la vez. Es decir, el programa es capaz de reconocer que el usuario 1 está saludando con la mano derecha mientras que el usuario 2 está cruzado de brazos, o cualquier combinación de los gestos planteados en la base de datos. Los resultados de estas pruebas se muestran en las figuras 432, 433 y 434. Se puede observar que el reconocimiento de gestos de cada usuario es totalmente independiente. Es importante mencionar que, para un reconocimiento de gestos adecuado, la imagen de las personas no debe entrelazarse, es decir, no deben estar en contacto ni estar uno adelante del otro (ninguna parte del cuerpo debe estar frente al otro usuario).

El sexto objetivo específico a alcanzar fue implementar y desarrollar un algoritmo que mida el tamaño del torso del usuario para identificar si es un niño o una persona adulta. Este objetivo fue alcanzado junto con el objetivo anterior de lograr el reconocimiento de gestos de un usuario por medio del mismo algoritmo de rastreo de esqueleto implementado en C# con ayuda del uso del Kinect. La medida que puede interpretar el programa es la cantidad de píxeles que hay entre la posición de los hombros del usuario en la representación de este en el programa. Para hacer pruebas con este algoritmo se tomaron a distintas personas de diferentes edades, se posicionaron a 1.5 metros (la distancia recomendada anteriormente) del Kinect y se tomó nota de la medida mencionada en una posición relajada por parte del usuario, como se muestra en la Figura 431. Los resultados se muestran en el Cuadro 109. Tomando a personas menores de 15 años como “niños” y a personas mayores o con esa edad como “adultos”, y en base a las medidas tomadas en las pruebas, se puede decir que aquellos usuarios que tengan una medida menor a 100 píxeles serán considerados “niños” y aquellos que tengan una medida mayor a 100 píxeles serán considerados “adultos” por el animatrónico.

El último objetivo específico planteado fue implementar un sistema de respuesta sonoro por medio del cual el animatrónico pueda responder al usuario. Para lograr dicho objetivo se utilizó un sintetizador de audio, en específico: “System.Speech.Synthesis”, por medio del cual se accede a las bocinas de la computadora en uso, o bien bocinas conectadas a la misma, y se reproduce la respuesta deseada al usuario.

X. MÓDULO DE POTENCIA E INTERACCIÓN HUMANA

A. RESUMEN

El trabajo a realizar en el megaproyecto de *animatronics* consiste en diseñar el módulo de potencia e integración de los demás módulos que conforman al mismo. Este módulo, consiste en un sistema de alimentación para todos los motores servos, sensores y microcontroladores a utilizar en el animatrónico, así como el aislamiento eléctrico entre las señales de control y alimentación. Esto con la finalidad de mantener un sistema libre de ruido eléctrico que pueda ser introducido por este módulo de potencia a los sensores a utilizar y a las señales de control a enviar a los actuadores.

Como parte de este módulo, no solo se deben unificar los módulos de reconocimiento de audio y gestos, con los módulos de brazos y torso del animatrónico, sino también, se debe diseñar el comportamiento del mismo. Esto con la finalidad de tener rutinas específicas para cada estímulo externo que el animatrónico reciba. Cuando reciba un determinado estímulo, ya sea un gesto, palabras u oración, este sistema debe percibirlos y, de manera simultánea, debe responder con un conjunto de rutinas, produciendo una respuesta lo más humana posible.

B. INTRODUCCIÓN

El presente megaproyecto consiste en el diseño y construcción de un animatrónico humanoide con movimiento en hombros, codos, muñecas, dedos y torso, que además cuenta con un sistema de reconocimiento de palabras, frases y gestos. El objetivo del megaproyecto es desarrollar un prototipo para asentar las bases de un animatrónico a ser fabricado para el parque temático Xetulul en Retalhuleu, Guatemala.

Los objetivos generales de este módulo consistieron en diseñar e implementar un módulo de potencia capaz de satisfacer las necesidades de voltaje y corriente de cada uno de los componentes y motores utilizados en el animatrónico, así como realizar la integración de los demás módulos de este megaproyecto de tal modo que se pudiera asegurar su correcto funcionamiento.

Para el diseño e implementación del módulo de potencia se optó por adquirir dos fuentes de alimentación capaces de proveer 12 voltios y 30 amperios de corriente, la elección del tipo y número de fuentes se basó principalmente en la demanda máxima de corriente de los motores integrados en el animatrónico. Como parte del módulo de potencia, se necesitó también de reguladores de voltaje para alimentar a los componentes y motores que requerían de un voltaje de alimentación menor al proveído por las fuentes de alimentación principales.

Se diseñó e implementó un módulo de aislamiento eléctrico para proteger de ruido eléctrico a las señales de control enviadas a todos los motores del animatrónico. El asegurar un ambiente libre de ruido eléctrico para las señales de control garantizó que cada uno de los motores se moviera al ángulo que fuera requerido.

Por último, se diseñaron e implementaron algoritmos dedicados a la integración de todos los módulos de este megaproyecto utilizando la herramienta de software Matlab y la plataforma Arduino Mega 2560. Se programó un algoritmo en Matlab para monitorear constantemente las instrucciones que irían a ser recibidas desde el módulo de reconocimiento de gestos y audio, interpretarlas y enviar nuevas instrucciones a la plataforma Arduino, la cual contenía algoritmos capaces de mover los motores del animatrónico simultáneamente contribuyendo a la naturalidad de los movimientos del mismo.

C. OBJETIVOS

1. Generales

- Realizar un módulo de potencia que sea capaz de satisfacer las necesidades de cada actuador y controladores que utilizará el animatrónico
- Unificar el módulo de reconocimiento de audio y gestos con los módulos encargados de los brazos y torso del animatrónico, haciendo uso de una unidad central para diseñar y programar el comportamiento del animatrónico.

2. Específicos

- Diseñar e implementar el módulo de potencia para los actuadores del animatrónico
- Diseñar e implementar los circuitos a utilizar para el aislamiento eléctrico entre las señales de control y potencia.
- Investigar sobre el comportamiento humano y cómo este responde a ciertos estímulos o palabras.
- Realizar un programa que sea capaz de controlar 12 motores servo simultáneamente.
- Diseñar y programar las rutinas que realizarán los movimientos de brazos y torso.
- Realizar el programa necesario que se encargue de recibir los datos del módulo de reconocimiento de gestos y audio, para interpretarlos y ejecutar la rutina correspondiente.
- Lograr que las rutinas de movimientos de brazos y torso se realicen simultáneamente y de manera fluida para contribuir en la naturalidad de los movimientos del animatrónico.

D. DISEÑO EXPERIMENTAL

Para la integración de los módulos de este megaproyecto y el desarrollo de los algoritmos que estarán encargados de esto es necesario hacer uso de una herramienta de software capaz de leer archivos en vivo,

interpretar y enviar instrucciones a una plataforma que funcionará como unidad central, la cual se encargará de llevar a cabo las respuestas de movimiento que el animatrónico tendrá.

Se deben de analizar las necesidades de potencia que cada uno de los dispositivos, componentes y actuadores tendrán, de manera que se construya o adquiera una fuente de alimentación capaz de suplir a cada uno de ellos para que operen de manera óptima. Además, tomando en cuenta que no todos los componentes a utilizar manejarán un mismo voltaje de alimentación, es de vital importancia realizar el análisis y elección de reguladores de voltaje capaces de convertir el voltaje de la fuente de alimentación principal, al voltaje deseado, con capacidad de proveer la corriente necesaria.

Debido a que se trabajarán con señales de control y voltajes de alimentación, es de suma importancia realizar el aislamiento eléctrico de cada una de las señales. Para esto se debe de investigar y analizar sobre las distintas opciones que existen de optoacopladores en el mercado, para así encontrar aquellos que mejor se acoplen a las señales de control a utilizar.

Teniendo todas las herramientas necesarias para la elaboración del proyecto se debe de trabajar en el desarrollo de los programas que integrarán los módulos y harán posible el movimiento sincronizado y ordenado de todos los motores del animatrónico. Las pruebas serán realizadas con los componentes de regulación y aislamiento montados en protoboard, para luego pasar al diseño de las placas de circuito impreso.

Por último, habiendo logrado todo lo anteriormente descrito, se deben de crear las rutinas de movimiento, rutinas que serán las respuestas a los gestos, palabras o conjunto de palabras que el animatrónico reciba y que este módulo interprete a partir de los datos recibidos por el módulo de reconocimiento de gestos y audio.

E. RESULTADOS

1. Selección de plataformas. La elección de la unidad central a utilizar para el desarrollo del proyecto se basó en los alcances del proyecto, así como el desempeño que la plataforma pudiera dar. En este caso, la plataforma de desarrollo sería la encargada de mantener todos los actuadores usados en el proyecto sincronizados y moviéndose a donde se les requiere en el momento deseado. Por ello, se deseaba que la plataforma de desarrollo a utilizar contara con suficientes puertos de entrada y salida, analógicos y digitales, de tal manera que fuera posible realizar el control de todos los actuadores.

Tomando las necesidades previamente descritas, se decidió utilizar una plataforma Arduino debido a la buena integración que tiene con otros sistemas, su velocidad de procesamiento, memoria, conectividad y número de pines I/O. Para decidir qué sistema Arduino se utilizaría entre la variedad que existe se refirió a

un cuadro comparativo realizado por la empresa Adafruit, el cual se dedica al desarrollo, aprendizaje y venta de recursos para proyectos electrónicos. El cuadro comparativo se encuentra en la sección de anexos.

El cuadro compara la velocidad de procesador, voltaje de funcionamiento, almacenamiento flash, SRAM, número de pines digitales, analógicos, PWM y puertos seriales. El Arduino Mega 2560 y Arduino Due fueron los candidatos más apropiados para el desarrollo de este proyecto debido a sus características. Las diferencias significativas entre estos dos Arduino son la velocidad de procesamiento y almacenamiento flash. El Arduino Due cuenta con un procesador de 84MHz, y una memoria flash de 512Kb, mientras que el Arduino Mega 2560 cuenta con un procesador de 16MHz y una memoria flash de 256Kb.

Se decidió utilizar el Arduino Mega 2560 sobre el Due, debido a que el segundo tiene un precio más elevado y la diferencia en procesador y memoria no se traducirían en una diferencia en desempeño del proyecto. Además el Arduino Mega 2560 cuenta con una mejor compatibilidad, mientras que el Arduino Due sufre de diferencias de voltajes entre sus pines y no tan buena compatibilidad.

Debido a que era necesario recibir información desde otro módulo, interpretarla y tomar decisiones con respecto a esta, fue necesario determinar qué herramienta de software se utilizaría junto a Arduino para realizar esto. La herramienta de software utilizada fue Matlab, la elección tomó en cuenta su buena integración con los sistemas Arduino, su capacidad de manejo de matrices y confiabilidad.

2. Configuración de la plataforma. Arduino es una plataforma de desarrollo de bajo costo que cuenta con el soporte de una gran comunidad de desarrolladores sin fines de lucro dedicados a proveer recursos de aprendizaje y promover el diseño y uso de hardware y software de distribución libre para realizar proyectos de computación embebidos.

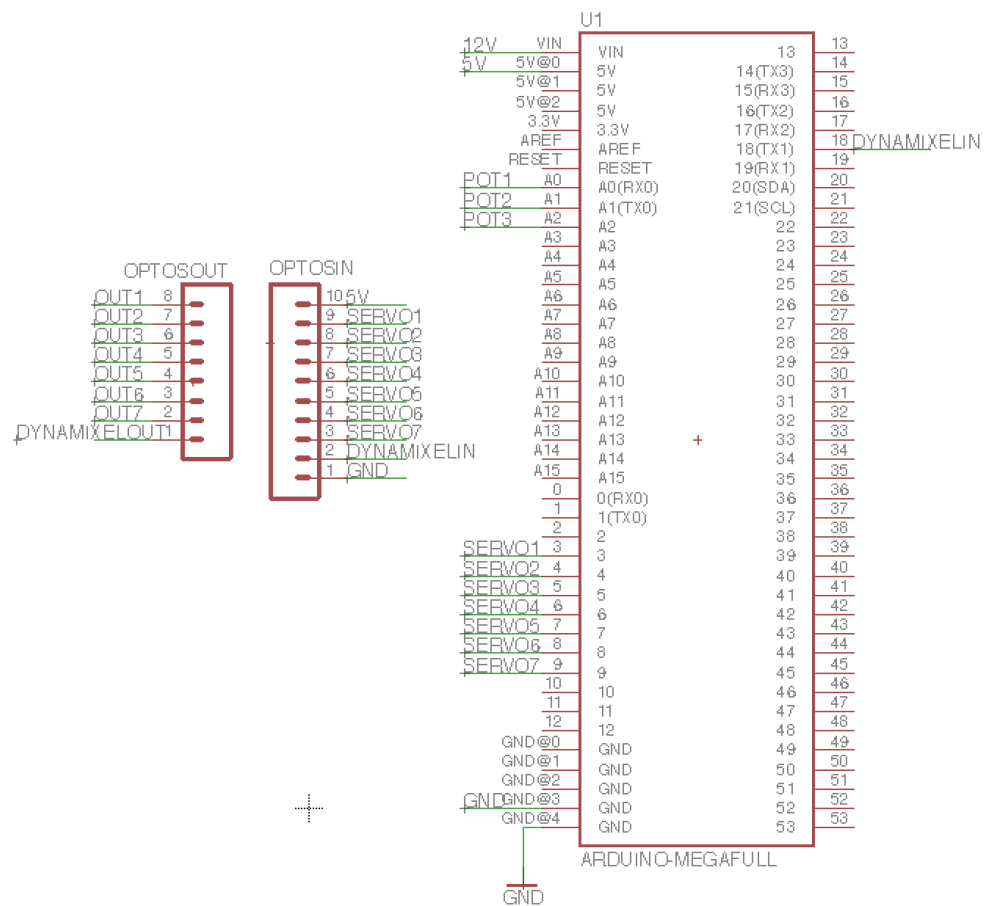
La configuración del Arduino Mega se basó en los requerimientos de este módulo y otros módulos del megaproyecto. Se requería el poder controlar servo motores comunes, a los cuales se les envía una señal PWM para ponerlos en movimiento, y servos más especializados como lo son los Dynamixel MX-106T a los que se les envía instrucciones por medio de un enlace serial. Arduino cuenta con librerías integradas para controlar la señal de un PWM, por lo que no se necesitó de nada más que eso para poder controlar los servos comunes. Para lograr controlar los motores Dynamixel se utilizó la librería *Dynamixel for Arduino* desarrollada por Austin Palmer y mejorada por Josué Savage.

Las librerías para comunicación serial se encuentran también integradas dentro del paquete Arduino, por lo que no se tuvo que realizar ningún procedimiento para poder hacer uso de estas. Para utilizar la librería *Arduino for Dynamixel*, esta se descargó y colocó en la carpeta *libraries* de Arduino. Con esto fue posible utilizar todos los comandos que esta librería ofrece.

Se utilizaron tres puertos analógicos para recibir las señales de voltaje provenientes de los potenciómetros en los ejes de los hombros y torso, 7 puertos digitales para enviar las señales de control a los motores MG996R y un puerto serial UART para enviar las señales de control a los motores Dynamixel. Se utilizó una de las salidas de 5V que el controlador tiene para alimentar a todos los componentes que conforman el módulo de aislamiento eléctrico de este proyecto. Por esta misma razón se decidió utilizar una fuente externa para alimentar el controlador, pues de este modo era posible asegurar suficiente voltaje en el regulador interno del Arduino y obtener los 5V necesarios para la alimentación de todos los componentes.

En la Figura 423 se puede observar cómo fue conectado el controlador al módulo de optoacopladores.

Figura 423. Configuración física del Arduino Mega



3. Configuración de motores Dynamixel. Los motores Dynamixel usados en este proyecto se encontraban configurados con *baud rate* y número de identificación (ID) desconocido al inicio del uso de estos. También se encontraban algunos configurados como maestro y otros como esclavo, situación que dificultó al principio el poder establecer una comunicación con los motores.

Para poder comunicarse o configurar los motores es necesario saber el tasa de transmisión de datos y el número de identificación al que se encuentran configurados. Al no tener idea de cuál era el baud rate de los motores se procedió a realizar pruebas con los valores más utilizados en comunicaciones seriales de este tipo. La manera de saber si existía respuesta alguna del motor fue observando el LED integrado en el motor, si este se encendía y parpadeaba un par de veces, significaba que se había logrado establecer conexión. El *baud rate* al que los motores estaban configurados era 115200.

Habiendo establecido comunicación con los motores era posible realizarles un reseteo completo para que regresaran a su configuración de fábrica. Este reseteo cambia el *baud rate* a 57600, por lo que la comunicación con los motores se pierde. Puesto que no se conocía el número de identificación de los motores, el reseteo y configuración se realizó un motor a la vez. Para cambiar el número de identificación fue necesario enviar un mensaje *broadcast* para comunicarse con todos los números de identificación posibles y luego cambiar todos a el número deseado. Ya que solo un motor se encontraba conectado a la vez, el mensaje *broadcast* solo afectaba al mismo, pero recorría todos los posibles números de identificación hasta encontrar el perteneciente al motor conectado. Por último se restableció el *baud rate* a 115200 pues se consideró una buena velocidad de transferencia de datos para la aplicación deseada.

4. **Selección de componentes.** Para el diseño e implementación del módulo de potencia y aislamiento eléctrico de este proyecto se tomaron en cuenta y analizaron varias posibilidades. Primero se consideró el diseñar y construir desde cero las fuentes de alimentación principal, estas se encargarían de alimentar todos los componentes que controlan y mueven el animatrónico. Al reflexionar a cerca de esto se llegó a la conclusión de no diseñar y construir la fuente, en cambio se tomó la decisión de adquirir fuentes de alimentación ya construidas. Esto significó menos gastos en el proyecto, así como el poder centrarse en tareas más vitales del cronograma a seguir. Se adquirieron dos fuentes eTopxizu de 12V, 30A. La decisión fue basada en las necesidades de los 12 motores y componentes del proyecto. Cada motor Dynamixel puede consumir hasta 6A de corriente, y cada uno de los MG996R puede consumir hasta 2.5A. La carga total de los motores fue dividida entre las dos fuentes de la manera más equilibrada posible, por lo que en la primera fuente se conectaron 4 MX-106T, mientras que en la segunda fuente se conectaron los 7 MG996R y 1 MX-106T.

Para la elección de los reguladores de voltaje que pasarían los 12V proporcionados por la fuente de alimentación principal a 5V, el cual es el voltaje óptimo para los motores MG996R, se tomaron en cuenta dos modelos: El LM7805 y el LM317. El primero es un regulador de voltaje fijo, el segundo es un regulador de voltaje variable. Analizando los pros y contras de ambos se llegó a la decisión de utilizar el LM7805, ya que para utilizarlo no es necesario de componentes extras, mientras que con el LM317 se necesita de componentes extra para fijar el voltaje de salida a un valor deseado.

En el caso de los optoacopladores a utilizar para el aislamiento eléctrico de las señales de control, se decidió en un inicio utilizar solamente optoacopladores de propósito general. Al realizar pruebas con un optoacoplador 4N25 las señales de control enviadas a los servos MG996R eran retransmitidas exitosamente, en las figuras 424 y 425 se pueden observar la señal en la entrada y salida del optoacopladores.

Figura 424. Señal de control original para servos comunes



Figura 425. Señal de control aislada para servos comunes



Se puede apreciar en la Figura 426 que la señal de salida del optoacoplador cuenta con un tiempo de caída mucho más pronunciado que la señal de entrada. Este es un comportamiento habitual de los optoacopladores y no afectó en lo absoluto el buen funcionamiento de los motores.

En el caso de las señales enviadas a los motores Dynamixel, no fue posible obtener resultado alguno usando el integrado 4N25. Se determinó revisando la hoja de datos del componente que la velocidad de

transmisión de la señal de control de los motores Dynamixel era demasiado alta, por lo que el 4N25 no lograba responder a esta velocidad tan alta.

Investigando en proyectos con aplicaciones similares se encontró el optoacoplador 6N137, el cual tiene un rango de operación de hasta 10 Mbit/s. Al realizar pruebas con este optoacoplador se pudo observar que en su salida la señal se encontraba negada (Figura 426), así que fue implementado un negador con un transistor NPN 2N3904 y dos resistencias para regresar la señal a su estado original. Habiendo realizado esto la señal de control para los motores Dynamixel estaba ya completamente eléctricamente aislada (Figura 428).

Figura 426. Señal de control original para motores Dynamixel



Figura 427. Señal en la salida del 6N137

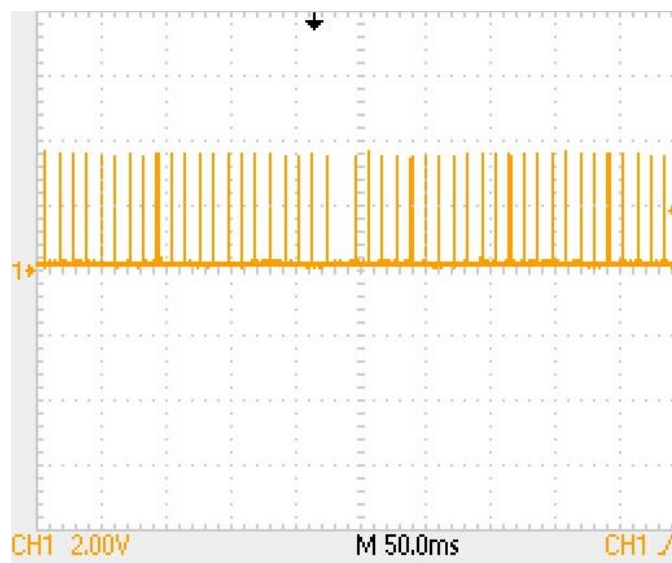


Figura 428. Señal de control completamente aislada



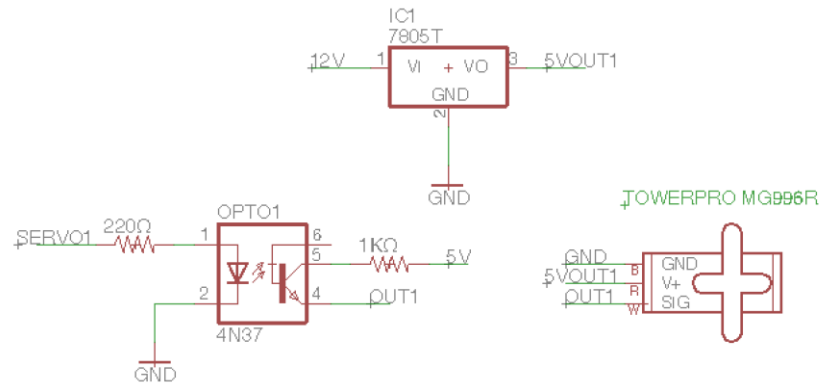
5. Diseño de circuitos de aislamiento eléctrico. El diseño de los circuitos de aislamiento eléctrico se realizó tomando en cuenta distintos factores. Para usar el optoacoplador 4N25, es necesario conectar una resistencia en el ánodo del LED de entrada y otra en el colector del transistor de salida, de modo de poder limitar la corriente de entrada en cada una de estas terminales. Para saber cuál era la corriente máxima que el LED y el colector del transistor dentro del optoacoplador soportaban se refirió a la hoja de datos del fabricante. La corriente máxima del colector es de 50 mA y del LED es 60 mA. Se calculó entonces de la siguiente forma qué resistencias se debían de usar para mantenerse dentro del rango de operación aceptable, esto tomando en cuenta que el voltaje utilizado era de 5V.

$$R_{\text{Colector}} = \frac{5V}{50 \text{ mA}} = 100 \Omega$$

$$R_{\text{LED}} = \frac{5V}{60 \text{ mA}} = 83.33 \Omega$$

Se decidió usar valores más altos de resistencia que los calculados anteriormente, para no trabajar en los límites máximos y asegurar un buen funcionamiento. La resistencia del colector usada fue de 1 k Ω y la resistencia del LED fue de 220 Ω , para mantener una corriente de 5 mA y 22.72 mA en cada terminal. El esquemático del circuito diseñado puede observarse en la Figura 429.

Figura 429. Circuito de aislamiento para señales de control del MG996R

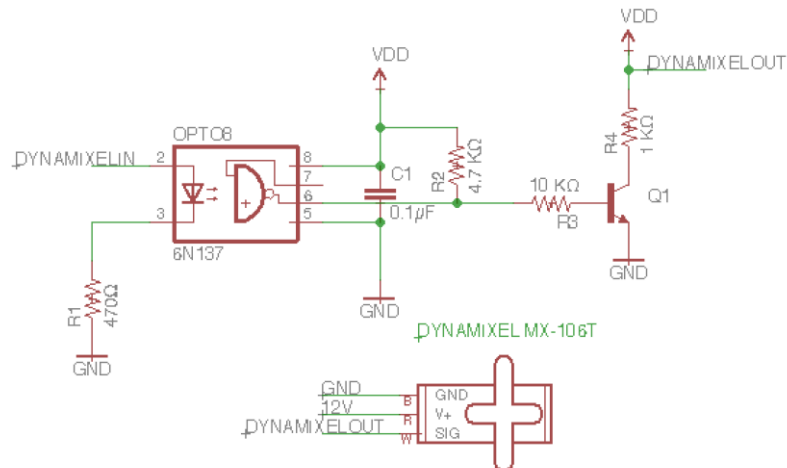


En el caso del circuito usado para aislar las señales de control de los motores Dynamixel, se realizó un procedimiento similar al descrito previamente. Analizando la hoja de datos del fabricante se descubrió que la corriente máxima soportada por el LED interno del optoacoplador es de 20 mA, además el fabricante recomienda un rango de valores de resistencia para realizar un *pull up* a la salida del optoacoplador.

$$R_{LED} = \frac{5V}{20mA} = 250\Omega \quad (3)$$

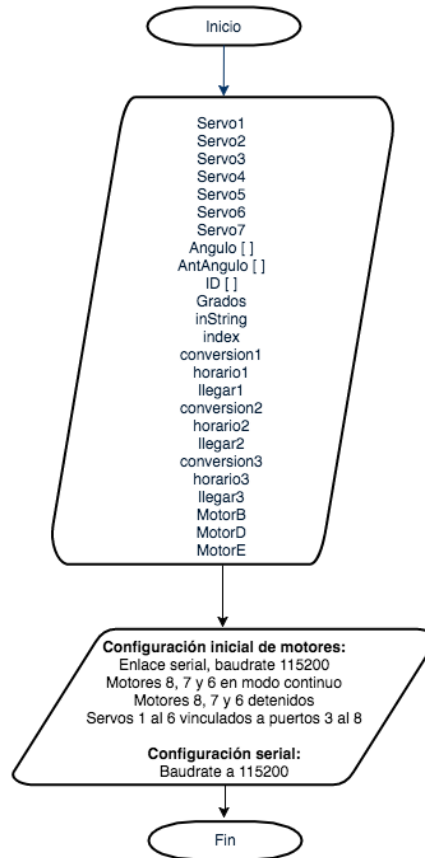
El valor final elegido para la resistencia del LED fue de 470Ω y para el *pull up* en la salida del optoacoplador fue de 4.7 kΩ. En la Figura 430 se puede observar el esquemático del circuito diseñado.

Figura 430. Circuito de aislamiento para señales de control de motores Dynamixel



6. **Desarrollo del algoritmo en Arduino.** El siguiente paso fue recibir instrucciones por medio de un enlace serial y lograr mover varios servos simultáneamente. Por lo que se inició diseñando un algoritmo que constantemente verifica los caracteres obtenidos a través del enlace serial. Este algoritmo revisa individualmente cada carácter que se va recibiendo.

Figura 431. Diagrama de flujo de la configuración inicial del código de Arduino

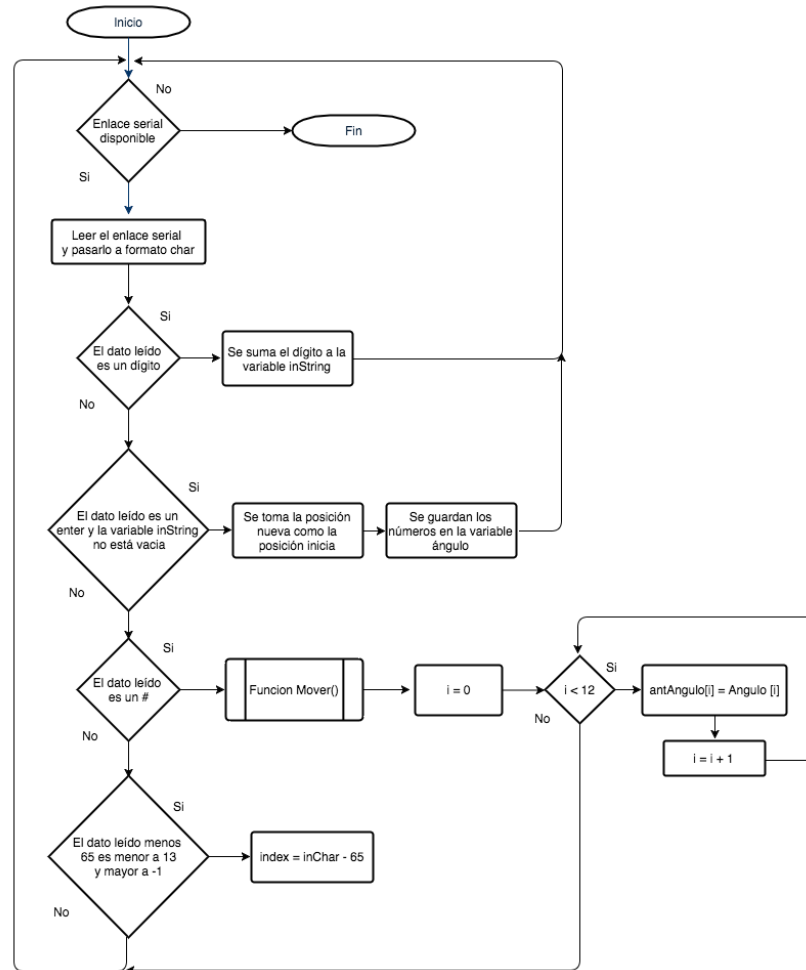


Si el carácter recibido es un número, lo toma y almacena en una variable que seguidamente es copiada a la variable correspondiente al ángulo al que se desea mover. Si es una letra mayúscula entre la “A” y la “L”, la etiqueta de identificación de motores es cambiada al motor correspondiente. Cada motor cuenta con una única etiqueta de identificación. En el caso de este programa, las primeras cinco posiciones del vector “ID” corresponden a las primeras cinco letras mayúsculas del abecedario y cada una está vinculada a un motor Dynamixel. Las siguientes siete posiciones del vector corresponden a las siguiente siete letras mayúsculas del abecedario y cada una está vinculada a un motor MG996R.

Se decidió utilizar un carácter especial que confirmara todos los cambios realizados a los ángulos de los motores antes de moverlos en conjunto. Para esto se utilizó el carácter “#”, por lo que, al ser recibido, se llama a la función Mover dentro del código de Arduino y se actualizan todos los ángulos recién ingresados,

colocándolos en una variable que indica cuál será el nuevo ángulo inicial en el momento en que se realice una nueva iteración.

Figura 432. Diagrama de flujo de la función principal del código de Arduino



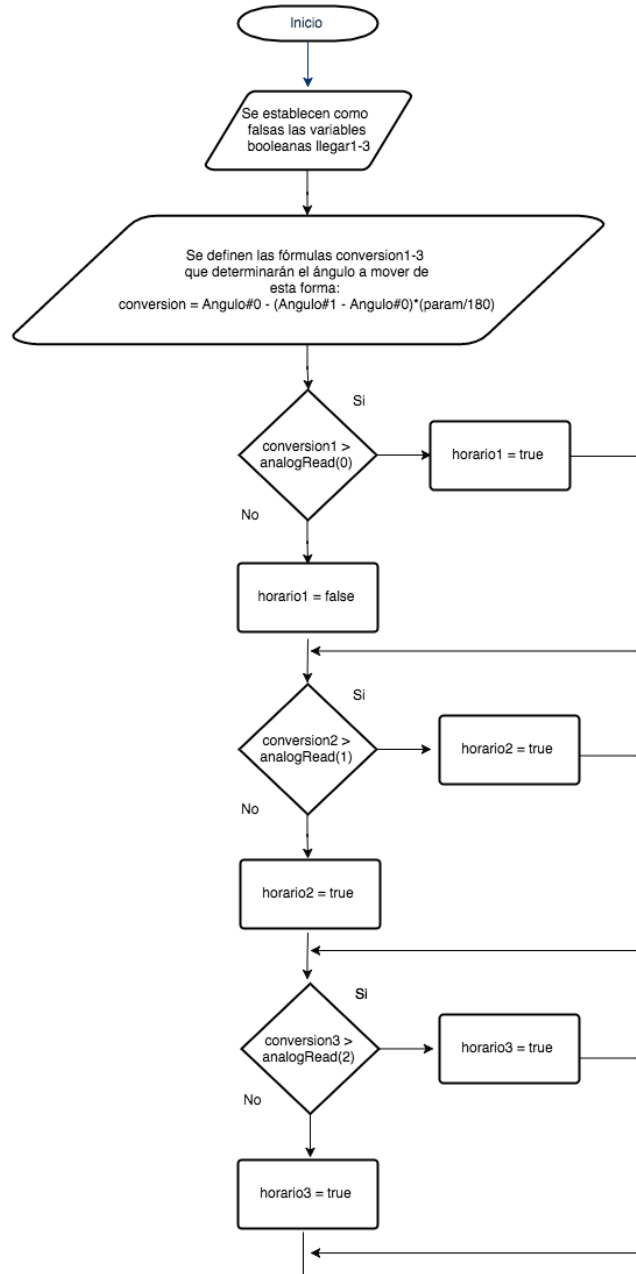
Cabe recordar que el controlador Arduino no cuenta con la capacidad de realizar *multithreading* por lo que fue necesario realizar un algoritmo que fuera capaz de enviar señales a los motores de tal manera que estos respondieran simultáneamente.

El algoritmo implementando hace uso de dos ciclos *for*, uno para dividir el ángulo a mover en pequeñas porciones y otro con el que se recorren todos los números de identificación de los motores Dynamixel.

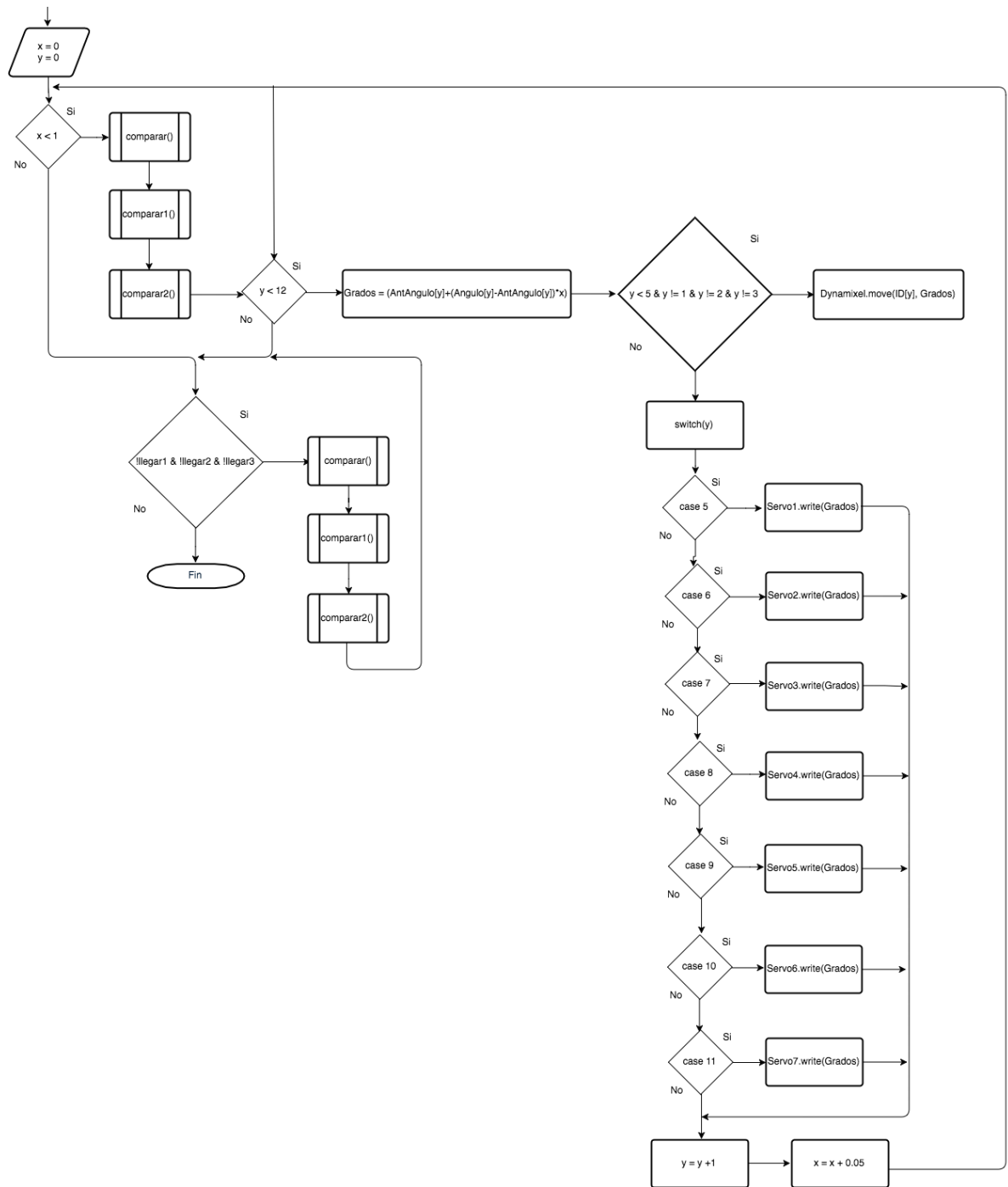
El primer ciclo *for* toma el dato del ángulo al que se desea mover el servo, lo divide en pequeños pedazos y envía uno por uno a cada servo esa pequeña porción del ángulo total, operación que hace a una alta velocidad por lo que a simple vista no es posible notar que cada servo se está moviendo poco a poco, uno por uno. El segundo ciclo *for* cambia el número de identificación de los motores Dynamixel, ya que todos estos

se encuentran conectados en la misma línea de comunicación, la manera de diferenciarlos es con un número de identificación (ID).

Figura 433. Diagrama de flujo de la función Mover del código de Arduino



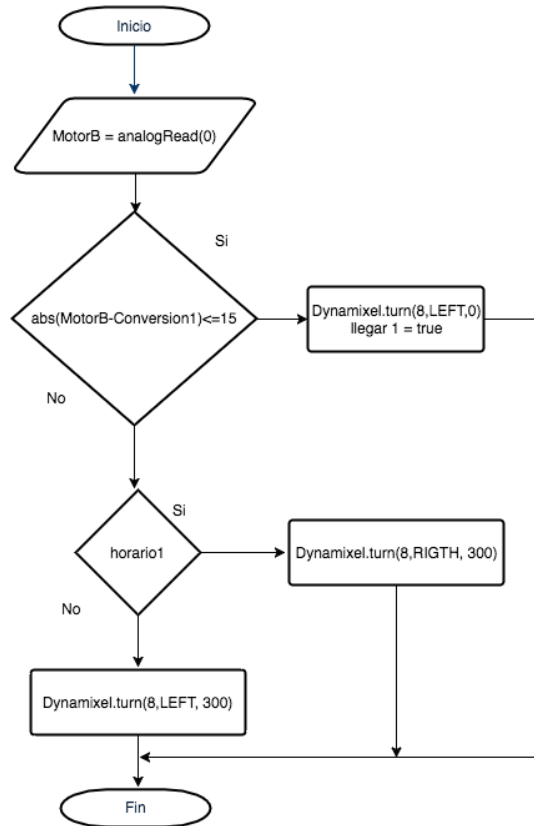
Continuación figura 445



Debido a que fue necesario que tres de los motores Dynamixel se movieran en modo continuo, esto es, como un motor DC no como un servo, se necesitó implementar dentro del código de Arduino una función que iniciara el movimiento de los motores en modo continuo cuando fuera necesario y constantemente verificara si el valor de voltaje recibido en uno de sus puertos analógicos fuera el requerido para detener el motor, de forma que este no siguiera rotando y así evitar romper alguna pieza del animatrónico. La función

se implementó de tal manera que existiera un rango de aceptación de 15° a cada lado del ángulo final deseado, en el que el servo podría quedarse en modo estacionario. Esto fue realizado tomando en cuenta las características mecánicas del animatrónico, pues existía la posibilidad de que al terminar la rutina de movimiento, la posición en la que terminará el eje no fuera exactamente el valor deseado y el programa al no poder encontrar ese valor siguiera enviando señales para que el motor se moviera, buscando sucesivamente el ángulo final hasta poder encontrarlo.

Figura 434. Diagrama de flujo de la función Comparar del código de Arduino



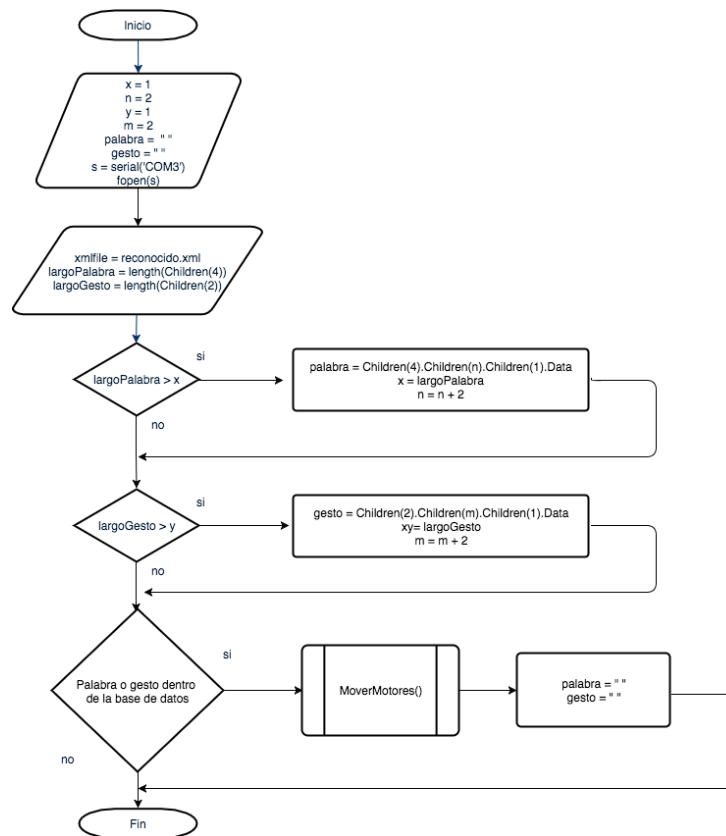
7. Integración Matlab-Arduino. Se integró la herramienta de software Matlab con la plataforma Arduino, de tal manera que se tuviera un sistema encargado de la recolección y manejo de información por parte del módulo de reconocimiento de gestos y audio, y uno encargado de ejecutar las instrucciones necesarias para el movimiento del animatrónico. Para esto se estableció una comunicación serial entre Matlab y Arduino a un *baud rate* de 115200.

Figura 435. Diagrama general de funcionamiento



Usando las distintas herramientas de Matlab se realizó un algoritmo que lee un archivo .XML, archivo que se actualiza constantemente y cuenta con las instrucciones que corresponden a determinado gesto, palabra o conjunto de palabras. Para recorrer el archivo a leer, se aprovechó de las características que tienen los archivos .XML, el programa realizado en Matlab se mantiene verificando si se ha escrito algo nuevo en uno de los dos “padres” disponibles dentro del archivo. Al encontrar una nueva entrada en el archivo, la lee y guarda como un string en una variable, la cual pasa por un conjunto de condicionales para ejecutar la rutina correspondiente. El programa se diseñó de tal manera que leyera siempre la última entrada en cada uno de los “padres”, por lo que, si ya existen varias entradas en alguna de las dos categorías, el programa recorre todos los “hijos” y se enfoca en el último de la lista, esto para no repetir rutinas y realizar siempre la acción que se quiere en el momento que se desea.

Figura 436. Método principal del código en Matlab



Se utilizaron dos matrices dentro de una función de Matlab como base para realizar las rutinas de movimiento del animatrónico. Una de las matrices contiene la etiqueta de identificación de cada motor, la otra matriz contiene todas las posiciones necesarias de cada uno de los motores para llevar a cabo las rutinas. En el determinado caso de que una instrucción proveniente desde el archivo .XML contenga una respuesta dentro de las condicionales realizadas en el programa, se envía a la función que contiene estas matrices, la posición de todos los motores a la que se quiere mover, seguido por un retardo en segundos. Para hacer efectivo toda la función envía por medio de enlace serial al Arduino todas las posiciones a las que se quiere mover los motores. Este procedimiento se realiza un número determinado de veces, hasta que se realicen todos los pasos pertinentes al movimiento que se deseó realizar.

Figura 437. Función MoverMotores del código de Matlab

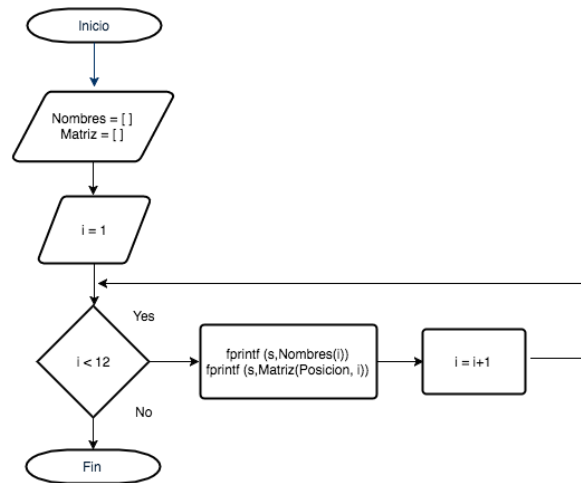
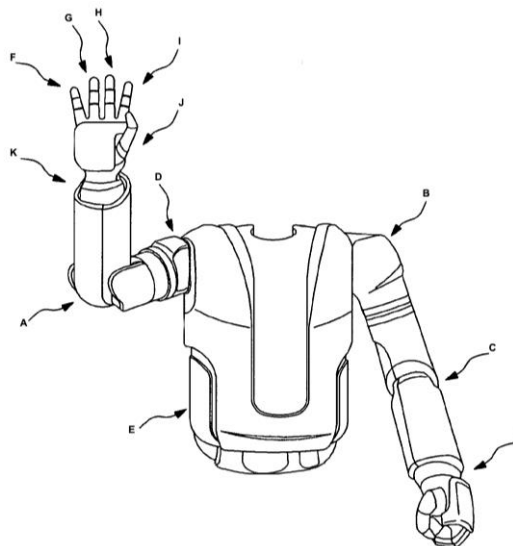


Figura 438. Diagrama de etiquetas de identificación



8. Diseño y construcción de circuitos impresos. Luego de haber realizado las pruebas necesarias de cada uno de los circuitos diseñados, se procedió a trasladar los circuitos a un diseño de placa de circuito impreso (PCB) de manera que se facilitara realizar las pruebas de integración. Estas placas fueron utilizadas para realizar todas las pruebas preliminares, antes de presentar el resultado final. Las placas fueron diseñadas en el software PCB Wizard y se realizaron a mano, usando hojas de acetato, plancha eléctrica y percloruro férrico.

Figura 439. Diseño del PCB de optoacopladores

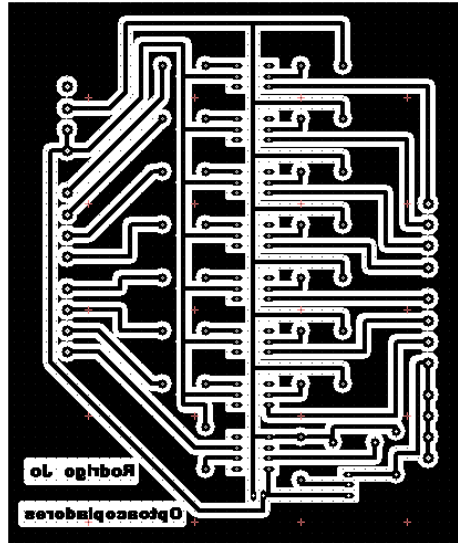
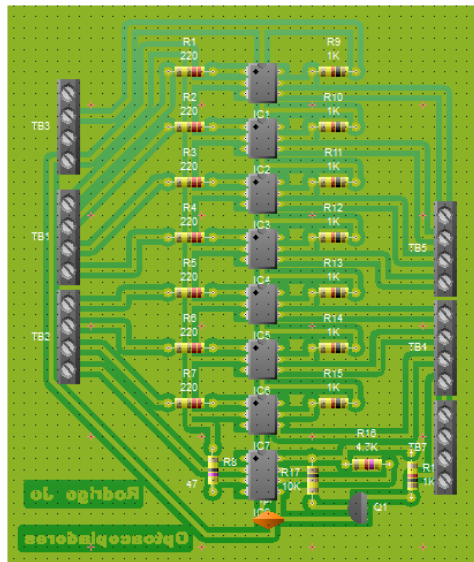


Figura 440. PCB de optoacopladores con componentes



En el caso de las placas que hacen uso y manejan los 12V proporcionados por las fuentes de alimentación principales de este módulo, el diseño de los *tracks* se realizó con un grosor de 0.08 pulgadas. Además de

esto, se aseguró que no existieran cruces a 90° entre los *tracks* de las placas, de modo que se pudieran evitar fugas de corriente.

Figura 441. Diseño del PCB de potencia

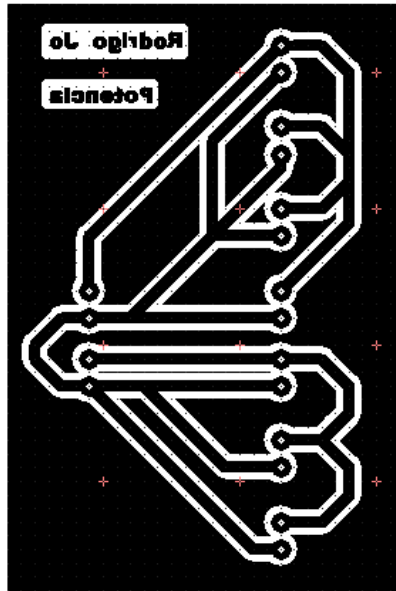


Figura 442. PCB de potencia con terminales

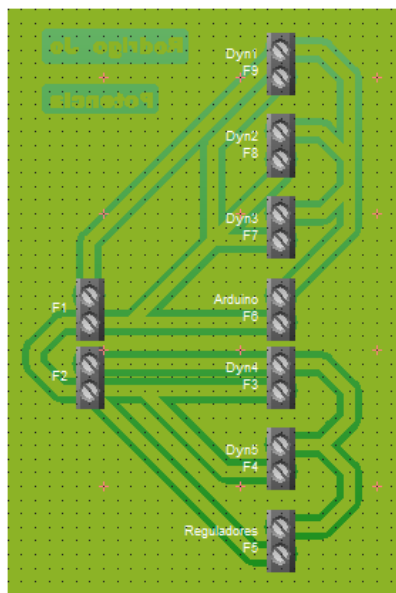


Figura 443. Diseño del PCB de reguladores de voltaje

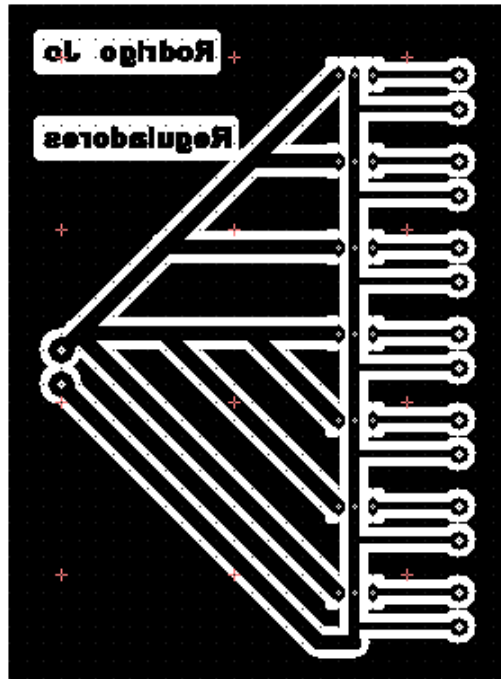
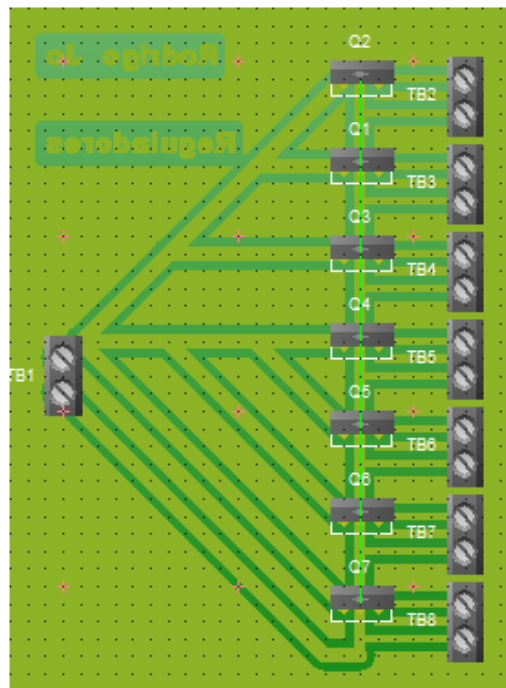


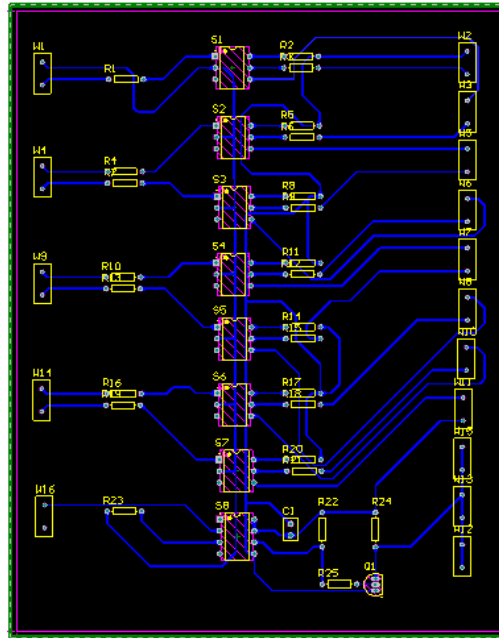
Figura 444. PCB de potencia con componentes



El diseño de las placas finales a utilizar se realizó en el software Altium. En el caso de la placa de optoacopladores, esta se diseñó con un grosor de *tracks* de 0.508mm y se cuidó que no existieran cruces entre

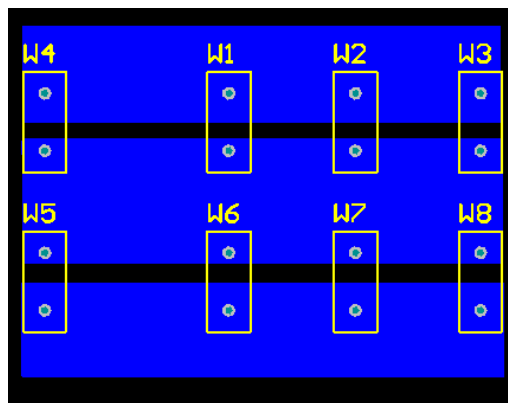
tracks de 45°, pues la fresadora con la que se fabricaron cuenta con ciertas limitantes al momento de hacer el maquinado de los caminos de cobre.

Figura 445. Placa final de optoacopladores



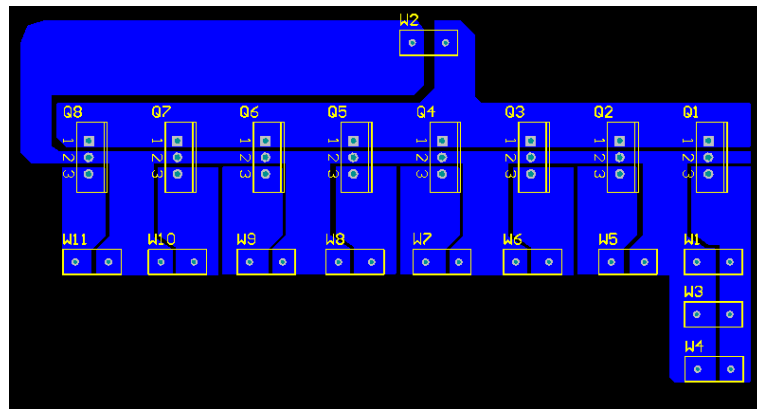
Se calculó cuál debía de ser el ancho de *tracks* necesario para soportar toda la corriente que sería consumida por cada uno de los componentes y actuadores del animatrónico. Debido a que la corriente total consumida por el mismo fue dividida entre dos fuentes, se requerirían 12 voltios y aproximadamente 18 amperios de corriente de cada fuente. El ancho mínimo de *track* necesario para esto es de 351.98 mils, por lo que se diseñó la placa con un ancho de *tracks* de 365 mils.

Figura 446. Placa final de potencia



De igual manera se calculó el ancho de *tracks* para soportar una corriente de 9 amperios, la cual sería la corriente máxima requerida por la placa de reguladores de voltaje. El ancho de *track* mínimo para esta corriente debía de ser 125.58 mils, y se diseñó la placa con un ancho de *tracks* de 305 mils.

Figura 447. Placa final de reguladores de voltaje



9. **Pruebas e integración.** El objetivo de este módulo consistió en lograr la integración de los demás módulos del megaproyecto, y suplir la energía necesaria para que cada uno de los dispositivos y actuadores pudieran trabajar en perfectas condiciones.

Fue posible realizar la completa integración haciendo uso de la plataforma Arduino y la herramienta de software Matlab como ya fue previamente descrito. Las rutinas de movimiento diseñadas para dar una respuesta dinámica a cada uno de los estímulos percibidos por el módulo de reconocimiento de audio y gestos se basan en cada una de las posiciones que pueden ser observadas en las figuras 448 a la 466.

Figura 448. Posición inicial del animatrónico

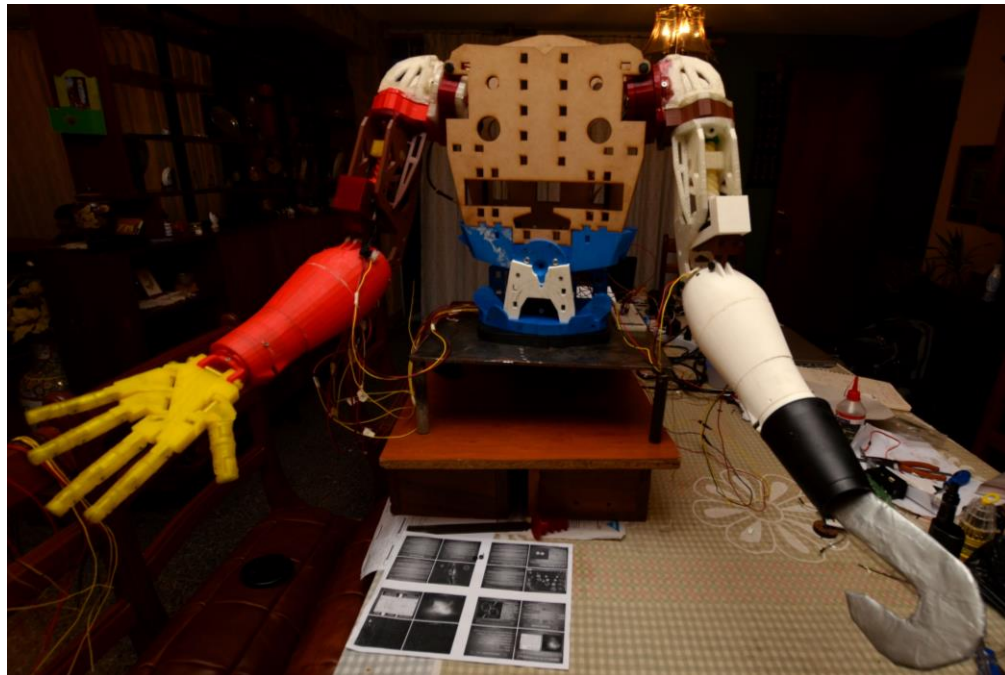


Figura 449. Brazo derecho completamente extendido

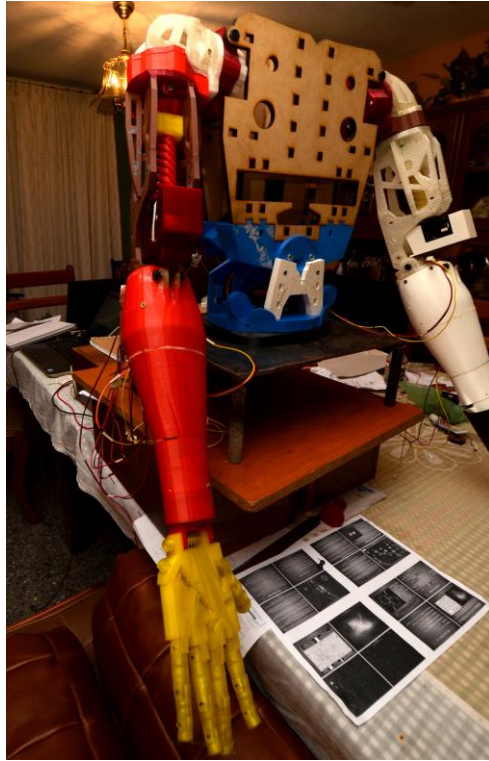


Figura 450. Hombro derecho arriba, codo derecho contraído



Figura 451. Hombro derecho arriba, codo derecho extendido

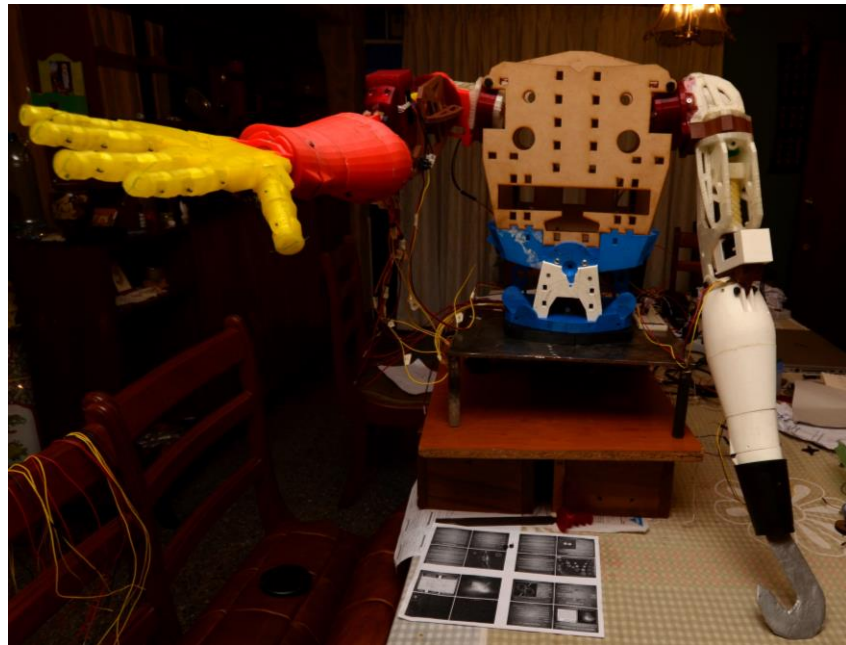


Figura 452. Mano completamente extendida



Figura 453. Muñeca derecha rotada a 180°



Figura 454. Dedo meñique contraído



Figura 455. Dedo anular contraído



Figura 456. Dedo medio contraído



Figura 457. Dedo índice contraído



Figura 458. Dedo pulgar contraído



Figura 459. Mano derecha contraída

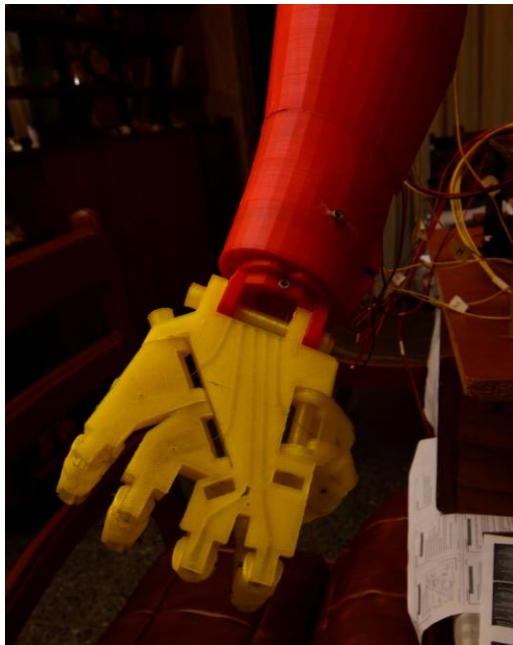


Figura 460. Brazo izquierdo extendido

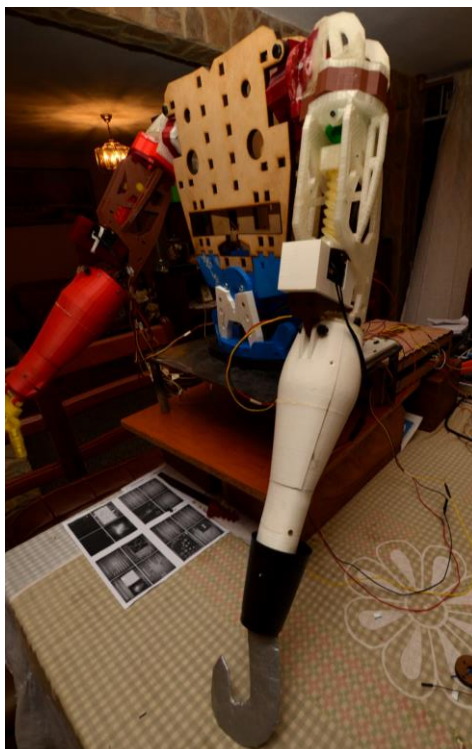


Figura 461. Hombro izquierdo arriba, codo izquierdo contraído



Figura 462. Hombro izquierdo arriba, codo izquierdo extendido

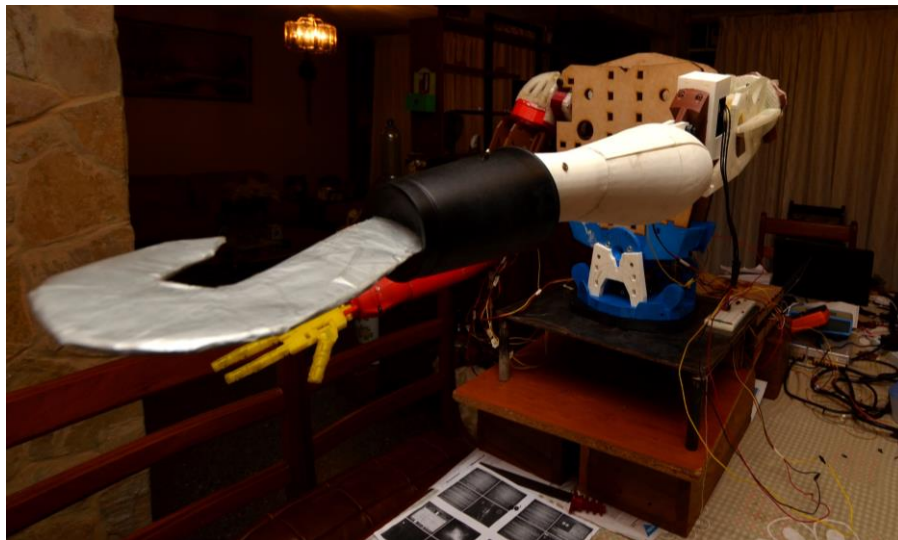


Figura 463. Muñeca izquierda a 0°

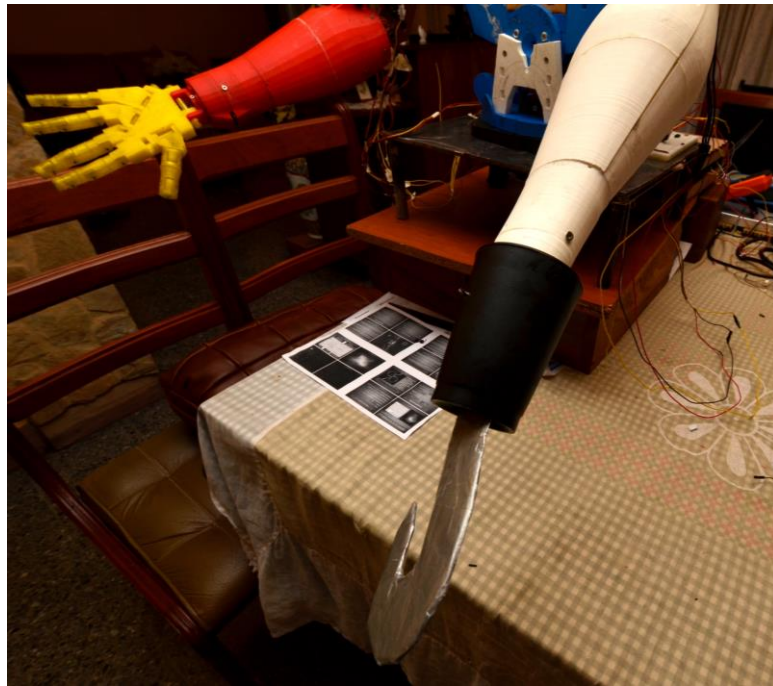


Figura 464. Muñeca izquierda a 180°

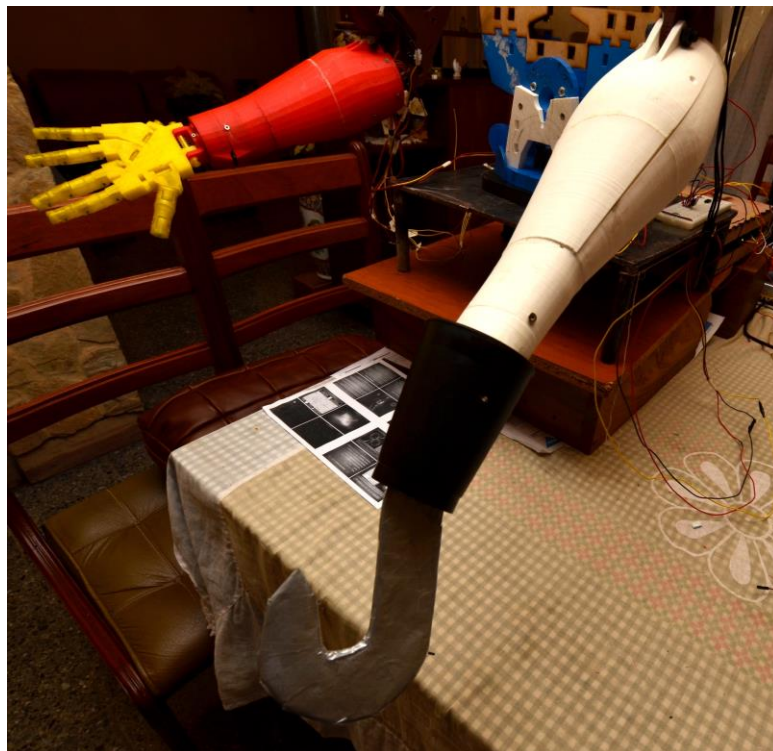


Figura 465. Torso a 140°

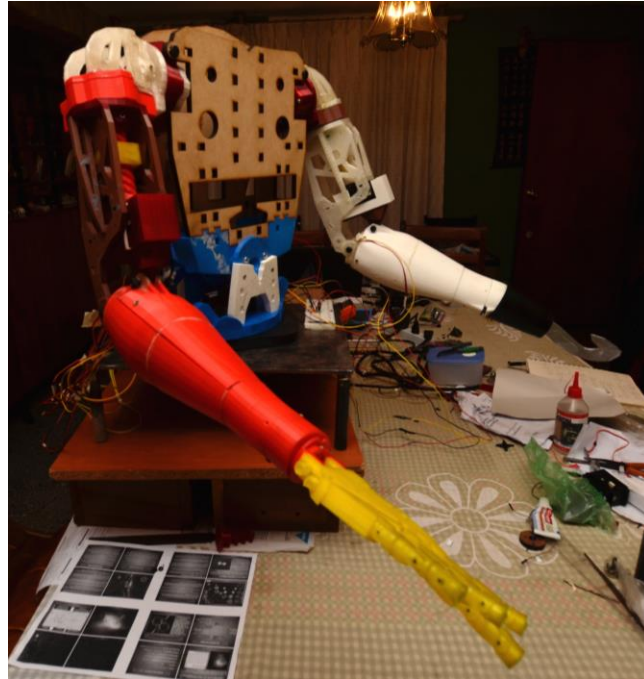
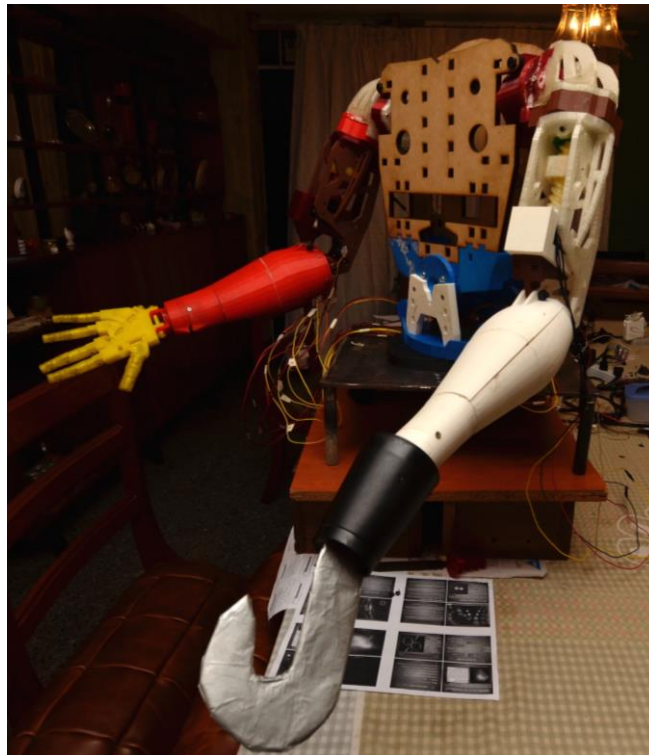


Figura 466. Torso a 40°



XI. CARACTERIZACIÓN DE ACTUADORES NEUMÁTICOS FLEXIBLES

A. RESUMEN

Un actuador neumático flexible es una estructura flexible, duradera, fácil y barata de producir. Éste tiene una alta capacidad para tirar de cargas considerables en relación a su peso y dimensiones. Para obtener un óptimo tamaño, tiempo de respuesta y generación de fuerza a la hora del diseño, es necesario el entendimiento de su comportamiento mecánico. El siguiente trabajo escrito provee varias ecuaciones matemáticas que, en conjunto, describen el comportamiento de un actuador neumático flexible en términos de generación de fuerza en estado estable, duración y magnitud de la fuerza máxima en estado transitorio, tiempo de reacción y presiones de operación admitidas para un buen funcionamiento. La veracidad del modelo matemático que describe la fuerza en estado estable fue comprobada por medio de ensayos de carga y mediciones de fuerza. Las deducciones de las demás ecuaciones surgieron a partir del análisis de varias gráficas resultantes de los ensayos de funcionamiento. Para encontrar la funcionalidad principal de la malla externa de un actuador, se realizaron ensayos destructivos donde se demuestra que la misma es la responsable de evitar fallas catastróficas y que dicha falla ocurrirá siempre donde la malla está dañada y a cierta presión de operación. Ya con el análisis completo de los resultados obtenidos en los ensayos de funcionamiento, se pudo concluir una presión mínima de operación para cualquier actuador al igual que las ecuaciones finales que describen su comportamiento. No obstante, los modelos matemáticos presentados en la sección de Conclusiones fueron deducidos a partir de datos experimentales y, por la naturaleza del origen de los mismos, puede que ellos no tengan la exactitud necesaria para aplicaciones más delicadas y se recomienda encontrar las ecuaciones finales de forma analítica y en base a ellas, ajustar las que se obtuvieron empíricamente.

B. INTRODUCCIÓN

El presente trabajo tiene como objetivo el desarrollo de una modelación matemática que describa el comportamiento de un actuador neumático flexible por medio de una caracterización dinámica y estática, más el apoyo de análisis teóricos matemáticos.

Para encontrar el modelo matemático principal que describe la fuerza generada por un actuador neumático flexible de ciertas dimensiones y con cierta presión de operación, se realizó un análisis teórico del comportamiento del mismo y por medio de pruebas de carácter dinámico se comprobó su veracidad. Estas pruebas consistieron en utilizar una carga equivalente a la fuerza que predice la fórmula matemática que el actuador generará y, utilizando la misma presión teórica, se midió el largo del actuador al activarse sin y con la carga. Como medida para juzgar si el actuador levantó o no la carga real, se utilizó el porcentaje de error entre las medidas anteriormente descritas. Adicionalmente se realizaron varias mediciones con un sensor de fuerza a distintas presiones para luego comparar estos resultados con los teóricos. Con los resultados

anteriores se obtuvo otro rango de porcentajes de error al igual que el descubrimiento del comportamiento logarítmico en los picos de fuerza que se generan por un tiempo de 0.030 s. El análisis de los porcentajes de error de ambas pruebas ayudó a comprobar el modelo matemático.

No obstante, este modelo no brinda información alguna sobre los tiempos de respuesta de un actuador. Para encontrar este comportamiento se realizaron varios ensayos de tiempo de funcionamiento. Los mismos consisten en la medición, por medio de un microcontrolador y un interruptor, del tiempo que le toma a un actuador regresar de su longitud bajo carga a su longitud de activación. Se procedió a activar tres actuadores neumáticos flexibles de tres longitudes diferentes, con una presión base de 690 kPa (10 psi) y se fue incrementando hasta llegar a la presión límite del compresor (760 kPa ó 110 psi). Los tiempos de reacción medidos variaron desde 260 ms hasta 108 ms y fueron graficados para facilitar su análisis.

Por último, para encontrar la funcionalidad principal de la malla exterior en un actuador neumático flexible, se realizaron ensayos destructivos. Se procedió a rasgar la malla externa de tres actuadores de diferentes largos para luego activarlos desde una presión base de 690 kPa (10 psi) hasta llegar a la presión de falla. Esto resultó en una falla catastrófica en los tres actuadores a una misma presión de operación de 480 kPa (70 psi), justo en el punto donde la malla estaba dañada.

Ya con una fórmula matemática que predice la fuerza que generará un actuador neumático flexible a partir de sus variables de diseño físico y presión de operación, junto con ecuaciones que predicen el tiempo de reacción dependiendo de la presión utilizada, el pico de fuerza resultante a cierta presión y su duración, y conociendo la importancia de la malla externa al igual que la presión segura de operación cuando el actuador se encuentra dañado, ya se puede decir que el comportamiento mecánico de un actuador neumático flexible está descrito en su forma más básica.

C. OBJETIVOS

1. General

- Describir el comportamiento de los músculos neumáticos flexibles por medio de una modelación matemática obtenida de la caracterización dinámica y estática de los mismos.

2. Específicos

- Implementar un sistema de medición para el tiempo de respuesta de los actuadores neumáticos flexibles.
- Implementar un sistema neumático flexible para gobernar las electroválvulas que permiten el accionamiento de los actuadores.
- Registrar las presiones y pesos de falla para cada actuador neumático flexible probado.

D. METODOLOGÍA

1. **Resumen.** Se utilizaron tres actuadores distintos para las pruebas de caracterización dinámica y estática. Estos conservan un único diámetro de 0.0127 m y poseen longitudes (medidos de férula a férula) de 0.15 m , 0.20 m y 0.25 m (figuras 467, 468 y 469). Las presiones a utilizar, al igual que las cargas, variarán dependiendo del tipo de prueba que se esté realizando.

Figura 467. Actuador neumático flexible de 0.15 m .



Figura 468. Actuador neumático flexible de 0.20 m .



Figura 469. Actuador neumático flexible de 0.25 m .



2. **Ensayos de tiempo.** Descripción general: Los ensayos de tiempo consisten en descubrir cómo cambia el comportamiento del tiempo de reacción de un actuador neumático flexible, cuando la longitud se conserva y la presión aumenta.

Los ensayos de tiempo se llevaron a cabo ejecutando los siguientes pasos para cada uno de los tres distintos actuadores:

1. Se selecciona el actuador.
2. Se coloca el actuador en la cámara de ensayos destructivos y se conecta al sistema neumático, por su extremo superior (Figura 467).
3. Se ata una carga de *2.5 kg* en el extremo inferior del actuador.
4. Se calibra la presión base de *70 kPa (10 psi)* en el compresor.
5. Se selecciona en el programa “Iniciar prueba de tiempo”.
6. Se ingresan los datos pedidos por el programa: presión actual.
7. Corre el programa para pruebas de tiempo.
8. Se aumenta *70 kPa (10 psi)* a la presión de operación.
9. Se repiten los pasos 5 a 8 hasta llegar a la presión de *690 kPa (100 psi)*.
10. Fin.

3. **Ensayos de carga.** Descripción general: Los ensayos de carga consisten en la comparación de la longitud de activación de un mismo actuador bajo dos diferentes condiciones: con carga a cierta presión y sin carga a la misma presión. Los ensayos de tiempo se llevaron a cabo ejecutando los siguientes pasos y con la configuración mostrada en la Figura 482.

Para el actuador de *0.15 m*:

1. Se selecciona el actuador de *0.15 m*.
2. Se coloca el actuador en la cámara de ensayos destructivos y se conecta al sistema neumático por su extremo superior.
3. Se calibra la presión a *275 kPa (40 psi)* en el compresor.
4. Se activa manualmente la electroválvula de ingreso de aire.
5. Se mide y se anota el largo del actuador (activado) sin carga alguna.
6. Se activa manualmente la electroválvula de desfogue de aire.
7. Se ata una carga de *1.5 kg* en el extremo inferior del actuador.
8. Se selecciona en el programa “Iniciar prueba de carga”.
9. Se ingresan los datos pedidos por el programa: presión y carga actual.
10. Corre el programa para pruebas de carga.
11. Se mide el largo del actuador (activado).
12. Se ingresa el dato obtenido en el paso anterior al programa.
13. Termina de correr el programa para pruebas de carga.
14. Se desata la carga actual.
15. Se repiten los pasos 3 a 14, con una presión de *480 kPa (70 psi)* y una carga de *2.5 kg*.
16. Se repiten los pasos 3 a 14, con una presión de *760 kPa (110 psi)* y una carga de *3.5 kg*.
17. Se desmonta el actuador de *0.15 m*.
18. Fin

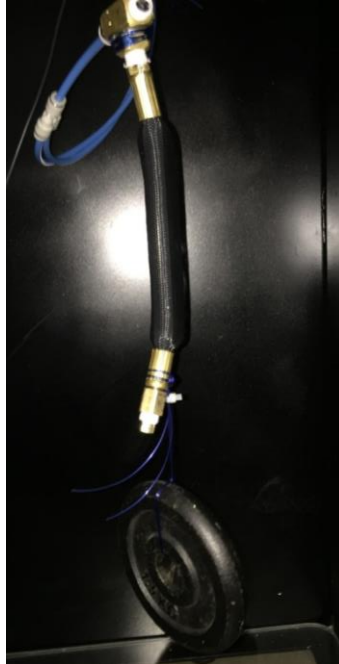
Para el actuador de *0.20 m*:

1. Se selecciona el actuador de *0.20 m*.
2. Se coloca el actuador en la cámara de ensayos destructivos y se conecta al sistema neumático por su extremo superior.
3. Se calibra la presión a *275 kPa (40 psi)* en el compresor.
4. Se activa manualmente la electroválvula de ingreso de aire.
5. Se mide y se anota el largo del actuador (activado) sin carga alguna.
6. Se activa manualmente la electroválvula de desfogue de aire.
7. Se ata una carga de *2.5 kg* en el extremo inferior del actuador.
8. Se selecciona en el programa “Iniciar prueba de carga”.
9. Se ingresan los datos pedidos por el programa: presión y carga actual.
10. Corre el programa para pruebas de carga.
11. Se mide el largo del actuador (activado).
12. Se ingresa el dato obtenido en el paso anterior al programa.
13. Termina de correr el programa para pruebas de carga.
14. Se desata la carga actual.
15. Se repiten los pasos 3 a 14, con una presión de *480 kPa (70 psi)* y una carga de *4.5 kg*.
16. Se repiten los pasos 3 a 14, con una presión de *760 kPa (110 psi)* y una carga de *7.0 kg*.
17. Se desmonta el actuador de *0.20 m*.
18. Fin

Para el actuador de *0.25 m*:

1. Se selecciona el actuador de *0.25 m*.
2. Se coloca el actuador en la cámara de ensayos destructivos y se conecta al sistema neumático por su extremo superior.
3. Se calibra la presión a *275 kPa (40 psi)* en el compresor.
4. Se activa manualmente la electroválvula de ingreso de aire.
5. Se mide y se anota el largo del actuador (activado) sin carga alguna.
6. Se activa manualmente la electroválvula de desfogue de aire.
7. Se ata una carga de *4.0 kg* en el extremo inferior del actuador.
8. Se selecciona en el programa “Iniciar prueba de carga”.
9. Se ingresan los datos pedidos por el programa: presión y carga actual.
10. Corre el programa para pruebas de carga.
11. Se mide el largo del actuador (activado).
12. Se ingresa el dato obtenido en el paso anterior al programa.
13. Termina de correr el programa para pruebas de carga.
14. Se desata la carga actual.
15. Se repiten los pasos 3 a 14, con una presión de *480 kPa (70 psi)* y una carga de *7.0 kg*.
16. Se repiten los pasos 3 a 14, con una presión de *760 kPa (110 psi)* y una carga de *10.5 kg*.
17. Se desmonta el actuador de *0.25 m*.
18. Fin

Figura 470. Configuración de un actuador neumático flexible para los ensayos de carga y tiempo.



4. **Ensayos destructivos.** Descripción general: Para encontrar la funcionalidad de la malla externa, se seleccionaron tres actuadores (longitudes: 0.15 m , 0.20 m y 0.25 m) y se rasgó la malla externa en una ubicación al azar. Los ensayos destructivos se llevaron a cabo de la siguiente manera para los tres actuadores:

1. Se coloca el actuador en la cámara de ensayos destructivos y se conecta al sistema neumático.
2. Se rasga la malla del actuador en uso, en un punto arbitrario.
3. Se calibra la presión base de 70 kPa (10 psi) en el compresor.
4. Se selecciona en el programa “Iniciar prueba destructiva”.
5. Se ingresa la presión actual al programa.
6. Corre el programa para ensayos destructivos.
7. Se observa la condición física del actuador.
11. Se aumenta 70 kPa (10 psi) a la presión de operación.
12. Se repiten los pasos 3 a 11 hasta llegar a la presión de 760 kPa (110 psi) o hasta que el actuador falle catastróficamente.
13. Fin.

5. **Mediciones de fuerza.** Descripción general: Para encontrar un comportamiento más detallado de un actuador neumático flexible, se seleccionó un actuador de 0.15 m de largo y con ayuda de un sensor de fuerza, se varió la presión de operación para registrar la fuerza resultante. Las mediciones de fuerza se llevaron a cabo de la siguiente manera:

1. Se coloca el actuador en la cámara de ensayos destructivos y se conecta al sistema neumático.
2. Se acopla el sensor de fuerza al extremo inferior del actuador.
3. Se ajusta la altura de la base que sostiene el sensor para que el actuador esté bajo un poco de tensión.
4. Se calibra el sensor de fuerza para asegurar el valor 0 N .
5. Se calibra la presión base de 70 kPa (10 psi) en el compresor.
6. Se inicia la lectura de fuerza en la interfaz móvil “PASCO”.
7. Se activa manualmente la electroválvula de entrada de aire.
8. Se detiene la lectura de fuerza en la interfaz móvil “PASCO”.
9. Se activa manualmente la electroválvula de desfogue.
10. Se incrementa la presión de operación en 45 kPa (5 psi)
11. Se repiten los pasos 4 a 10 hasta obtener una lectura cercana, o igual, a 45 N ¹⁷.

Figura 471. Configuración de un actuador neumático flexible para mediciones de fuerza.



¹⁷ Se definió este límite de fuerza para no sobrepasar el límite de operación del sensor.

E. RESULTADOS

1. Provenientes de los ensayos de tiempo

Figura 472. Ensayo de tiempo para el actuador de 0.15 m , con 2.5 kg de carga y presiones varias.

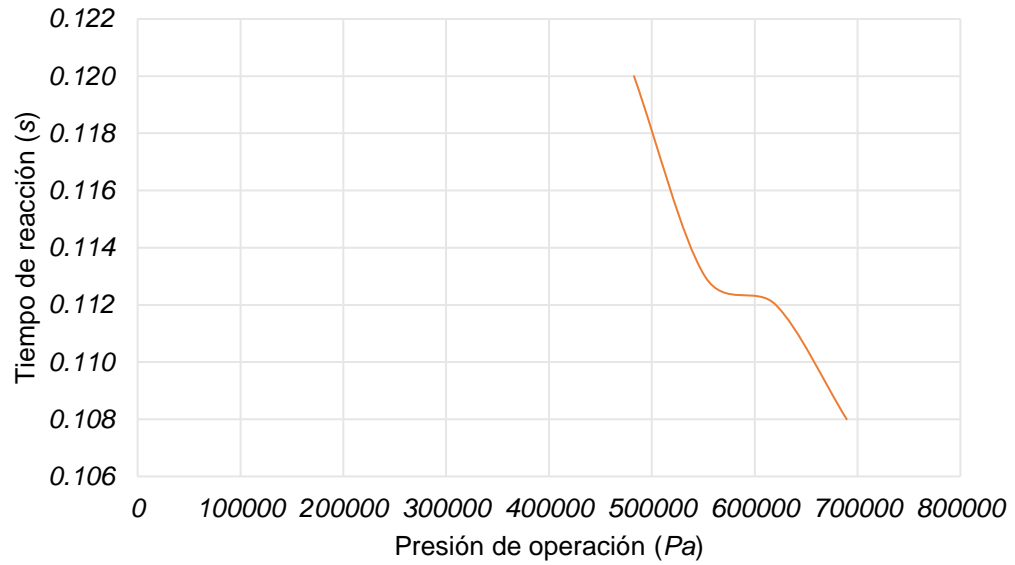


Figura 473. Ensayo de tiempo para el actuador de 0.20 m , con 2.5 kg de carga y presiones varias.

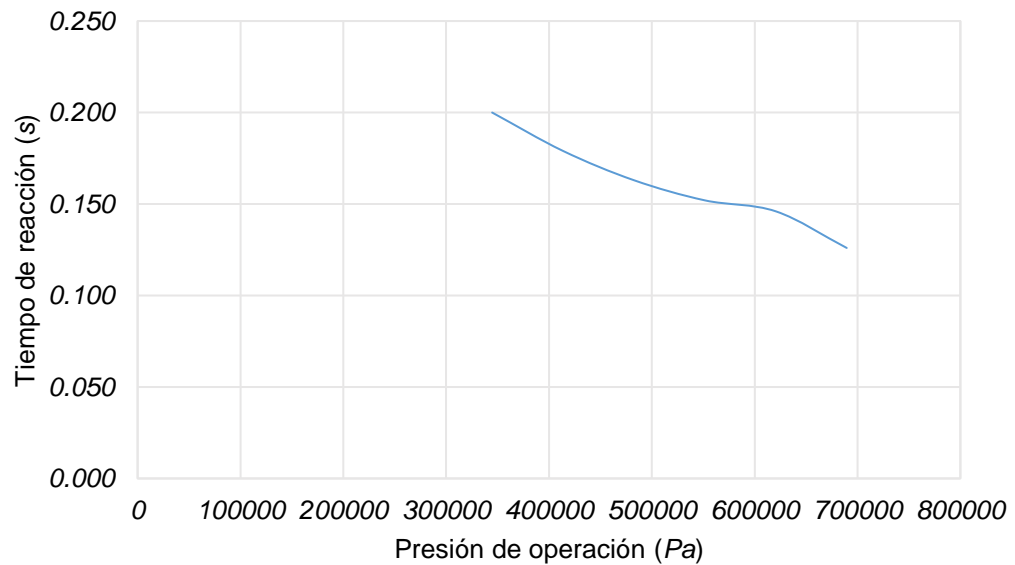
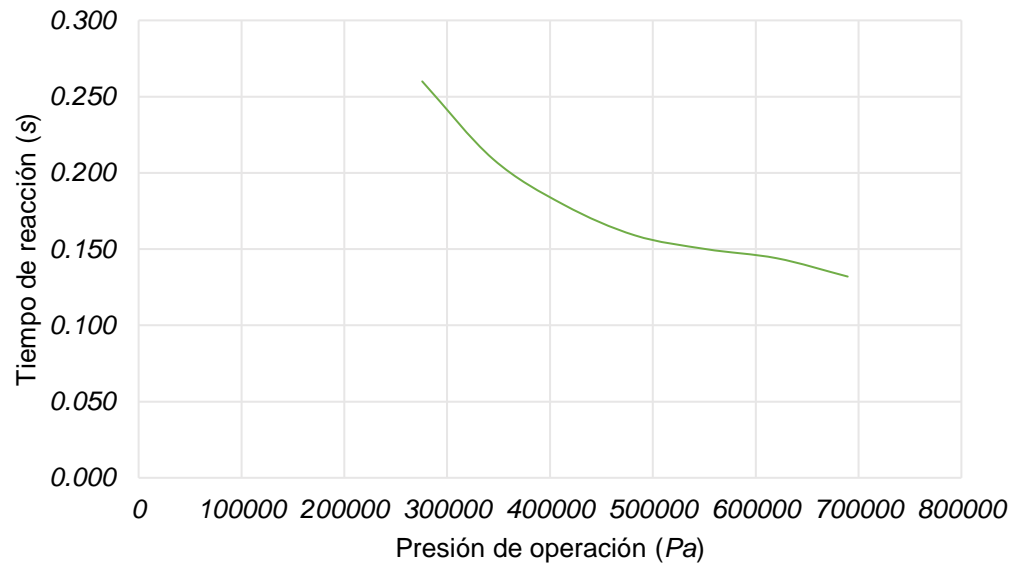


Figura 474. Ensayo de tiempo para el actuador de 0.25 m, con 2.5 kg de carga y presiones varias.

Cuadro 109. Tiempos para los actuadores con 2.5 kg de carga y presiones varias.¹⁸

Presión (psi)	Presión (Pa)	Actuador de 0.15 m Tiempo (s)	Actuador de 0.20 m Tiempo (s)	Actuador de 0.25 m Tiempo (s)
10	68948	-	-	-
20	137895	-	-	-
30	206843	-	-	-
40	275790	-	-	0.260
50	344738	-	0.200	0.209
60	413686	-	0.179	0.179
70	482633	0.120	0.163	0.159
80	551581	0.113	0.152	0.150
90	620528	0.112	0.146	0.144
100	689476	0.108	0.126	0.132

Línea de tendencia para el actuador de 0.15 m, con un $R^2 = 1$

$$t(P) = (-5 * 10^{-18}) * P^3 + (8 * 10^{-12}) * P^2 - (5 * 10^{-6}) * P + 1.093 \quad (15)$$

Línea de tendencia para el actuador de 0.20 m, con un $R^2 = 0.9958$

$$t(P) = (-3 * 10^{-18}) * P^3 + (4 * 10^{-12}) * P^2 - (2 * 10^{-6}) * P + 0.6645 \quad (16)$$

¹⁸ Las lecturas no válidas son expresadas con un guion (-).

Línea de tendencia para el actuador de 0.25 m, con un $R^2 = 0.9997$

$$t(P) = (-3 * 10^{-18}) * P^3 + (5 * 10^{-12}) * P^2 - (3 * 10^{-6}) * P + 0.7701 \quad (17)$$

2. Provenientes de los ensayos de carga

Cuadro 110. Cargas teóricas (derivadas de la ecuación 13) contra cargas reales utilizadas.

Actuador de 0,15 m			Actuador de 0,2m			Actuador de 0,25m		
Carga teórica (kg)	Carga real (kg)	% Error	Carga teórica (kg)	Carga real (kg)	% Error	Carga teórica (kg)	Carga real (kg)	% Error
1.5	1.5	0 %	2.7	2.5	7.4 %	4.2	4.0	4.8 %
2.6	2.5	3.8 %	4.7	4.5	4.3 %	7.3	7.0	4.1 %
3.7	3.5	5.4 %	6.7	7.0	4.5 %	10.4	10.5	1 %

Cuadro 111. Resumen numérico de los ensayos de carga para el actuador de 0.15 m.

Presión (psi)	Presión (Pa)	Longitud sin carga (m)	Longitud con carga (m)	% Error
40	275790	0.180	0.184	2.2 %
70	482633	0.185	0.186	0.5 %
100	689476	0.188	0.189	0.5 %

Cuadro 112. Resumen numérico de los ensayos de carga para el actuador de 0.20 m.

Presión (psi)	Presión (Pa)	Longitud sin carga (m)	Longitud con carga (m)	% Error
40	275790	0.198	0.199	0.5 %
70	482633	0.198	0.199	0.5 %
100	689476	0.195	0.200	2.6 %

Cuadro 113. Resumen numérico de los ensayos de carga para el actuador de 0.25 m.

Presión (psi)	Presión (Pa)	Longitud sin carga (m)	Longitud con carga (m)	% Error
40	275790	0.276	0.280	1.4 %
70	482633	0.270	0.275	1.9 %
100	689476	0.274	0.276	0.7 %

3. Provenientes de la ecuación matemática

Cuadro 114. Resultados teóricos para varios actuadores neumáticos flexibles.

Presión (psi)	Presión (Pa)	Actuador de 0.15 m		Actuador de 0.20 m		Actuador de 0.25 m	
		Fuerza (N)	Carga (kg)	Fuerza (N)	Carga (kg)	Fuerza (N)	Carga (kg)
0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10	68948	3.7	0.4	6.5	0.7	10.2	1.0
20	137895	7.3	0.7	13.1	1.3	20.5	2.1
30	206843	11.0	1.1	19.6	2.0	30.7	3.1
40	275790	14.7	1.5	26.2	2.7	41.0	4.2
50	344738	18.3	1.9	32.7	3.3	51.2	5.2
60	413686	22.0	2.2	39.3	4.0	61.5	6.3
70	482633	25.7	2.6	45.8	4.7	71.7	7.3
80	551581	29.3	3.0	52.4	5.3	82.0	8.4
90	620528	33.0	3.4	58.9	6.0	92.2	9.4
100	689476	36.7	3.7	65.5	6.7	102.	10.4
110	758424	40.3	4.1	72.0	7.3	112.	11.5

4. Provenientes de los ensayos destructivos

Figura 475. Actuador de 0.15 m, antes y después, de fallar a 480kPa (70 psi).



Figura 476. Actuador de 0.20 m, antes y después, de fallar a 480kPa (70 psi).

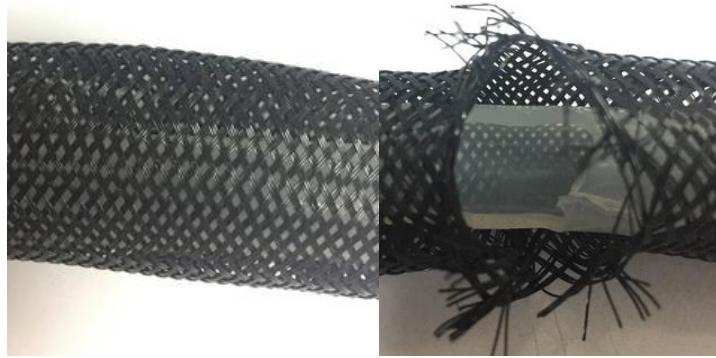


Figura 477. Actuador de 0.25 m, antes y después, de fallar a 480kPa (70 psi).

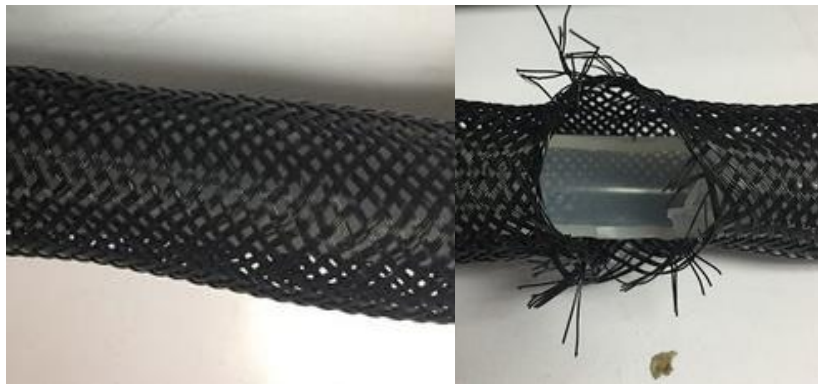
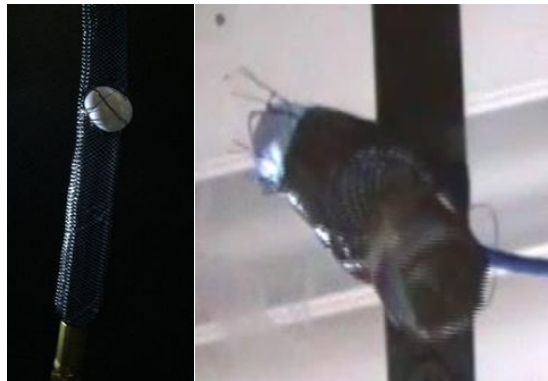


Figura 478. Vista lateral e inferior del actuador de 0.20 m antes de la falla a 480 kPa (70 psi).



5. Provenientes de las mediciones de fuerza

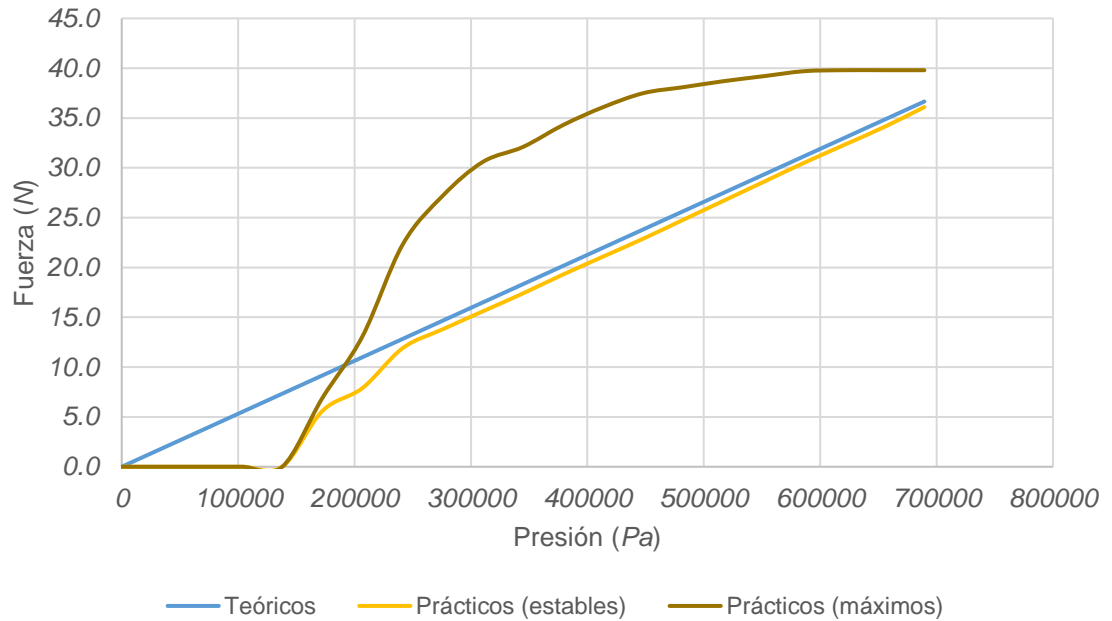
Cuadro 115. Comparación de fuerzas, generadas por un actuador de 0.15 m.

Presión (Psi)	Presión (Pa)	Fuerza teórica (N)	Fuerza estable práctica (N)	% Error
0	0	0.0	0	0%
5	34474	1.8	0	100%
10	68948	3.7	0	100%
15	103421	5.5	0	100%
20	137895	7.3	0	100%
25	172369	9.2	5.6	39%
30	206843	11.0	7.9	28%
35	241317	12.8	11.9	7%
40	275790	14.7	13.8	6%
45	310264	16.5	15.6	5%
50	344738	18.3	17.4	5%
55	379212	20.2	19.3	4%
60	413686	22.0	21.1	4%
65	448159	23.8	22.9	4%
70	482633	25.7	24.8	3%
75	517107	27.5	26.7	3%
80	551581	29.3	28.6	2%
85	586055	31.2	30.5	2%
90	620528	33.0	32.3	2%
95	655002	34.8	34.1	2%
100	689476	36.7	36.1	2%

Cuadro 116. Comparación de fuerzas, generadas por un actuador de 0.15 m.

Presión (Psi)	Presión (Pa)	Fuerza teórica (N)	Fuerza máxima práctica (N)	% Error	Duración de la fuerza (s)
0	0	0.0	0	0%	0
5	34474	1.8	0	100%	0
10	68948	3.7	0	100%	0
15	103421	5.5	0	100%	0
20	137895	7.3	0	100%	0
25	172369	9.2	6.9	25%	0.031
30	206843	11.0	13.1	19%	0.032
35	241317	12.8	22.3	74%	0.032
40	275790	14.7	27.2	85%	0.031
45	310264	16.5	30.6	85%	0.031
50	344738	18.3	32.1	75%	0.031
55	379212	20.2	34.3	70%	0.031
60	413686	22.0	36.1	64%	0.032
65	448159	23.8	37.5	57%	0.032
70	482633	25.7	38.1	48%	0.031
75	517107	27.5	38.7	41%	0.031
80	551581	29.3	39.2	34%	0.031
85	586055	31.2	39.7	27%	0.031
90	620528	33.0	39.8	21%	0.031
95	655002	34.8	39.8	14%	0.031
100	689476	36.7	39.8	9%	0.031

Figura 479. Comparación de fuerza teórica generada y fuerza práctica (máxima y estable) generada.



Línea de tendencia para las fuerzas máximas generadas por un actuador neumático de 0.15 m

$$F(P) = 22.37 * \ln(P) - 256.23 \quad (18)$$

F. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En el Cuadro 462 se puede observar las cargas que la ecuación 13 predice que levantarán los actuadores de 0.15 m , 0.20 m , y 0.25 m bajo las presiones correspondientes y, en base a esos datos, se eligió la carga real que mejor se le aproximara. Debido a que una simple observación es un criterio muy subjetivo y poco exacto para decidir si el actuador levantó o no la carga, se utilizó el porcentaje de error descrito en los cuadros 463, 464 y 465 como criterio imparcial para realizar la decisión. Esto siguiendo la lógica de que un actuador tiene una medida de longitud límite a la que puede llegar al ser activado, por lo que entre más cerca esté el actuador de llegar a esa medida base cuando tiene carga, mayor será la posibilidad de asegurar que si generó la fuerza necesaria para levantarla. De igual forma, para tener un recuento de datos más detallado y preciso, se realizaron mediciones de fuerza para el actuador de 0.15 m con un sensor de fuerza a distintas presiones, tal y como puede observarse en el inciso “Provenientes de las mediciones de fuerza”, en la sección “Resultados”. Lo primero que salta a la vista en este inciso es que hay dos fuerzas reportadas para un mismo actuador a una misma presión (cuadros 467 y 468), esto se explica al tomar en cuenta que el material del que está compuesto el tubo interno del actuador, tiene cierta resistencia a la elongación axial. Cuando el actuador es activado y se expande radialmente, al mismo tiempo se está contrayendo axialmente y la fuerza resultante de regresar a sus medidas originales se ve reflejada en los picos de fuerza descritos en el Cuadro 468 y Figura 491, y es descrito por la ecuación 18, la cual presenta un comportamiento no lineal (logarítmico). Según el Cuadro

468, el pico de fuerza inicial al activar el actuador es siempre de aproximadamente 0.030 s y queda al criterio del diseñador si el equipo donde se está implementando el actuador neumático flexible puede soportar esa fuerza en ese período de tiempo.

Es importante hacer la aclaración del porqué no se reportan mediciones de fuerza para actuadores de mayor longitud. Debido a las limitaciones del equipo de pruebas con que se contaba (sensor de fuerza) y el rango de fuerzas que manejan los actuadores de longitudes mayores a 0.15 m , se limitaron las mediciones de fuerza a un único actuador de 0.15 m para mantener consistencia con los demás ensayos de funcionamiento. Como puede observarse en el Cuadro 116, los actuadores de 0.20 m y 0.25 m generan fuerzas mayores a los 50 N , fuerza máxima tolerada por el sensor de medición de fuerza.

Ahora, si obviamos los picos de fuerza resultantes del comportamiento de los materiales y nos enfocamos en el estado estable de actuador, podemos discutir sobre la exactitud de la ecuación 13 contra el comportamiento real de un actuador. Analizando los porcentajes de error contenidos en el Cuadro 117, podemos ver que a partir de una presión de 310 kPa (45 psi) se tienen siempre un error igual o menor a un 5% y que, a presiones menores, se puede llegar hasta un 100% de error. Esto se atribuye a que a presiones muy bajas no se genera la suficiente fuerza para vencer la fuerza radial de elasticidad del tubo interno del actuador, esto nos brinda información valiosa sobre la presión mínima de operación para este tipo de actuadores. A pesar de este comportamiento, vemos que a presiones mayores a 276 kPa (40 psi) la fuerza radial de elasticidad se vuelve insignificante y ya no afecta a la fuerza final generada (errores menores al 5%). De acuerdo con José Ruiz (2012:53) el margen de error tolerado tiene una gran repercusión a la hora de fijar el tamaño de la muestra. En otras palabras, si el margen de error es muy permisivo, se necesitarán de un mayor número de muestras. José Ruiz (2012:55) establece que generalmente un margen de error del 5% dará un carácter conservador al estudio en cuestión y, consecuentemente, el nivel de confianza de los resultados será alto. Teniendo esta información en cuenta y conociendo que el estudio descrito por este trabajo es de carácter cualitativo por la naturaleza de sus muestras, podemos establecer para los ensayos de carga y mediciones de fuerza, un 5% de margen de error como conservativo y una buena estimación para decidir que el actuador, bajo las condiciones de operación dadas, en efecto levantó la carga. Con esto ya podemos sacar conclusiones sobre la veracidad del modelo matemático y que se necesita establecer una presión mínima de operación para que la ecuación 13 tenga validez.

Observando las figuras 484, 485 y 486, podemos visualizar el efecto que tiene la presión de operación en un actuador neumático flexible. Las gráficas contenidas en dichas figuras nos indican que, a mayor presión, mayor será la velocidad de respuesta de un actuador. Ahora, considerando los valores mostrados en el Cuadro 111, tenemos otra manera de apreciar este efecto: cuando la presión de operación llega a ser la ideal (según la ecuación 13) para que los actuadores de 0.15 m y 0.20 m levanten la carga de 2.5 kg , se tiene un tiempo de respuesta de 120 ms y 200 ms respectivamente. Al aumentar la presión de operación y conservar la misma

carga, el tiempo de reacción mejoró en el rango de las decenas de milisegundos, tiempo valioso para aplicaciones sensibles a la respuesta de sus actuadores. Regresando al Cuadro 111, podemos ver la diferencia en magnitud de las mejoras de tiempo de reacción para los tres actuadores: para el actuador de 0.15 m es de 12 ms , para el actuador de 0.20 m es de 74 ms y para el actuador de 0.25 m , es de 128 ms . Si vemos el Cuadro 116, en teoría, la ecuación 13 predice que un actuador de 0.25 m a una presión de operación de 690 kPa (100 psi), puede generar una fuerza de aproximadamente 100 N , equivalente a 10.5 kg , una carga 76% mayor a la actual de 2.5 kg . Realizando la misma comparación, el actuador de 0.15 m está levantando una carga 32% mayor y el actuador de 0.20 m , una carga 63% mayor. Gracias a estas observaciones podemos decir que la idea de, a mayor presión mayor velocidad de reacción, es válida cuando la carga real es mucho menor a la carga teórica obtenida por la ecuación 13. Una explicación para esto se encuentra al entender que cuando se aplica una mayor presión, el actuador está generando una fuerza mayor a la esperada, la diferencia entre la fuerza utilizada y la generada resulta en un aumento en la velocidad de reacción. Para contar con una herramienta que ayude a predecir este comportamiento de manera más exacta, se obtuvieron tres líneas de tendencia polinómica de grado 3 con la herramienta de líneas de tendencia de Excel (ecuaciones 15, 16 y 17). Al analizar y comparar las tres ecuaciones, nos damos cuenta que la primera de ellas (ecuación 15) no guarda una relación justificable con las otras dos: el cambio en magnitud de sus coeficientes y constante no pueden relacionarse de una manera apropiada. Por otro lado, al ver las ecuaciones 16 y 17, salta a la vista un comportamiento que puede ser relacionado al cambio de longitud que existe entre ambos actuadores: El primer coeficiente de $-3E^{-18}$ se mantiene constante sin importar el cambio en la longitud; El segundo y tercer coeficiente cambian en una unidad ($1E^{-12}$ y $1E^{-6}$, respectivamente); La constante cambia en aproximadamente 1 unidad (0.12). Conociendo este comportamiento, podríamos definir una nueva ecuación para describir el comportamiento de un actuador en el tiempo, en función de su presión y largo, para actuadores de 0.20 m de largo en adelante:

$$t(P) = (-3 * 10^{-18}) * P + [(4+n) * 10^{-12}] * P - [(2+n) * 10^{-6}] * P + 0.65 + (0.1 * n) \quad (19)$$

Donde P , es la presión de operación del actuador; la variable $n = 0, 1, 2, 3 \dots$, donde $n=0$ corresponde a un actuador neumático flexible de 0.20 m de largo, $n=1$ corresponde a un actuador neumático flexible de 0.25 m de largo, $n = 2$ corresponde a un actuador neumático flexible de 0.30 m de largo, y así sucesivamente. Ahora, la ecuación 15, sería la que describe el comportamiento en el tiempo para un actuador neumático flexible de 0.15 m de largo o menor. Con las ecuaciones 6 y 7, se pueden encontrar fácilmente las equivalencias de las ecuaciones 15 y 19, cuando la variable de diseño no es la longitud L .

Observando el Cuadro 466 y analizando la ecuación 13, notamos algo curioso, cuando la presión se mantiene constante el largo del actuador es lo que rige la generación de fuerza. Comportamiento que encaja perfectamente con lo observado en los ensayos de carga y tiempo, ya que el actuador de 0.15 m no fue capaz de levantar una carga de 2.5 kg a cierta presión, cuando los otros dos actuadores si lo consiguieron. Conociendo que una vez construido el actuador, las dimensiones del mismo no pueden variar de manera alguna y que únicamente se podrá variar la presión de operación, es conveniente relevar la definición de la

generación de la fuerza máxima, a las medidas constantes en el actuador (largo, diámetro o ángulo de la malla). Con esto conoceríamos con antelación que el actuador en cuestión, puede llegar hasta una fuerza máxima y sólo tendríamos que ajustar la presión de operación para obtener la fuerza necesaria o para obtener un tiempo de reacción ideal.

La modelación matemática deducida (ecuación 13) toma en cuenta el efecto que tiene la malla externa en la longitud del actuador neumático flexible, sin embargo, se desconoce si ésta tiene algún otro efecto en el funcionamiento. Al observar las figuras 487, 488 y 489, notamos inmediatamente que la falla catastrófica del actuador ocurre siempre en la vecindad inmediata de donde la malla se encuentra rasgada. Este comportamiento es totalmente contrario a cuando la malla se encontraba en perfectas condiciones: ninguno de los tres actuadores falló durante ensayos previos (de tiempo, carga y mediciones de fuerza) donde se utilizaron presiones de operación mayores a 480kPa (70 psi). Ya que ninguno de los tres actuadores (con la malla rasgada) falló durante presiones menores a 480kPa (70 psi), se puede decir que la longitud no influye en una falla catastrófica y que la misma depende únicamente de la presión actual de operación y la condición física de la malla (rasgada o no). Conociendo estos resultados y observando la Figura 490, podemos inferir que una funcionalidad de la malla es la protección del tubo interno del actuador, ya que la misma restringe la elongación radial del tubo interno y evita que éste supere sus límites elásticos. Juntando toda esta información acerca de las posibles fallas que pueden ocurrir, finalmente se puede definir una presión de operación segura máxima de 415 kPa (60 psi) con la que se puede trabajar aún con la malla rasgada. No obstante, es importante tomar en cuenta que se encontró una presión de operación mínima durante las mediciones de fuerza: 310 kPa ó 45 psi y comparando la presión máxima de operación segura, obtenemos un rango de operación de 105 kPa (15 psi). Con este rango se puede concluir sobre la utilidad de un actuador neumático flexible con malla rasgada.

Refiriéndonos a la sección AA del Marco teórico, sabemos que el comportamiento analizado por la ecuación 13 está idealizado de gran manera. Esto podría influir en aplicaciones más delicadas donde se requiere de una exactitud muy alta a la hora de ejercer una fuerza, tanto en el estado transitorio del actuador, como en su estado estable. Una manera de apreciar este fenómeno es haciendo la analógica hacia la modelación de un diodo de uso general: Si comparamos el modelo ideal contra el modelo batería en una aplicación básica como la que es la protección contra corrientes de descarga, sabemos que el modelo ideal es suficientemente exacto para describir el comportamiento del diodo. Pero si el circuito donde el diodo se está implementando es sensible a los cambios de voltaje, el modelo ideal deja de ser útil y tendríamos que pasar a utilizar un modelo más exacto, el modelo batería. Lo mismo sucede con el modelo matemático descrito por la ecuación 13, cuando el usuario necesite de una predicción más exacta del comportamiento de un actuador neumático flexible, puede que esta ecuación deje de serle útil. Por ello es tan importante la ecuación que describe el comportamiento de los picos de fuerza (ecuación 18), la duración de los mismos y las que predicen el tiempo de reacción (ecuaciones 15 y 19): si se tiene una aplicación donde es crítico el tiempo de reacción

del actuador o si no se conoce la sobrelevación en la fuerza generada, se puede dañar irreversiblemente el equipo en el que se está utilizando el actuador. Cuando trabajan en conjunto las ecuaciones 13, 15, 18 y 19, y conociendo el tiempo de duración promedio de los picos de fuerza, el modelo matemático con el que se está trabajando al final es mucho más descriptivo que cuando se maneja únicamente la ecuación 13. Sin embargo, si volvemos a la analogía del diodo, puede que el usuario sólo le interese la fuerza generada final, o un pico de fuerza determinado, o un tiempo de reacción específico. Para cualquiera de estos casos, las ecuaciones anteriores pueden ser utilizados por si solas y ofrecer un modelo suficientemente bueno.

XII. CONCLUSIONES GENERALES

- Se cumplió con el objetivo principal del megaproyecto, ya que se desarrolló un animatrónico con un costo considerablemente menor al precio de venta de una atracción con características similares.
- Se desarrolló un animatrónico capaz de emular el comportamiento de una calavera animatrónica encerrada en un cofre pirata.
- Se diseñaron, manufacturaron y ensamblaron mecanismos que emularan los principales movimientos de la cabeza humana, basándose los mismos en mecanismos existentes de cabezas robóticas/animatrónicas humanoides; y utilizando servomotores como actuadores para realizar los distintos movimientos de los mecanismos.
- Se diseñó, manufacturó y ensambló un mecanismo capaz de realizar la emulación de la salida/entrada de un cofre pirata por parte de la calavera animatrónica realizada, utilizando un actuador lineal eléctrico para realizar el movimiento del mecanismo.
- Se diseñó, manufacturó y ensambló un mecanismo capaz de realizar la apertura y cierre de un cofre pirata utilizando cuatro servomotores en paralelo para realizar el movimiento del mecanismo implementado.
- Se utilizaron como procesos de manufactura la impresión 3D y el corte láser en la realización de los distintos mecanismos del animatrónico, utilizando ABS como material de trabajo para la impresión 3D, y ertalón y MDF como materiales de trabajo para el corte láser.
- Se diseñó e implementó un sistema de control para poder manejar todos los actuadores de los distintos mecanismos del animatrónico, y así poder realizar el movimiento de los mismos, utilizando un microcontrolador AtMega 1280 como controlador lógico, en su presentación en un Arduino Mega.
- Se implementó un sistema de control a lazo abierto para manejar los servomotores del animatrónico, ya que se pudo comprobar que el sistema formado entre el controlador lógico y los actuadores es estable.
- Se diseñó e implementó un sistema de potencia capaz de alimentar a todos los actuadores del sistema y al sistema de control del animatrónico.
- Se utilizaron dos fuentes de alimentación para proveer suministro de energía a todos los componentes del sistema, para aislar la alimentación de los actuadores y la del sistema de control del animatrónico.
- Se realizó un aislamiento de señales de control y alimentación de actuadores por medio de un sistema formado por optoacopladores.
- Se logró construir un prototipo funcional para el torso del animatrónico de bajo costo ya que este estuvo por debajo de los Q5,000 sin incluir costos de impresión 3D y corte láser.
- Se logró modificar el diseño del humanoide de plataforma abierta Inmoov para adaptarlo a las necesidades del proyecto y al actuador utilizado.
- El torque requerido para hacer girar el torso animatrónico considerando las cargas de los brazos y vencer la fricción entre superficies fue de 11.18 N*m.
- Con el mecanismo de tornillo sinfín se redujo el torque requerido para los actuadores a 3.72 N*m.

- En el análisis estático de la estructura del torso modelado con MDF y ABS se obtuvo un factor de seguridad de 15, lo que nos asegura que la estructura soporta las fuerzas y momentos generados por los brazos.
- En el análisis estático de mecanismo de rotación tornillo sinfín y engrane modelado con ABS se obtuvo un factor de seguridad 1.72.
- Se logró manufacturar y construir el torso animatrónico utilizando una cortadora láser y una impresora 3D.
- Si se toma en cuenta el factor precio en la selección de actuadores la mejor opción es el Spektrum S6250, de lo contrario, si el factor precio no es tomado en cuenta la mejor opción es el Dynamixel MX-106T.
- Se logró implementar un sistema de control de lazo cerrado con un controlador proporcional para girar el torso a un ángulo deseado.
- Se logró emular el movimiento de rotación del torso, permitiendo una rotación del torso entre 0° y 170° grados.
- Se investigó, analizó y seleccionó el diseño existente de un brazo humanoide de código abierto *Inmoov*, que se adaptaba a las necesidades del proyecto y cumplía con todos los objetivos trazados para el módulo.
- El proyecto del *Poppy Robot* era un proyecto que se enfocaba más en la enseñanza de la teoría de la robótica a través de las ciencias de la computación, ya que era un diseño simplificado de la anatomía humana y era fácil de implementar.
- El proyecto del *Poppy Robot* no tenía un su diseño mecanismos implementados para los movimientos; en cambio tenía actuadores situados en tal posición que hacían articulaciones esféricas que requieren que los actuadores administren todo el torque, por lo que no fue más una opción, además que su estructura era manufacturada por impresión 3D con tecnología SLA, la cual no se tenía disponibilidad y su manufactura era más cara.
- El proyecto *Inmoov* estaba diseñado para manufacturarlo por medio de impresiones 3D con la tecnología FDM y con impresoras 12x12x12 de volumen de impresión y en su diseño implementaba mecanismos para los movimientos de las articulaciones de los brazos por lo que fue seleccionado porque disminuían en trabajo de los actuadores y su diseño contemplaba cuidaba más la anatomía humana.
- La fuerza de los dedos se determinó por un sensor Pasco® de fuerza, donde se midió la tensión mínima necesaria para producir movimiento en cada uno de ellos y se determinó que el dedo que mayor torque necesitaba era el pulgar un torque 9 kgf*cm, por lo que en base a este torque se seleccionaron todos los actuadores.
- Se intentó implementar un mecanismo con un resorte y una polea en los dedos, pero se descartó porque el actuador requería mayor torque que el necesario para accionar el movimiento del dedo para tensionar el hilo así que no obteníamos la posición deseada.

- Se hicieron pruebas con varios hilos y se determinó que el mejor era el hilo de Nylon que soportaba, según el proveedor, hasta 50N de fuerza sin romperse, el cual es mayor que la tensión promedio de los dedos.
- No se hizo análisis de esfuerzos para los dedos ya que el objetivo del proyecto no era hacer una prótesis donde tuviera que soportar diferentes cargas, sino emular el movimiento humano.
- Se hizo un análisis de fuerzas para cada mecanismo y en cada sección importante del brazo (antebrazo, bíceps y hombro) para determinar las cargas a las que estarían sometidos los actuadores en su punto crítico y la estructura.
- En el análisis de fuerzas para el mecanismo de tornillo de potencia se determinó que la fuerza crítica, tomando en cuenta un factor de seguridad en la carga de dos, sería de de 10.81N en el brazo con mayor carga; así como un torque de entrada 18.73kgf*cm.
- Se determinó que la articulación del hombro tendría una carga máxima crítica de 18.34 N por la suma de cargas de los demás mecanismos y estructura; y necesitaría un torque de entrada de 11.22 kgf*cm asumiendo el mecanismo tendría una pobre eficiencia del 40%.
- El análisis de esfuerzos para la estructura del antebrazo dio como máximo 3.74 MPa y un factor de seguridad de 9.23; la estructura del bíceps dio como máximo 19.39 MPa y un factor de seguridad de 12.89; la estructura del hombro dio como máximo 8.2 MPa y un factor de seguridad 4.49.
- El análisis de esfuerzos para el mecanismo de tornillo de potencia dio como máximo 27.34 MPa y un factor de seguridad de 1.32; el mecanismo de tornillo sin fin tiene un máximo de 6.64 MPa y un factor de seguridad de 5.42.
- El servomotor HS-805BB cumple con las características necesarias para los mecanismos de codo y hombro, y tiene un precio más accesible que el Dynamixel MX-106T por lo que puede ser implementado en el brazo.
- Se realizaron las piezas del brazo animatrónico en su totalidad utilizando impresión 3D por su bajo precio y facilidad de manufactura para obtener bastantes detalles en las piezas. El material seleccionado fue el PLA por sus propiedades mecánicas y su facilidad de manufacturado.
- Se construyeron dos brazos animatrónicos de un pirata que emula los movimientos de todos los dedos un una mano y un garfio en otra, pronación y supinación en la muñeca de los dos, así como flexión y extensión en codos y hombros.
- Se concluye que el costo de los brazos animatrónicos para la universidad fue de Q.3750.00, el cual comparado con los precios del mercado es una implementación de prototipo de muy bajo costo.
- Se logró establecer una base de datos de palabras y frases a reconocer por el animatrónico. Se decidió incluir frases comúnmente utilizadas en una interacción humana para que el animatrónico pudiera sostener una pequeña conversación.

- Se seleccionó el sensor Kinect, debido a su facilidad de uso y basta documentación que existe al respecto, además de estar constituido por los instrumentos básicos necesarios para ser la red de sensores de este módulo.
- Se logró un porcentaje de efectividad del 57% con un micrófono unidireccional y un 33.3% con un micrófono omnidireccional en las pruebas de reconocimiento de audio y voz.
- Se determinó que la calidad de captura e interpretación de datos de audio es directamente proporcional a la distancia a la que el usuario se encuentre del Kinect.
- Se concluyó que el mayor promedio de confiabilidad en las pruebas de reconocimiento de voz fue a 1.2 metros de distancia del sensor Kinect, la distancia más cercana utilizada en dichas pruebas.
- Se estableció que el rango de distancia con la que se consigue un mejor reconocimiento de gestos está entre 1.2 y 2 metros, con un porcentaje de efectividad mayor al 90%. El rango para conseguir una mejor realización de reconocimiento de audio y gestos es de 1.2 a 2 metros de distancia entre el Kinect y el usuario. Se recomienda estar ubicado aproximadamente a 1.5 metros.
- Se estableció que aquellos usuarios que tengan una medida de distancia entre hombros menor a 100 píxeles serán considerados “niños” y aquellos que tengan una medida mayor serán considerados “adultos” por el animatrónico.
- Se logró implementar un módulo de potencia capaz de entregar 30 amperios de corriente, la corriente máxima consumida por los actuadores del animatrónico es de 8.33 amperios. Sería posible agregar alrededor de 3 veces más el número de actuadores en un animatrónico haciendo uso de este módulo de potencia.
- Se logró crear un ambiente libre de ruido eléctrico para las señales de control enviadas a los motores MG996R y MX-106T usando optoacopladores de propósito general 4N25 y de alta velocidad 6N137.
- Se logró realizar movimientos simultáneos en las extremidades y torso del animatrónico por medio de algoritmos implementados en la plataforma Arduino, la cual no soporta el uso de hilos o multitareas.
- Se logró unificar el módulo de reconocimiento de gestos y audio con los módulos de brazos y torso del animatrónico por medio de algoritmos implementados en Matlab y Arduino, de tal manera que los estímulos detectados por el módulo de reconocimiento obtuvieran una respuesta de parte del animatrónico.
- Para predecir la fuerza, en estado estable, de un actuador neumático flexible se puede utilizar la siguiente ecuación:

$$F(L, P) = \left(\frac{P * b^2}{4 * \pi} \right) * \left(3 * \frac{L^2}{b^2} - 1 \right) / n \quad (12)$$

Donde la variable, P , es la presión de operación en pascales; La variable, L , es la longitud del actuador, de férula a férula, dada en metros; la variable, n , es el número de vueltas de una fibra de la malla externa; y la fuerza resultante está dada en newtons. La variable, b , se define de la siguiente manera:

$$b = D * \pi * \sin \theta \quad (7)$$

Donde la variable, D , es el diámetro del tubo interno del actuador neumático flexible dado en metros; y la variable, θ , es el ángulo, dado en grados, formado entre una fibra de la malla externa y la horizontal formada por el tubo interno.

- Para predecir la fuerza máxima, en estado transitorio, de un actuador neumático flexible se puede utilizar la siguiente ecuación:

$$F(P) = 22.37 * \ln(P) - 256.23 \quad (18)$$

Donde la variable, P , es la presión de operación en pascales y la fuerza resultante está dada en newtons. El tiempo de duración de esta fuerza será siempre de 0.030 s.

- Para predecir el tiempo de reacción de un actuador neumático flexible de longitud igual a 0.15 m o menor, se puede utilizar la ecuación:

$$t(P) = (-5 * 10^{-18}) * P^3 + (8 * 10^{-12}) * P^2 - (5 * 10^{-6}) * P + 1.093 \quad (15)$$

Donde la variable, P , es la presión de operación en pascales y el tiempo resultante está dado en segundos.

- Para predecir el tiempo de reacción de un actuador neumático flexible de longitud mayor a 0.15 m, se puede utilizar la ecuación:

$$t(P) = (-3 * 10^{-18}) * P + [(4 + n) * 10^{-12}] * P - [(2 + n) * 10^{-6}] * P + 0.65 + (0.1 * n) \quad (19)$$

Donde la variable, P , es la presión de operación en pascales y el tiempo resultante está dado en segundos.

- La malla externa que posee un actuador neumático flexible protege al mismo de fallar catastróficamente a presiones mayores a 480 kPa (70 psi).
- Cuando la malla externa de un actuador neumático flexible se encuentra rasgada, la presión de operación máxima es de 415 kPa (60 psi).
- La presión de operación mínima para cualquier actuador neumático flexible es de 310 kPa ó 45 psi.

XIII. RECOMENDACIONES GENERALES

- Se recomienda a la Universidad del Valle de Guatemala realizar la divulgación pertinente del proyecto por los distintos medios posibles, ya que es un trabajo que refleja el alcance de lo que se puede lograr por los guatemaltecos, un proyecto que rompe barreras y posee el atractivo mediático para atraer a Instituciones que tengan una visión en línea con la de la Universidad a participar en este tipo de proyectos.
- Se recomienda la búsqueda de procesos de manufactura diferentes a los presentados en este proyecto, para ampliar la gama de materiales a utilizar y mejorar la calidad de los distintos mecanismos del animatrónico.
- Se recomienda desarrollar sistemas que permitan ocultar el sonido emitido por los distintos actuadores de proyectos de esta índole, ya que le resta realismo al movimiento del animatrónico.
- Se recomienda estudiar la utilización de actuadores hidráulicos y neumáticos, para reducir la complejidad de algunos mecanismos, y facilitar el ensamblaje del animatrónico.
- Se recomienda estudiar la utilización de una mini computadora como complemento del proyecto, ya que permite realizar procesos más complejos comparados con los que se pueden llevar a cabo con un microcontrolador.
- Se recomienda la implementación de una mayor cantidad de grados de libertad en proyectos de esta línea, para aumentar el realismo del animatrónico.
- Se recomienda realizar otro análisis de esfuerzo y actuadores utilizando la geometría del brazo exacta y realizando la simulación con el torso y los brazos ensamblados para tener obtener con más exactitud la fuerza que generan los brazos sobre la estructura, ya que éstas fueron aproximadas como barras circulares y distribución homogénea.
- Se recomienda implementar el movimiento de inclinación lateral del torso para hacer el movimiento del animatrónico más realista y lograr emular rutinas que se apeguen más al movimiento del ser humano.
- Se recomienda rediseñar el torso para utilizar menos ensambles en la construcción ya que estos elementos son puntos de concentración de esfuerzos.
- Se recomienda cambiar el proceso de manufactura de impresión 3D por un proceso más eficaz, con mayor precisión de manufacturado ya que la impresión 3D con ABS requiere control de la temperatura del ambiente de trabajo, si la temperatura no es controlada surgen problemas como el pandeo en los bordes de la pieza o mala adherencia entre las capas del filamento, además la incertidumbre de la impresora utilizada era de 0.2 mm y hubo necesidad de maquinarse o ajustar las piezas después de imprimirlas para poder ensamblarlas; y por último la impresión 3D es un proceso que requiere mucho tiempo.
- Se recomienda utilizar otros actuadores para la articulación del hombro y codo del brazo animatrónico de los que están listados en la tabla de selección de actuadores, ya que el costo total del proyecto puede ser menor si seleccionamos otros actuadores.

- Se recomienda si se va a manufacturar en 3D, utilizar otro material de impresión si el animatrónico estará en ambientes de clima no controlados, ya que, por las propiedades del material, este tiende a deformarse en ambientes donde existe temperatura elevada.
- Se recomienda utilizar otro proceso de manufactura para el brazo animatrónico, ya que aumentaríamos la calidad de acabado superficial y tiempo de vida útil de cada una de las piezas.
- Se recomienda cambiar el diseño en los ensamblajes de las piezas del brazo, ya que por su alta concentración de esfuerzos tienden a fallar.
- Se recomienda hacer una alianza estratégica con entidades no gubernamentales que permitan el desarrollo de la animatrónica en Guatemala por medio de financiamiento de más proyectos como este a la Universidad Del Valle para que crezca la investigación en el tema y permita hacer un avance tecnológico considerable en el tema.
- Se recomienda se divulgue por la universidad este proyecto a diferentes medios de comunicación (prensa, televisión, internet y demás medios que se consideren pertinentes) con el fin de dar a conocer el concepto de animatrónica en Guatemala y que existan demás universidades, colegio o empresas privadas que empecemos a desarrollar esta tecnología a nivel nacional.
- Se recomienda utilizar sensores individuales, cámara RGB, cámara IR y arreglo de micrófono, con el fin de aprovechar al máximo la potencia y los recursos de los mismos. Esto en el momento de realizar una implementación real y no solo en un prototipo.
- Se recomienda la implementación de nuevas técnicas para la reducción del ruido y mejorar la confiabilidad y calidad de la recaudación de datos auditivos para el reconocimiento de voz.
- Se recomienda la ampliación de la base de datos de gestos a reconocer por el animatrónico para lograr una mejor interacción con el usuario.
- Se recomienda utilizar otro algoritmo de identificación del usuario que incluya otros parámetros como proporciones de medidas dentro del mismo cuerpo para lograr una mejor distinción entre “niño” y “adulto”.
- Se recomienda utilizar voces distintas para la interacción con niños y adultos con el fin que los niños se sientan más cómodos interactuando con el animatrónico.
- Para futuros trabajos encargados en el control de motores de un animatrónico se recomienda usar una plataforma con procesador integrado, como lo es la Raspberry Pi, ya que estas son capaces de realizar varias tareas simultáneamente, cualidad que facilitaría y optimizaría todo el proceso de control.
- Se recomienda utilizar una sola plataforma para la recepción de instrucciones y transmisión de comandos para minimizar la cantidad de dispositivos y enlaces necesarios usados en el control del animatrónico.
- Se recomienda utilizar el mismo tipo de motor servo, para evitar el manejo de distintos modos de comunicación que pueden causar conflictos al realizar el control del animatrónico.
- Los modelos matemáticos presentados en la sección de Conclusiones fueron deducidos a partir de datos experimentales. Por la naturaleza del origen de los modelos puede que ellos no tengan la exactitud

necesaria para aplicaciones más delicadas y se recomienda encontrar las ecuaciones finales de forma analítica y, en base a ellas, ajustar las que se obtuvieron empíricamente.

- Adicionalmente, debido a las limitaciones mencionadas anteriormente, se recomienda seguir los siguientes pasos para avanzar en la investigación del comportamiento de los actuadores neumáticos flexibles:
 - Encontrar un sensor adecuado que ayude a caracterizar dinámicamente al actuador. Como primera opción se recomienda un acelerómetro/giroscopio para tomar datos en tiempo real sobre cómo cambia la velocidad de accionamiento respecto al tiempo y al cambio de presión. De esta manera se podría obtener ecuaciones más precisas sobre el comportamiento en el tiempo de este tipo de actuadores.
 - Para obtener información sobre el cambio en la longitud de un actuador neumático flexible, se podría utilizar una cámara de alta definición y velocidad para encontrar la forma de relacionar el cambio en las dimensiones de estos actuadores, con respecto al tiempo y a la presión actual de funcionamiento.
 - En cuanto al análisis matemático, se recomienda hacer un desarrollo que tome en cuenta las características físicas de los elementos que constituyen al actuador. Según las mediciones de fuerza presentados, existe una influencia muy importante en la generación de fuerza por parte de los materiales, y es crítico tomarlo en cuenta en las ecuaciones de generación de fuerza.
 - Para poder proseguir con los ensayos destructivos se necesita de una fuente de aire comprimido con mayor capacidad de trabajo. Esto debido a que con el compresor de aire con el que se cuenta en el Departamento, no posee la presión máxima necesaria para poder encontrar el punto de operación de falla de los actuadores. Esta información es de suma importancia a la hora de intentar utilizar estos elementos en ambientes industriales donde una falla catastrófica es peligrosa para los operadores de las maquinas.
 - Realizar un mayor número de pruebas de caracterización donde se utilicen diferentes materiales, diámetros de tubo interno y diferentes mallas externas. Con datos de estos experimentos se podrá respaldar de una manera más sólida, las ecuaciones que se deduzcan en los análisis teóricos.
 - Otra opción factible para un análisis más detallado de las propiedades físicas de los actuadores, es una simulación de ellos en el software Inventor.
 - Por último, se necesita de un sensor de fuerza con capacidades de medición mucho mayores al utilizado en este trabajo. Con esto, ya se podrán realizar mediciones de fuerza más exactos para cualquier actuador neumático flexible que se desee.

XIV. BIBLIOGRAFÍA

Abhijit, Jana. 2012. *Kinect for Windows SDK Programming Guide*. Birmingham: Packt Publishing. 366 págs.

Acero, A. 2013. *Planos de movimientos primarios y secundarios del cuerpo humano*. <http://g-se.com/es/biomecanica/blog/planos-de-movimiento-primarios-y-combinados>. [09/29/2016]

Actuadores-Manos. http://robots-argentina.com.ar/Actuadores_manos.htm. [22/07/16].

Ajedrez de Ataque. 2004. *Ajedrez de Ataque*.
<http://www.ajedrezdeataque.com/04%20Articulos/00%20Otros%20articulos/Computadoras/Automatas/Turco.htm> [22/07/16]

amici. 2012. amici. <http://www.amicivirtual.com.ar/Anatomia/16CabezaCuello.pdf>. [22/07/16]

Aprendamos de tecnología. 2010. *Aprendamos de tecnología*.
<https://aprendemostecnologia.org/maquinas-y-mecanismos/mecanismos-de-transformacion-del-movimiento/> [22/07/16]

Arduino. Arduino MEGA 2560 & Genuino MEGA 2560.
<https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardMega2560> [23/09/16]

Arduino. *Arduino uno*. <http://www.arduino.cc/es/> [05/06/16]

Arduino. *Serial*. <https://www.arduino.cc/en/Reference/Serial> [23/09/16]

Asociación de Amigos del País. 2004. *Diccionario Histórico Biográfico de Guatemala*. Guatemala: Amigos del País.

Avago Technologies. 2015. *APDS-9960*. United States. Avago Technologies. 38 págs.

Axelson, Jan. 1998. *Serial Port Complete*. Wisconsin, USA: Lakeview Research. 9 págs. [23/09/16]

Ayuda de SOLIDWORKS. 2010. *Criterio de máxima tensión de Von Misses*. [10/10/16]

B.U. Maheswari. *Animatronics and Multi-Disciplinary Technologies*. International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering, vol 5, núm 3, marzo 2015, pp. 1260-1262

Besinga, Ronald Willem. 2009. *Ermicroblog, Microcontrollers and Electronics Project Blog*. <http://www.ermicro.com/blog/?p=771> [14/09/16].

Blasco, J. L. 2010. <https://tecnoseluis.files.wordpress.com/2010/10/teoria-mecanismos.pdf> [22/07/16]

Borenstein, Greg. 2012. *Making Things See*. Canada: O'Reilly Media. 417 págs.

BOVE-AG S.L. *Coefficiente de fricción de plásticos mecanizables*. http://www.plasticos-mecanizables.com/plasticos_coeficiente_friccion.html [10/05/2016]

Budynas, Richard G., J. Keith Nisbett, and Joseph Edward Shigley. 2011 *Shigley's Mechanical Engineering Design*. New York: McGraw-Hill.

Budynas, Richard; J. Keith Nisbett. 2008. *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*. 8a ed. México, D.F.: McGraw-Hill Interamericana. 1059 págs.

Búrbano, M. 2016. *Controladores Lógicos. Introducción a los controladores lógicos programables*. Guatemala, Guatemala, Guatemala: Universidad del Valle de Guatemala.

C. Perez. 2016. *Pronación y supinación*. Anatomía, salud y divulgación al alcance de tu mano. <http://fisioactividad.com/2013/01/pronacion-supinacion.html> [11/08/16].

C.A. Hernandez; J.A. Manzi; D.A. Ruiz; J.C. Uricoechea. 2007. *Diseño y construcción de un animatrónico de movimiento facial, mime face*. Tesis Universidad de San Buenaventura. 151 págs.

C.A. Quinayás. 2010. *Diseño y construcción de una prótesis robótica de mano funcional adaptada a varios agarres*, Tesis de maestría de la Universidad de Cauca. 94 págs.

CAE. 2013. ANSYS. [10/10/16]

Castro, A. 2013. *Anatolandia*. <http://www.anatolandia.com/2013/10/craneo-mandibula-articulacion-temporomandibular-musculos-cabeza.html> [22/07/16]

Castro, A. 2014. *Computer hoy*. <http://computerhoy.com/noticias/hardware/que-es-raspberry-pi-donde-comprarla-como-usarla-8614> [22/07/16]

Chajón, A. 2014. *Viaje a Guatemala*. http://www.viajeaguatemala.com/el-castillo-de-san-felipe#.V_ShdB9600 [22/07/16]

Chernova, S. 2010. *Worcester Polytechnic Institute*. <https://web.wpi.edu/Pubs/ETD/Available/etd-050112-072212/unrestricted/Fitzpatrick.pdf> [22/07/16]

Colegio Glen Doman. 2015. *Las articulaciones*. <http://www.colegioglenndoman.edu.co/CLASES%20INICIAL%201%202013/ciencias%20clase%206%20Nicolas%202013.htm> [22/07/16]

CubeX-3D-printman. 2013. *PLA vs. ABS printing*. <http://cubex3dprinting.blogspot.com/2013/09/pla-vs-abs-printing.html> [09/24/16]

D.D. Wilkinson, M. V. Weghe, Y. Matsuoka. 2003. *An Extensor Mechanism for an Anatomical Robotic Hand*. Robotics Institute and Mechanical Engineering, Carnegie Mellon University, Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics & Automation Taipei, Taiwan, September 14-19, 2003.

David Monterde. 2015. *Introducción: Qué es la impresión 3D*. <http://elfilamento.com/2015/04/18/guia-principiantes-introduccion-que-es-la-impresion-3d/> [09/23/16]

deGuate. 2014. *deGuate*. http://www.deguate.com/artman/publish/turismo_caribe/Castillo_de_San_Felipe_2703.shtml#.V_ShfOB9600 [22/07/16]

E. Juan. 2015. *La muñeca*. CIR Ortopédica y traumatología. Disponible en internet. http://www.traumazaragoza.com/traumazaragoza.com/Documentacion_files/Biomecánica%20de%20la%20Muñeca.pdf [14/09/16].

EcuRed. 2014. *EcuRed*. https://www.ecured.cu/Corte_por_1%C3%A1ser [22/07/16]

Electrical4u. *Theory and Working Principle of Servo Motor*. <http://www.electrical4u.com/servo-motor-servo-mechanism-theory-and-working-principle/> [04/10/16]

Electrónicos Caldas. *MG996R High Torque Metal Gear Dual Ball Bearing Servo*. http://www.electronicoscaldas.com/datasheet/MG996R_Tower-Pro.pdf [23/09/16]

- Electrónicos, N. 2015. *Convertidores DC/DC – Buck*
<https://nomadaselectronicos.wordpress.com/2015/04/12/convertidores-dcdc-buck/> [22/07/16]
- Eriksen, María de Lourdes, *et. al.* 2005. *Anatomía humana*. México. UNAM. 25 págs.
- Escobar, C. 2016. *Tipos de Impresoras 3D*. <https://impresoras3d.com/blogs/noticias/102883975-tipos-de-impresoras-3d> [10/03/2016]
- Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Industrial de Zaragoza. 2014. *Autómatas en la historia*.
http://automata.cps.unizar.es/Historia/Webs/automatas_en_la_historia.htm [22/07/16]
- Estructura ósea de la mano* <http://www.juntadeandalucia.es/averroes/~29701428/salud/mano.gif>
 [14/07/16]
- Eveliux. 2002. *El ABC de las Telecomunicaciones*. <http://www.eveliux.com/mx/Tecnologias-de-Comunicacion-Inalambrica.html> [22/07/16]
- F. García, J. Martínez R. Saltaren, A. Guerrero, J. López. 2001. *Diseño mecatrónico de un dedo antropomorfo Parte I: Mecánica*, Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática, Universidad Politécnica de Cartagena.
- Fernández, Estefanía. 2012. *Control de software educativo mediante Kinect de Microsoft*. Tesis Universidad Carlos III de Madrid. 115 págs.
- FLIR Systems. *How does an IR camera work?* <http://www.flir.com/about/display/?id=41536> [20/09/16]
- Flores, Jhonnatan. 2013. *Implementación de reconocimiento facial y gesticulaciones para el manejo y control de proyecto RESA*. Tesis Instituto tecnológico de Tehuacán. 92 págs.
- Frometa Ruenes, Julio. 1979. *Reparación de piezas típicas de las máquinas herramientas*. [05/10/16]
- G.L. Taylor; R.J. 1995. Schwart, *The Anatomy and Mechanics of the Human Hand*, Artificial Limbs, Vol.2, pp.22-35.
- Giorio, Clemente; M. Fascinari. 2013. *Kinect in Motion - Audio and Visual Tracking by Example*. Birmingham: Packt Publishing. 98 págs.

González, M. 2009. *Diseño estático de un convertidor DC/DC*. 14 pags.

González, V. 2002. *Intef*.

http://platea.pntic.mec.es/vgonzale/cyr_0204/ctrl_rob/robotica/sistema/actuadores.htm#neumaticos
[22/07/16]

Gutiérrez López, Ricardo. *Mecánica Técnica, Elementos de Máquina*. [05/10/16]

H.J Rouviere; A.K. Delmas. 2005. *Anatomía humana descriptiva, topografica y funcional*, Elsevier, 11 edición, pp. 309-311.

Heenan, Brandon; Greenberg, Saul; Manesh, Setareh; Sharlin, Ehud. 2014. *Designing Social Greetings in Human Robot Interaction*. Alberta, Canada: Department of Computer Science, University of Calgary. http://utouch.cpsc.ucalgary.ca/docs/HRIGreetings_DIS.pdf [27/10/16]

Hernández Espitia, C. A. 2011. *Research Gate*.

https://www.researchgate.net/publication/261028080_Animatronica_Disenio_mecatronico_para_el_entrenimiento_MIME_FACE_un_ejemplo_de_aplicacion [22/07/16]

Hernández, C. 2007. *Diseño y construcción de un animatrónico de movimiento facial* <http://biblioteca.usbbog.edu.co:8080/Biblioteca/BDigital/41038.pdf> [22/07/16]

Hitec S.A. 2016. <http://hitecrd.com/products/servos> [22/07/16]

Huaroto, L. 2015. *Semeología de antebrazo, muñeca y mano*. <http://www.scielo.org.co/pdf/ring/n22/n22a4.pdf> [09/10/16]

Informatica Hoy. 2014. *Cómo funciona el Wifi* <http://www.informatica-hoy.com.ar/redes/Como-funciona-el-Wi-fi.php> [22/07/16]

INRIA. 2016. *Poppy Robot*. <https://www.poppy-project.org/en/>. [10/01/2016]

intef. 2012. *Radiofrecuencia*

<http://serbal.pntic.mec.es/srug0007/archivos/radiocomunicaciones/1%20INTRODUCCI%D3N/1%20Radiofrecuencia.pdf> [22/07/16]

IOTech, Inc. 1991. *Instrument Communication Handbook*. Ohio, USA. 20 págs. [23/09/16]

- IRTRA. 2012. *Xetulul*: <http://irtra.org.gt/parques/?parque=xetulul> [22/07/16]
- J. Collins, 2011. *Disney World Top 6 Uses Of Audio Animatronics*
<http://www.onlywdworld.com/2010/12/disney-world-top-6-uses-of-audio.html> [16/01/16].
- Jiménez, Rafael. 2009. *Estudio y simulación por elementos finitos del comportamiento de discos cerámicos*. Barcelona: Universidad Politécnica de Cataluña. 59 págs.
- Jordi Ferrer. 2014. *ABS vs PLA: ¿Qué diferencia existe entre estos dos filamentos para impresora 3D?*
<http://makershopbcn.com/abs-vs-pla-que-diferencia-existe-entre-estos-dos-filamentos-para-impresora-3d>
 [10/07/16]
- Kendon, Adam. 1990. *Conducting Interactions: Patters of Behavior in Focused Encontuers*. Cambridge Univ Press. 12 págs.
- L. Osuna. 2012. *El esqueleto humano: el brazo*. Onmeda. <http://www.onmeda.es/anatomia/esqueleto-el-brazo-15962-5.html> [11/08/16].
- L.J Vorvick. 2014. *Tendones y ligamentos*, Medline Plus.
https://medlineplus.gov/spanish/ency/esp_imagepages/19089.htm [02/08/16].
- Langevin, G. 2012. *Inmoov: open source 3D printed life-size robot*. <http://inmoov.fr> [10/07/16]
- Langevin, Gael. 2012. *Inmoov*. <http://inmoov.fr/> [10/02/2016]
- Latarjet, Michel; A. Liard. 2004. *Anatomía humana*. Buenos Aires: Médica Panamericana. 850 págs.
- Learning about electronics. *What is a Directional Microphone?*
<http://www.learningaboutelectronics.com/Articles/What-is-a-directional-microphone> [21/09/16]
- Leloir, I. 1985. *Fundamentos de biomecánica articular*.
http://imedleloir.com.ar/documentos/Biomecanica_articular.pdf [10/07/16]
- Lowe, Scott. *PlayStation Move Review*. <http://www.ign.com/articles/2010/09/17/playstation-move-review> [21/09/16]
- M. Cunningham *Tratado de anatomía humana*. Editorial Interamericana-McGraw-Hill, 1987.

MakeItFrom. 2009. *Compare ABS to PLA*. <http://www.makeitfrom.com/compare/Acrylonitrile-Butadiene-Styrene-ABS/Polylactic-Acid-PLA-Polylactide> [10/03/2016]

MakerShop BCN. 2014. *Consumibles impresoras 3D* <http://makershopbcn.com/productos/consumibles-es> [10/07/16]

Mariano Rojas. 2013. *Tecnología de los plásticos* <http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2013/02/impresion-3d.html> [10/07/16]

MathWorks, *MATLAB*. http://www.mathworks.com/help/releases/R2014b/pdf_doc/matlab/getstart.pdf [23/09/16]

MathWorks. *Overview of the Serial Port*. http://www.mathworks.com/help/matlab/matlab_external/overview-of-the-serial-port.html [23/09/16]

Microsoft. *Introduction to the C# language and the .NET Framework*. <https://msdn.microsoft.com/es-gt/library/z1zx9t92.aspx> [18/09/16]

Microsoft. *Kinect for Windows SDK v1.8*. <https://www.microsoft.com/en-us/download/details.aspx?id=40278> [17/09/16]

Microsoft. *Kinect for Windows Sensor Components and Specifications*. <https://msdn.microsoft.com/en-us/library/jj131033.aspx> [17/09/16]

Microsot. *Descarga del SDK de Kinect para Windows*. https://blogs.msdn.microsoft.com/esmsdn/2011/06/16/descarga-del-sdk-de-kinect-para-windows-disponible/#_%C2%BFQu%C3%A9_puedo_hacer [14/06/16]

Mikroelectronica. 2014. *Introducción a los microcontroladores* <http://learn.mikroe.com/ebooks/microcontroladorespicc/chapter/introduccion-al-mundo-de-los-microcontroladores> [10/07/16]

Millan, A. 2010. *Reguladores de Tensión* http://www.ing.uc.edu.ve/~ajmillan/Docencia/Material/RegLin_01.pdf [10/07/16]

Moore, A. 1993. *Anatomía con orientación clínica*. Editorial Médica Panamericana.

N. Palastanga; D. Field; R. Soames. *Anatomía y movimiento humano: estructura y funcionamiento*. Editorial Paidotribo. Primera edición. Barcelona, España. Pp 130-167.

Naranjo, A. 2012. *Anatomía del cuello*. <http://dea.unsj.edu.ar/biologia2/cuello.pdf> [10/07/16]

National Eye Institute. 2011. *Las partes del ojo*. https://www.nei.nih.gov/sites/default/files/nehep-pdfs/GlaucomaToolkit_EyeAnatomy_Released_021015_508.pdf [10/07/16]

National Instruments. *What is an RGB Camera?*
<http://digital.ni.com/public.nsf/allkb/46BE3912D75112C58625652C005B8422> [20/09/16]

Nise, Norman S. 2011. *Control Systems Engineering*. 6a. ed. Pomona: Universidad Politécnica

Ogata, Katsuhiko. 2010. *Ingeniería de control moderna*. 6a. ed. Madrid: Pearson Educación, S.A. 904 págs.

Ogata, Katsuhiko. *Ingeniería de control moderna*. 5ª edición. Prentice Hall. Pearson Educación, S.A. Madrid. 2010.

OpenNI. *Simple OpenNI*. <http://openni.ru/files/simpleopenni/index.html> [13/09/16]

Ortiz, A. 2012. *DESIGN OF A HUMANOID NECK*
<http://www.diva-portal.se/smash/get/diva2:538540/FULLTEXT01.pdf> [10/07/16]

P.D. Mazariegos., 2012. *Diseño e implementación de un nuevo modelo de la mano de la Prótesis Biónica Trashumarla*, Tesis de la Universidad Del Valle de Guatemala. 168 págs.

Palastanga, Niguel; D. Field y R Soames. 2000. *Anatomía y movimiento humano*. Barcelona: Paidotribo. 612 págs.

Penalva, J. 2006. *Impresoras 3D, cómo funcionan*. <http://www.xataka.com/perifericos/impresoras-3d-como-funcionan> [10/07/16]

Perez, M. Hidalgo, A. Perez, E. 2008. *Introducción a los sistemas de control y modelo matemático para sistemas lineales invariantes en el tiempo*. Universidad Nacional de San Juan, Facultad de ingeniería.
<http://dea.unsj.edu.ar/control1b/teoria/unidad1y2.pdf> [10/07/16]

- Poppy Project. 2016. <https://docs.poppy-project.org/en/> [10/07/16]
- Prensa Libre. 2003. *¿Qué es Xetulul?* <http://www.viajeaguatemala.com/especiales/xetulul/xetululj.htm> [10/07/16]
- Pro Shooters LLC. *RGB: All about digital camera color.*
http://www.nikondigital.org/articles/rgb_digital_camera_color.htm [19/09/16]
- Processing Foundation. *Processing cover.* <https://processing.org/> [13/09/16]
- Pulido, Antonio. 2012. *Mecanismos de transmisión de movimiento: sistemas de poleas.*
<https://aprendemostecnologia.org/maquinas-y-mecanismos/mecanismos-de-transmision-del-movimiento/> [10/07/16]
- Python Software Foundation. *Spyder 3.0.0b7.* <https://pypi.python.org/pypi/spyder> [13/09/16]
- Python Software Foundation. *What is Python? Executive Summary.*
<https://www.python.org/doc/essays/blurb/> [18/09/16]
- Real Academia Española©. 2014. Real Academia Española: <http://lema.rae.es/drae/?val=interfaz> [10/07/16]
- RedPIC. 2006. *Controlando un servo.* <http://www.todopic.com.ar/foros/index.php?topic=4629.0> [10/07/16]
- Rheiner, Max. 2012. *SimpleOpenNI Hands3d Test.* <https://code.google.com/archive/p/simple-openni/> [29/10/15]
- Rheiner, Max. 2012. *SimpleOpenNI Users3d Test.* <https://code.google.com/archive/p/simple-openni/> [29/10/15]
- ROBOTIS. *Characteristics of Dynamixel.* http://www.robotis.com/xe/dynamixel_en#d02 [23/09/16]
- ROBOTIS. *MX-106T / MX-106R.* http://support.robotis.com/en/product/dynamixel/mx_series/mx-106.htm [23/09/16]

ROBOTIS. *MX-106T/MX-106R*. http://support.robotis.com/en/product/dynamixel/mx_series/mx-106.htm [10/05/2016]

Robotzone LLC. *HS-805BB Servo*. <https://www.servocity.com/hs-805bb-servo> [10/05/2016]

Róger Zambrano. 2015. *Las 4 tecnologías de impresión 3D más populares del mercado*. <http://tecnoimpre3d.com/tecnologia/4-tecnologias/> [10/07/16]

Róvere, C. 2012. *¿Cómo funciona el Bluetooth?*
http://ldc.usb.v/~poc/RedesII/Grupos/G1/como_funciona.html [10/07/16]

Rubana H. Chowdhury, Mamun B. I. Reaz, Mohd Alauddin Bin Mohd Ali, Ashrif A. A. Bakar, Kalaivani Chellappan, & Tae G. Chang. 2013. *Surface Electromyography Signal Processing and Classification Techniques*. MDPI AG; Sensors, 12431-12466.

Rubuñal, J. R., & Dorado, J. (n.d.). GA-Based Learning. In J. R. Rubuñal, *Artificial Neural Networks in Real-Life Applications* (pp. 319-320). United Kingdom: Idea Group Publishing.

Sánchez, J. 2012. Ed Villajunco. *Cuello y tronco* http://www.edvillajunco.es/doc/4_Cuello_y_Tronco.pdf [10/07/16]

Sánchez, S. 2013. *Introducción y Arquitectura de microcontroladores*
<https://microcontroladoresesv.wordpress.com/arquitectura-de-los-microcontroladores/> [10/07/16]

Savage Electronics. 2011. *Arduino y Dynamixel AX-12*.
<http://savageelectronics.blogspot.com/2011/01/arduino-y-dynamixel-ax-12.html> [10/09/2016]

Savage, Josué. *Biblioteca Dynamixel Download*.
<http://savageelectronics.blogspot.com/2011/08/actualizacion-biblioteca-dynamixel.html> [15/08/16]

School, Stan Winston. 2015. *The Evolution of Animatronics*
<https://www.stanwinstonschool.com/blog/animatronics-world-review#> [10/07/16]

Sim, N. 2011. *Disney animatronics supplier Garner Holt Productions launches new product line*
<http://www.themeparktourist.com/news/20110929/4831/disney-animatronics-supplier-garner-holt-launches-new-product-line> [10/07/16]

Simpson, Chester. *Linear and Switching Voltage Regulator Fundamentals*.
<http://www.ti.com/lit/an/snva558/snva558.pdf> [23/09/16]

Slicer. 2016. *Infill Patterns and Density*. <http://manual.slic3r.org/expert-mode/infill> [10/07/16]

Sony Computer Entertainment America LLC. *Cámara PlayStation Eye*.
<http://latam.playstation.com/ps3/accesorios/scph-98047.html> [21/09/16]

Spektrum Horizon Hobby. *S6250 High Torque, HV Dig Servo*.
<https://www.spektrumrc.com/Products/Default.aspx?ProdID=SPMSS6250> [10/05/2016]

Studios, Rogers. 2012. *Robo Robotics*. <http://roborobotics.com/Animatronics/history-of-animatronics.html> [10/07/16]

TADAD. 2015. *Amplitud de movimiento*".
http://www.tafadycursos.com/load/cuerpo_humano/anatomia/amplitud_movimiento/116-1-0-1030
 [10/07/16]

Takanishi Laboratory. 2010. *Kosbian*
<http://www.takanishi.mech.waseda.ac.jp/top/research/kobian/KOBIAN/index.htm#HISTORY> [10/07/16]

Tech FAQ. *Nintendo Wii Specifications*. <http://www.tech-faq.com/nintendo-wii-specifications.html>
 [21/09/16]

Temic Semiconductors. *Optocouplers Databook*.
<http://pe2bz.philpem.me.uk/pdf%20on%20typenumber/A-C/COUPLE96.pdf> [23/09/16]

Tena, F. 2006. *KISMET, el robot*
http://www2.uca.es/dept/leng_sist_informaticos/paginas/IAWeb/docus/El_Robot_KISMET.pdf [10/07/16]

Tyson, J. 2016. *How Animatronics Works*. <http://entertainment.howstuffworks.com/animatronic.htm>
 [10/07/16]

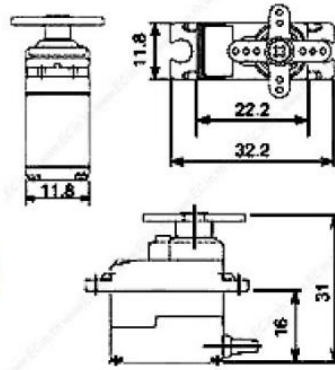
UNAM. 2015. *Conceptos básicos del método por elementos finitos*.
<http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/2548/011-MPM-Cap8-Final.pdf?sequence=11> [10/07/16]

- Universidad de Alicante. 2012. *Tipos de movimientos oculares*
https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/18771/24/Tema_4%20OCW.pdf [10/07/16]
- Universidad de los Andes. 2015. *Diseño de tornillos*. Capítulo ocho.
<http://www.utp.edu.co/~lvanegas/disI/Cap8.pdf> [10/07/16]
- Universidad de Vigo. 2012. *Sensores y Actuadores Industriales*
http://tv.uvigo.es/uploads/material/Video/1709/ISAD_Tema7_2.pdf [10/07/16]
- Urquiza, S, Basombrio, F. 1990. *Simulación de elementos finitos*.
<https://www.yumpu.com/es/document/view/14120858/simulacion-por-elementos-finitos-de-los-primeros-upcommons> [10/07/16]
- Verbatim. 2016. *ABS frente a PLA*. <http://www.verbatim.es/es/3D/abs-vs-pla/> [10/03/2016]
- Vigor Precision LTD. *VSD-11AYMB Servo*. http://dl.btc.pl/kamami_wa/hk_18742_0.pdf [10/05/2016]
- Vildósola, E. 2010. *Actuadores*. <http://www.aie.cl/files/file/comites/ca/abc/actuadores.pdf> [10/07/16]
- WiseGeek. 2016. *What is Animatronics?* <http://www.wisegeek.com/what-is-animatronics.htm> [10/07/16]
- XpertCAD. 2014. *Lo que no sabías de la impresión 3D*
<http://xpertcad.com/blog/2014/08/26/lo-que-no-sabias-de-la-impresion-3d/> [10/07/16]
- Y. Zeron. *Animatrónico controlado con lógica difusa*. Revista del Centro de Investigación. Universidad La Salle, vol. 6, núm. 24, julio-diciembre, 2005, pp. 39-53
- Zhang, Anthony. 2016. *Speech Recognition*.
https://github.com/Uberi/speech_recognition/blob/master/reference/library-reference.rst [30/09/2016]

XV. ANEXOS

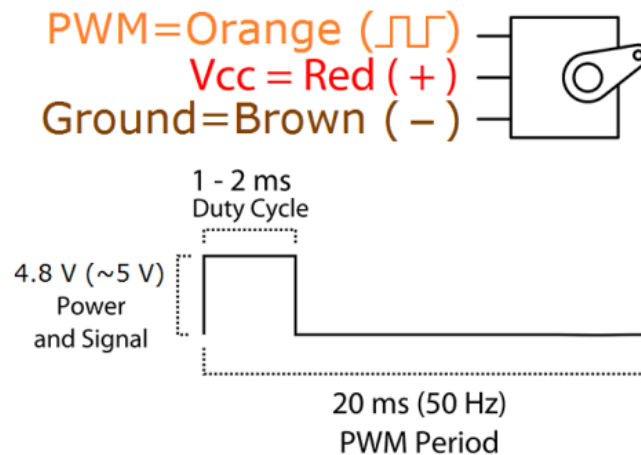
A. ESPECIFICACIONES DEL TOWER PRO MICRO SERVO

SG90 9 g Micro Servo



Specifications

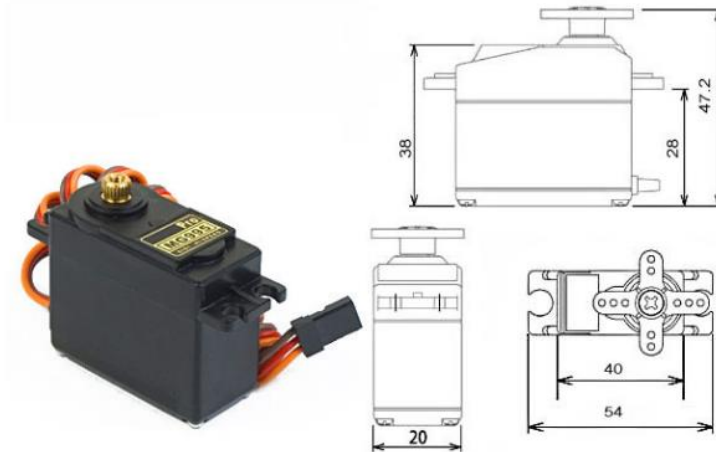
- Weight: 9 g
- Dimension: 22.2 x 11.8 x 31 mm approx.
- Stall torque: 1.8 kgf·cm
- Operating speed: 0.1 s/60 degree
- Operating voltage: 4.8 V (~5V)
- Dead band width: 10 μ s
- Temperature range: 0 $^{\circ}$ C – 55 $^{\circ}$ C



Position "0" (1.5 ms pulse) is middle, "90" (~2 ms pulse) is all the way to the right, "-90" (~1 ms pulse) is all the way to the left.

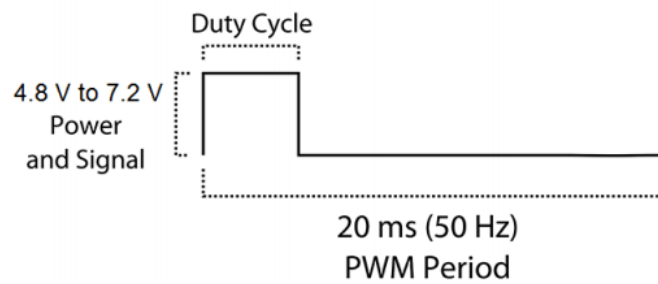
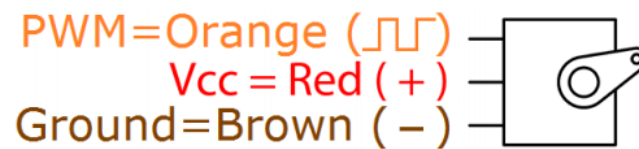
B. ESPECIFICACIONES DEL TOWER PRO MG995

MG995 High Speed Metal Gear Dual Ball Bearing Servo




Specifications

- Weight: 55 g
- Dimension: 40.7 x 19.7 x 42.9 mm approx.
- Stall torque: 8.5 kgf·cm (4.8 V), 10 kgf·cm (6 V)
- Operating speed: 0.2 s/60° (4.8 V), 0.16 s/60° (6 V)
- Operating voltage: 4.8 V a 7.2 V
- Dead band width: 5 μ s
- Stable and shock proof double ball bearing design
- Temperature range: 0 °C – 55 °C



C. ESPECIFICACIONES DE MABUCHI FC-280ST-18180, 9-15V DC MOTOR



FC-280PC/SC


MABUCHI MOTOR
Carbon-brush motors

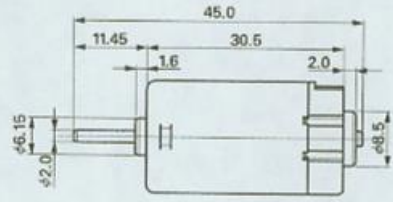
OUTPUT : 0.1W-4.0W (APPROX) **WEIGHT : 38g (APPROX)**

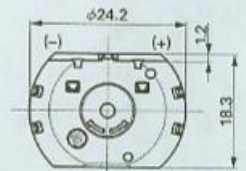
Typical Applications Automotive Products : Retractable Rearview Mirror / Door Lock Actuator

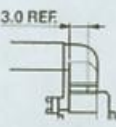
MODEL	VOLTAGE		NO LOAD		AT MAXIMUM EFFICIENCY				STALL			
	OPERATING RANGE	NOMINAL	SPEED	CURRENT	SPEED	CURRENT	TORQUE		OUTPUT	TORQUE		CURRENT
			rpm	A	rpm	A	in-lb	g-cm	W	in-lb	g-cm	A
FC-280PC-22125	8-15	12V CONSTANT	13100	0.11	11480	0.78	4.76	48.5	5.71	38.6	393	5.56
FC-280SC-20150	8-15	12V CONSTANT	11800	0.081	10310	0.56	4.14	42.2	4.47	32.9	335	3.90
FC-280SC-18180	8-15	12V CONSTANT	9700	0.16	7880	0.69	5.33	54.3	4.39	28.4	290	3.00
FC-280SC-16220	9-14	12V CONSTANT	7900	0.055	6780	0.33	3.27	33.3	2.32	23.0	234	2.00

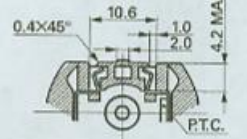
DIRECTION OF ROTATION











D. ESPECIFICACIONES DEL SERVO HK 15268A

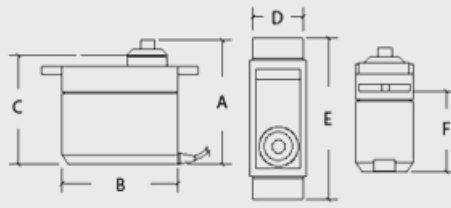


Specs:
 Voltage: 4.5-6V
 Speed: 0.16sec/60deg (4.8v) 0.13sec/60deg (6.0v)
 Torque: 4kg.cm (4.8v) 4.5kg.cm (6.0v)
 Size: 40.2mm x 20.2mm x36 mm
 Weight: 40gram
 Motor: Brushed
 Gear Train: Plastic
 Ball Bearing: 2
 Type: analogue

PRODUCT ID: 9225000011

Product Config Table

Weight (g)	39
Torque (kg)	4.5
Speed(Sec/60deg)	0.13
A(mm)	42
B(mm)	40
C(mm)	39
D(mm)	20
E(mm)	54
F(mm)	30



E. ESPECIFICACIONES DE NEXTROX DC MOTOR

Specifications:

Torque: 30 N*cm
 12V DC
 60RPM
 Diameter: 37mm
 Length [excluding shaft]: 47mm
 Shaft length: 21mm
 Total length: 68mm
 Shaft diameter: 6mm
 Weight: 138g

F. ESPECIFICACIONES DE NEMA 17 STEPPER MOTOR

Stepper Motor NEMA 17

This document describes mechanical and electrical specifications for PBC Linear stepper motors; including standard, hollow, and extended shaft variations.

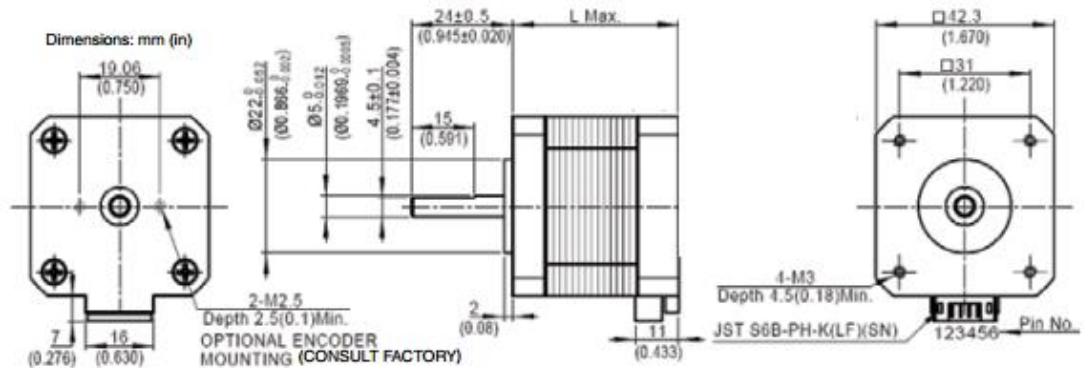


Phases	2
Steps/Revolution	200
Step Accuracy	±5%
Shaft Load	20,000 Hours at 1000 RPM
Axial	25 N (5.6 lbs.) Push 65 N (15 lbs.) Pull
Radial	29 N (6.5 lbs.) At Flat Center
IP Rating	40
Approvals	RoHS
Operating Temp	-20° C to +40° C
Insulation Class	B, 130° C
Insulation Resistance	100 MegOhms

Standard shaft motor shown.

Description	Length	Mounted Rated Current	Mounted Holding Torque		Winding Ohms mH		Detent Torque		Rotor Inertia		Motor Weight	
			Nm Typ.	oz-in Typ.	±10% @ 20°C Typ.	mH	mNm	oz-in	g cm ²	oz-in ²	kg	lbs
(Stack)	"L" Max	Amps										
Single	39.8 mm (1.57 in)	2	0.48	68	1.04	2.2	15	2.1	57	0.31	0.28	0.62
Double	48.3 mm (1.90 in)	2	0.63	89	1.3	2.9	25	3.5	82	0.45	0.36	0.79
Triple	62.8 mm (2.47 in)	2	0.83	120	1.49	3.8	30	4.2	123	0.67	0.6	1.3

*All standard motors have plug connector. Consult factory for other options.



G. ESPECIFICACIONES DEL REGULADOR LM7805

recommended operating conditions

		MIN	MAX	UNIT
V_I Input voltage	$\mu A7805C$	7	25	V
	$\mu A7808C$	10.5	25	
	$\mu A7810C$	12.5	28	
	$\mu A7812C$	14.5	30	
	$\mu A7815C$	17.5	30	
	$\mu A7824C$	27	38	
I_O Output current			1.5	A
T_J Operating virtual junction temperature	$\mu A7800C$ series	0	125	$^{\circ}C$

electrical characteristics at specified virtual junction temperature, $V_I = 10\text{ V}$, $I_O = 500\text{ mA}$ (unless otherwise noted)

PARAMETER	TEST CONDITIONS	$T_J \uparrow$	$\mu A7805C$			UNIT	
			MIN	TYP	MAX		
Output voltage	$I_O = 5\text{ mA to }1\text{ A}$, $P_D \leq 15\text{ W}$	$V_I = 7\text{ V to }20\text{ V}$, $0^{\circ}C\text{ to }125^{\circ}C$	25 $^{\circ}C$	4.8	5	5.2	V
			0 $^{\circ}C\text{ to }125^{\circ}C$	4.75		5.25	
Input voltage regulation	$V_I = 7\text{ V to }25\text{ V}$	25 $^{\circ}C$		3	100	mV	
	$V_I = 8\text{ V to }12\text{ V}$			1	50		
Ripple rejection	$V_I = 8\text{ V to }18\text{ V}$, $f = 120\text{ Hz}$	0 $^{\circ}C\text{ to }125^{\circ}C$	62	78		dB	
Output voltage regulation	$I_O = 5\text{ mA to }1.5\text{ A}$	25 $^{\circ}C$		15	100	mV	
	$I_O = 250\text{ mA to }750\text{ mA}$			5	50		
Output resistance	$f = 1\text{ kHz}$	0 $^{\circ}C\text{ to }125^{\circ}C$	0.017			Ω	
Temperature coefficient of output voltage	$I_O = 5\text{ mA}$	0 $^{\circ}C\text{ to }125^{\circ}C$	-1.1			mV/ $^{\circ}C$	
Output noise voltage	$f = 10\text{ Hz to }100\text{ kHz}$	25 $^{\circ}C$	40			μV	
Dropout voltage	$I_O = 1\text{ A}$	25 $^{\circ}C$	2			V	
Bias current		25 $^{\circ}C$	4.2	8		mA	
Bias current change	$V_I = 7\text{ V to }25\text{ V}$	0 $^{\circ}C\text{ to }125^{\circ}C$			1.3	mA	
	$I_O = 5\text{ mA to }1\text{ A}$				0.5		
Short-circuit output current		25 $^{\circ}C$	750			mA	
Peak output current		25 $^{\circ}C$	2.2			A	

APPLICATION INFORMATION

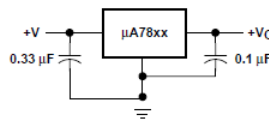


Figure 1. Fixed-Output Regulator

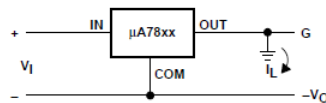
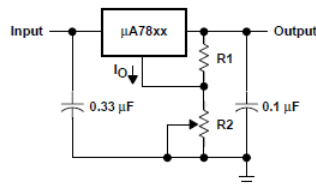


Figure 2. Positive Regulator in Negative Configuration (V_I Must Float)

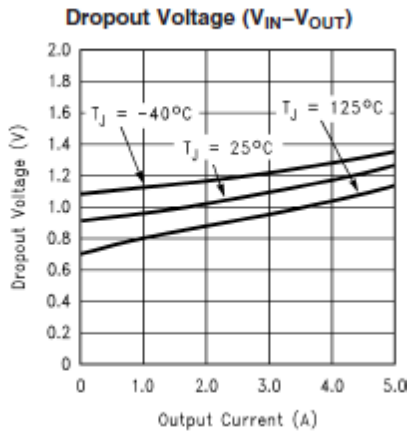


H. ESPECIFICACIONES DEL REGULADOR DE VOLTAJE LM1084

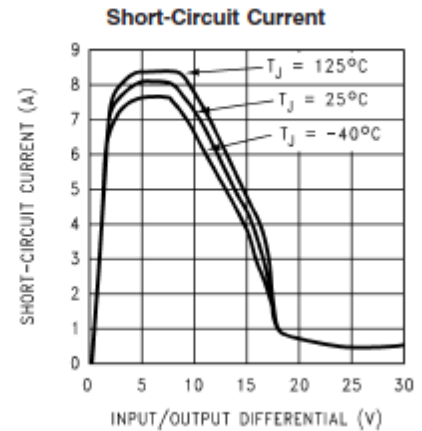
LM1084

Absolute Maximum Ratings (Note 1) If Military/Aerospace specified devices are required, please contact the National Semiconductor Sales Office/Distributors for availability and specifications.		Junction Temperature (T_J)(Note 3) 150°C Storage Temperature Range -65°C to 150°C Lead Temperature 260°C, to 10 sec ESD Tolerance (Note 4) 2000V				
Maximum Input to Output Voltage Differential LM1084-ADJ 29V LM1084-12 18V LM1084-3.3 27V LM1084-5.0 25V Power Dissipation (Note 2) Internally Limited	Operating Ratings (Note 1) Junction Temperature Range (T_J) (Note 3) Control Section -40°C to 125°C Output Section -40°C to 150°C					
Electrical Characteristics Typical and limits appearing in normal type apply for $T_J = 25^\circ\text{C}$. Limits appearing in Boldface type apply over the entire junction temperature range for operation.						
Symbol	Parameter	Conditions	Min (Note 6)	Typ (Note 5)	Max (Note 6)	Units
V_{REF}	Reference Voltage	LM1084-ADJ $I_{OUT} = 10\text{mA}$, $V_{IN}-V_{OUT} = 3\text{V}$ $10\text{mA} \leq I_{OUT} \leq I_{FULL\ LOAD}$, $1.5\text{V} \leq (V_{IN}-V_{OUT}) \leq 25\text{V}$ (Note 7)	1.238 1.225	1.250 1.250	1.262 1.270	V V
		LM1084-3.3 $I_{OUT} = 0\text{mA}$, $V_{IN} = 8\text{V}$ $0 \leq I_{OUT} \leq I_{FULL\ LOAD}$, $4.8\text{V} \leq V_{IN} \leq 15\text{V}$	3.270 3.235	3.300 3.300	3.330 3.365	V V
V_{OUT}	Output Voltage (Note 7)	LM1084-5.0 $I_{OUT} = 0\text{mA}$, $V_{IN} = 8\text{V}$ $0 \leq I_{OUT} \leq I_{FULL\ LOAD}$, $6.5\text{V} \leq V_{IN} \leq 20\text{V}$	4.950 4.900	5.000 5.000	5.050 5.100	V V
		LM1084-12 $I_{OUT} = 0\text{mA}$, $V_{IN} = 15\text{V}$ $0 \leq I_{OUT} \leq I_{FULL\ LOAD}$, $13.5\text{V} \leq V_{IN} \leq 25\text{V}$	11.880 11.760	12.000 12.000	12.120 12.240	V V
		LM1084-ADJ $I_{OUT} = 10\text{mA}$, $1.5\text{V} \leq (V_{IN}-V_{OUT}) \leq 15\text{V}$		0.015 0.035	0.2 0.2	% %
ΔV_{OUT}	Line Regulation (Note 8)	LM1084-3.3 $I_{OUT} = 0\text{mA}$, $4.8\text{V} \leq V_{IN} \leq 15\text{V}$		0.5 1.0	6 6	mV mV
		LM1084-5.0 $I_{OUT} = 0\text{mA}$, $6.5\text{V} \leq V_{IN} \leq 20\text{V}$		0.5 1.0	10 10	mV mV
		LM1084-12 $I_{OUT} = 0\text{mA}$, $13.5\text{V} \leq V_{IN} \leq 25\text{V}$		1.0 2.0	25 25	mV mV
		LM1084-ADJ $I_{OUT} = 0\text{mA}$, $1.5\text{V} \leq V_{IN} \leq 15\text{V}$		1.0 2.0	25 25	mV mV

Typical Performance Characteristics



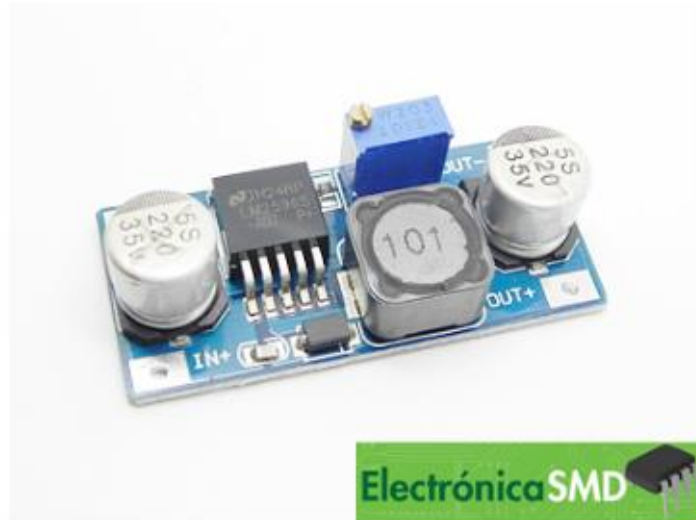
10094663



10094671

I. ESPECIFICACIONES DEL MÓDULO DE REGULACIÓN DE VOLTAJE LM2596

Módulo LM2596 regulable DC-DC 2A



Disponibilidad: Si

Características:

- Eficiencia de la conversión: más del 92%
- *Switcheo* de la frecuencia: 150Khz
- Rectificador: Rectificación no síncrona
- Load regulation: +-0.5%
- Circuito integrado regulador: LM2596
- Entrada de voltaje: 4.5VDC - 40VDC
- Salida de voltaje: 1.5VDC - 35VDC (Ajustable, V_{max} igual al de la fuente de entrada)
- Corriente de salida: uso continuo 2A a un máximo de 3A
- Dimensiones: 50mm x 23mm

J. ESPECIFICACIONES DEL MÓDULO REGULADOR DE VOLTAJE XL4005

Módulo Regulador DC-DC XL4005 5A



Disponibilidad: Si

Características:

- Voltaje de entrada: 4VDC ~38VDC
- Voltaje de Salida: 1.25VDC ~36VDC (Vmax out, dependerá de la fuente de voltaje de entrada)
- Corriente máxima: 5A
- Circuito integrado regulador: XL4005
- Frecuencia de interrupción: 180Khz
- Dimensiones: 50mm x 23mm

K. ESPECIFICACIONES DEL REGULADOR DE VOLTAJE LM317T

6.1 Absolute Maximum Ratings

over virtual junction temperature range (unless otherwise noted)⁽¹⁾

	MIN	MAX	UNIT
$V_I - V_O$ Input-to-output differential voltage		40	V
T_J Operating virtual junction temperature		150	°C
Lead temperature 1,6 mm (1/16 in) from case for 10 s		260	°C
T_{stg} Storage temperature	-65	150	°C

(1) Stresses beyond those listed under *Absolute Maximum Ratings* may cause permanent damage to the device. These are stress ratings only, and functional operation of the device at these or any other conditions beyond those indicated under *Recommended Operating Conditions* is not implied. Exposure to absolute-maximum-rated conditions for extended periods may affect device reliability.

6.2 ESD Ratings

	MAX	UNIT
$V_{(ESD)}$ Electrostatic discharge	Human body model (HBM), per ANSI/ESDA/JEDEC JS-001 ⁽¹⁾	2500
	Charged device model (CDM), per JEDEC specification JESD22-C101 ⁽²⁾	1000

(1) JEDEC document JEP155 states that 500-V HBM allows safe manufacturing with a standard ESD control process.

(2) JEDEC document JEP157 states that 250-V CDM allows safe manufacturing with a standard ESD control process.

6.3 Recommended Operating Conditions

	MIN	MAX	UNIT
V_O Output voltage	1.25	37	V
$V_I - V_O$ Input-to-output differential voltage	3	40	V
I_O Output current	0.01	1.5	A
T_J Operating virtual junction temperature	0	125	°C

6.4 Thermal Information

THERMAL METRIC ⁽¹⁾	LM317				UNIT
	DCY (SOT-223)	KCS (TO-220)	KCT (TO-220)	KTT (TO-263)	
	4 PINS	3 PINS	3 PINS	3 PINS	
$R_{\theta(JA)}$ Junction-to-ambient thermal resistance	66.8	23.5	37.9	38.0	°C/W
$R_{\theta(JC(top))}$ Junction-to-case (top) thermal resistance	43.2	15.9	51.1	36.5	°C/W
$R_{\theta(JB)}$ Junction-to-board thermal resistance	16.9	7.9	23.2	18.9	°C/W
Ψ_{JT} Junction-to-top characterization parameter	3.6	3.0	13.0	6.9	°C/W
Ψ_{JB} Junction-to-board characterization parameter	16.8	7.8	22.8	17.9	°C/W
$R_{\theta(JC(bot))}$ Junction-to-case (bottom) thermal resistance	NA	0.1	4.2	1.1	°C/W

(1) For more information about traditional and new thermal metrics, see the *Semiconductor and IC Package Thermal Metrics* application report.

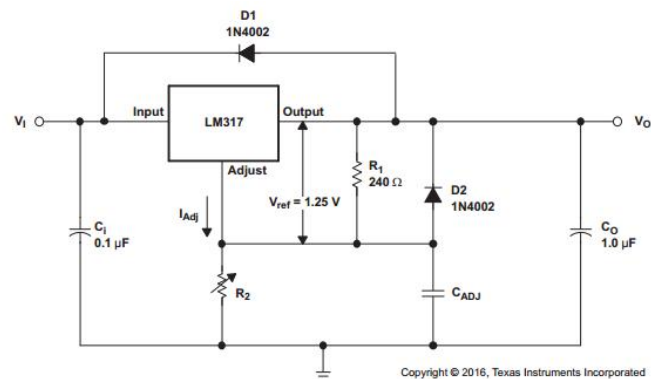
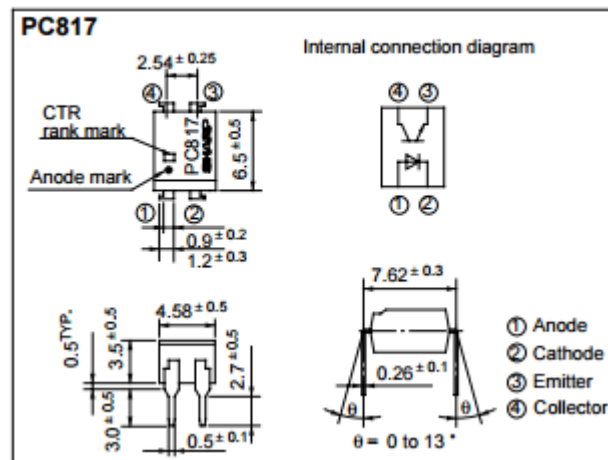


Figure 9. Adjustable Voltage Regulator

L. ESPECIFICACIONES DEL OPTOACOPLADOR PT817

■ Outline Dimensions



■ Absolute Maximum Ratings

(Ta = 25°C)

Parameter		Symbol	Rating	Unit
Input	Forward current	I_F	50	mA
	*1 Peak forward current	I_{FM}	1	A
	Reverse voltage	V_R	6	V
	Power dissipation	P	70	mW
Output	Collector-emitter voltage	V_{CEO}	35	V
	Emitter-collector voltage	V_{ECO}	6	V
	Collector current	I_C	50	mA
	Collector power dissipation	P_C	150	mW
	Total power dissipation	P_{tot}	200	mW
*2 Isolation voltage		V_{iso}	5 000	V_{rms}
Operating temperature		T_{opr}	- 30 to + 100	°C
Storage temperature		T_{stg}	- 55 to + 125	°C
*3 Soldering temperature		T_{sol}	260	°C

*1 Pulse width $\leq 100 \mu s$, Duty ratio : 0.001

*2 40 to 60% RH, AC for 1 minute

*3 For 10 seconds

■ Electro-optical Characteristics

(Ta = 25°C)

Parameter		Symbol	Conditions	MIN.	TYP.	MAX.	Unit
Input	Forward voltage	V_F	$I_F = 20mA$	-	1.2	1.4	V
	Peak forward voltage	V_{FM}	$I_{FM} = 0.5A$	-	-	3.0	V
	Reverse current	I_R	$V_R = 4V$	-	-	10	μA
	Terminal capacitance	C_t	$V = 0, f = 1kHz$	-	30	250	pF
Output	Collector dark current	I_{CEO}	$V_{CE} = 20V$	-	-	10^{-7}	A
Transfer characteristics	*4 Current transfer ratio	CTR	$I_F = 5mA, V_{CE} = 5V$	50	-	600	%
	Collector-emitter saturation voltage	$V_{CE(sat)}$	$I_F = 20mA, I_C = 1mA$	-	0.1	0.2	V
	Isolation resistance	R_{iso}	DC500V, 40 to 60% RH	5×10^{10}	10^{11}	-	Ω
	Floating capacitance	C_f	$V = 0, f = 1MHz$	-	0.6	1.0	pF
	Cut-off frequency	f_c	$V_{CE} = 5V, I_C = 2mA, R_L = 100 \Omega, - 3dB$	-	80	-	kHz
	Response time	Rise time	t_r	$V_{CE} = 2V, I_C = 2mA, R_L = 100 \Omega$	-	4	18
Fall time		t_f	-		3	18	μs

M. ESPECIFICACIONES DEL SWITCH DIGITAL CD4066

CD4066B
CMOS QUAD BILATERAL SWITCH

SCHS051D - NOVEMBER 1998 - REVISED SEPTEMBER 2003

electrical characteristics

PARAMETER	TEST CONDITIONS	LIMITS AT INDICATED TEMPERATURES								UNIT
		VIN (V)	VDD (V)	-55°C	-40°C	85°C	125°C	25°C		
								TYP	MAX	
I _{DD} Quiescent device current		0, 5	5	0.25	0.25	7.5	7.5	0.01	0.25	μA
		0, 10	10	0.5	0.5	15	15	0.01	0.5	
		0, 15	15	1	1	30	30	0.01	1	
		0, 20	20	5	5	150	150	0.02	5	
Signal Inputs (V _{IS}) and Outputs (V _{OS})										
r _{on} On-state resistance (max)	V _C = V _{DD} , R _L = 10 kΩ returned to $\frac{(V_{DD} - V_{SS})}{2}$, V _{IS} = V _{SS} to V _{DD}	5	800	850	1200	1300	470	1050	Ω	
		10	310	330	500	550	180	400		
		15	200	210	300	320	125	240		
Δr _{on} On-state resistance difference between any two switches	R _L = 10 kΩ, V _C = V _{DD}	5					15	Ω		
		10					10			
		15					5			
THD Total harmonic distortion	V _C = V _{DD} = 5 V, V _{SS} = -5 V, V _{IS(p-p)} = 5 V (sine wave centered on 0 V), R _L = 10 kΩ, f _{IS} = 1-kHz sine wave						0.4	%		
-3-dB cutoff frequency (switch on)	V _C = V _{DD} = 5 V, V _{SS} = -5 V, V _{IS(p-p)} = 5 V (sine wave centered on 0 V), R _L = 1 kΩ						40	MHz		
-50-dB feedthrough frequency (switch off)	V _C = V _{SS} = -5 V, V _{IS(p-p)} = 5 V (sine wave centered on 0 V), R _L = 1 kΩ						1	MHz		
I _{IS} Input/output leakage current (switch off) (max)	V _C = 0 V, V _{IS} = 18 V, V _{OS} = 0 V; and V _C = 0 V, V _{IS} = 0 V, V _{OS} = 18 V	18	±0.1	±0.1	±1	±1	±10 ⁻⁵	±0.1	μA	
-50-dB crosstalk frequency	V _{C(A)} = V _{DD} = 5 V, V _{C(B)} = V _{SS} = -5 V, V _{IS(A)} = 5 V _{p-p} , 50-Ω source, R _L = 1 kΩ						8	MHz		
t _{pd} Propagation delay (signal input to signal output)	R _L = 200 kΩ, V _C = V _{DD} , V _{SS} = GND, C _L = 50 pF, V _{IS} = 10 V (square wave centered on 5 V), t _r , t _f = 20 ns	5					20	40	ns	
		10					10	20		
		15					7	15		
C _{IS} Input capacitance	V _{DD} = 5 V, V _C = V _{SS} = -5 V						8	pF		
C _{OS} Output capacitance	V _{DD} = 5 V, V _C = V _{SS} = -5 V						8	pF		

N. ESPECIFICACIONES DE RELAY

HIGH POWER TWIN RELAY

1 POLE x 2—30A

(FOR AUTOMOTIVE APPLICATIONS)

FBR562 SERIES

RoHS compliant

■ FEATURES

- Two independent relays mounted in a single package (43% of the volume of the two FRL-270 relays)
- High current contact capacity (carrying current: 40 A/2 minutes, 30 A/1 hour)
- High heat resistance and extended operating voltage
- RoHS compliant since date code: 0627
Please see page 9 for more information



■ SPECIFICATIONS

Item		Specifications	
Contact	Arrangement	1 form C × 2 (SPDT × 2)	
	Material	Silver-tin oxide indium (-W1 type)	
	Voltage Drop (resistance)	Maximum 100 mV (at 2 A 12 VDC)	
	Ratings	14 VDC 20 A (locked motor load) 14 VDC inrush 20 A, break 4 A (motor free load)	
	Maximum Carrying Current	40 A/2 minutes, 30 A/ 1 hour (25°C, 100% rated coil voltage)	
	Maximum Inrush Current (reference)	-W1 type: 60 A	
	Max. Switching Current (reference)	40 A 16 VDC	
	Minimum Switching Load* ¹ (reference)	-W1 type: 6 VDC 1 A	
Coil	Operating Temperature	-40°C to +85°C (no frost) (refer to the CHARACTERISTIC DATA)	
	Storage Temperature	-40°C to +100°C (no frost)	
Time Value	Operate (at nominal voltage)	Maximum 10 ms	
	Release (at nominal voltage)	Maximum 5 ms	
Life	Mechanical	1 × 10 ⁷ operations minimum	
	Electrical	1 × 10 ⁵ operations minimum (locked motor load) 1 × 10 ⁶ operations minimum (motor free Load)	
Other	Vibration Resistance	10 to 55 Hz (double amplitude of 1.5 mm)	
	Shock Resistance	Misoperation	100 m/s ²
		Endurance	1,000 m/s ²

*1 Values when switching a resistive load at normal room temperature and humidity and in a clean environment.
The minimum switching load varies with the switching frequency and operating environment.

O. ESPECIFICACIONES DEL PIC16F887



PIC16F882/883/884/886/887

28/40/44-Pin Flash-Based, 8-Bit CMOS Microcontrollers with nanoWatt Technology

High-Performance RISC CPU:

- Only 35 Instructions to Learn:
 - All single-cycle instructions except branches
- Operating Speed:
 - DC – 20 MHz oscillator/clock input
 - DC – 200 ns instruction cycle
- Interrupt Capability
- 8-Level Deep Hardware Stack
- Direct, Indirect and Relative Addressing modes

Special Microcontroller Features:

- Precision Internal Oscillator:
 - Factory calibrated to $\pm 1\%$
 - Software selectable frequency range of 8 MHz to 31 kHz
 - Software tunable
 - Two-Speed Start-up mode
 - Crystal fail detect for critical applications
 - Clock mode switching during operation for power savings
- Power-Saving Sleep mode
- Wide Operating Voltage Range (2.0V-5.5V)
- Industrial and Extended Temperature Range
- Power-on Reset (POR)
- Power-up Timer (PWRT) and Oscillator Start-up Timer (OST)
- Brown-out Reset (BOR) with Software Control Option
- Enhanced Low-Current Watchdog Timer (WDT) with On-Chip Oscillator (software selectable nominal 268 seconds with full prescaler) with software enable
- Multiplexed Master Clear with Pull-up/Input Pin
- Programmable Code Protection
- High Endurance Flash/EEPROM Cell:
 - 100,000 write Flash endurance
 - 1,000,000 write EEPROM endurance
 - Flash/Data EEPROM retention: > 40 years
- Program Memory Read/Write during run time
- In-Circuit Debugger (on board)

Low-Power Features:

- Standby Current:
 - 50 nA @ 2.0V, typical
- Operating Current:
 - 11 μ A @ 32 kHz, 2.0V, typical
 - 220 μ A @ 4 MHz, 2.0V, typical
- Watchdog Timer Current:
 - 1 μ A @ 2.0V, typical

Peripheral Features:

- 24/35 I/O Pins with Individual Direction Control:
 - High current source/sink for direct LED drive
 - Interrupt-on-Change pin
 - Individually programmable weak pull-ups
 - Ultra Low-Power Wake-up (ULPWU)
- Analog Comparator Module with:
 - Two analog comparators
 - Programmable on-chip voltage reference (VREF) module (% of VDD)
 - Fixed voltage reference (0.6V)
 - Comparator inputs and outputs externally accessible
 - SR Latch mode
 - External Timer1 Gate (count enable)
- A/D Converter:
 - 10-bit resolution and 11/14 channels
- Timer0: 8-bit Timer/Counter with 8-bit Programmable Prescaler
- Enhanced Timer1:
 - 16-bit timer/counter with prescaler
 - External Gate Input mode
 - Dedicated low-power 32 kHz oscillator
- Timer2: 8-bit Timer/Counter with 8-bit Period Register, Prescaler and Postscaler
- Enhanced Capture, Compare, PWM+ Module:
 - 16-bit Capture, max. resolution 12.5 ns
 - Compare, max. resolution 200 ns
 - 10-bit PWM with 1, 2 or 4 output channels, programmable "dead time", max. frequency 20 kHz
 - PWM output steering control
- Capture, Compare, PWM Module:
 - 16-bit Capture, max. resolution 12.5 ns
 - 16-bit Compare, max. resolution 200 ns
 - 10-bit PWM, max. frequency 20 kHz
- Enhanced USART Module:
 - Supports RS-485, RS-232, and LIN 2.0
 - Auto-Baud Detect
 - Auto-Wake-Up on Start bit
- In-Circuit Serial Programming™ (ICSP™) via Two Pins
- Master Synchronous Serial Port (MSSP) Module supporting 3-wire SPI (all 4 modes) and I²C™ Master and Slave Modes with I²C Address Mask

P. ESPECIFICACIONES DE LOGO! 24CE

LOGO! 8 Basic				
	LOGO! 24CE	LOGO! 12/24RCE	LOGO! 24RCE	LOGO! 230RCE
Inputs	8	8	8	8
of which can be used in analog mode	4 (0 to 10 V)	4 (0 to 10 V)	–	–
Input/supply voltage	24 V DC	12...24 V DC	24 V AC/DC	115...230 V AC/DC
Permissible range	20.4...28.8 V DC	10.8 V...28.8 V DC	20.4 V AC to 26.4 V AC 20.4 V DC to 28.8 V DC	85 V AC to 265 V AC 100 V DC to 253 V DC
Outputs	4; transistors	4; relays	4; relays	4; relays
Continuous current	0.3 A	10 A with resistive load; 3 A with inductive load	10 A with resistive load; 3 A with inductive load	10 A with resistive load; 3 A with inductive load
Short-circuit protection	Electronic (approx. 1 A)	External fuse required	External fuse required	External fuse required
Switching frequency	10 Hz	2 Hz with resistive load; 0.5 Hz with inductive load	2 Hz with resistive load; 0.5 Hz with inductive load	2 Hz with resistive load; 0.5 Hz with inductive load
Cycle time	< 0.1 ms/function	< 0.1 ms/function	< 0.1 ms/function	< 0.1 ms/function
Display	Yes	Yes	Yes	Yes
Integrated time switches/power reserve	Yes / typ. 20 days	Yes / typ. 20 days	Yes / typ. 20 days	Yes / typ. 20 days
Connection cables	2 x 1.5 mm ² or 1 x 2.5 mm ²	2 x 1.5 mm ² or 1 x 2.5 mm ²	2 x 1.5 mm ² or 1 x 2.5 mm ²	2 x 1.5 mm ² or 1 x 2.5 mm ²
Ambient temperature	0 to + 55 °C	0 to + 55 °C	0 to + 55 °C	0 to + 55 °C
Storage temperature	– 40 °C to + 70 °C	– 40 °C to + 70 °C	– 40 °C to + 70 °C	– 40 °C to + 70 °C
Emitted interference	In accordance with EN 55011 (limit class B)	In accordance with EN 55011 (limit class B)	In accordance with EN 55011 (limit class B)	In accordance with EN 55011 (limit class B)
Degree of protection	IP20	IP20	IP20	IP20
Certification	CSA, UL, FM, IEC 61131, VDE 0631, marine approvals	CSA, UL, FM, IEC 61131, VDE 0631, marine approvals	CSA, UL, FM, IEC 61131, VDE 0631, marine approvals	CSA, UL, FM, IEC 61131, VDE 0631, marine approvals
Mounting	on 35 mm DIN rail, 4 spacing units wide, or wall mounting	on 35 mm DIN rail, 4 spacing units wide, or wall mounting	on 35 mm DIN rail, 4 spacing units wide, or wall mounting	on 35 mm DIN rail, 4 spacing units wide, or wall mounting
Dimensions (W x H x D)	71.5 (4 MW) x 90 x 60 mm	71.5 (4 MW) x 90 x 60 mm	71.5 (4 MW) x 90 x 60 mm	71.5 (4 MW) x 90 x 60 mm
Programming cable	Ethernet	Ethernet	Ethernet	Ethernet

Q. ESPECIFICACIONES DEL ATMEGA1280



Atmel ATmega640/V-1280/V-1281/V-2560/V-2561/V

8-bit Atmel Microcontroller with 16/32/64KB In-System Programmable Flash

SUMMARY

Features

- High Performance, Low Power Atmel® AVR® 8-Bit Microcontroller
- Advanced RISC Architecture
 - 135 Powerful Instructions – Most Single Clock Cycle Execution
 - 32 x 8 General Purpose Working Registers
 - Fully Static Operation
 - Up to 16 MIPS Throughput at 16MHz
 - On-Chip 2-cycle Multiplier
- High Endurance Non-volatile Memory Segments
 - 64K/128K/256KBytes of In-System Self-Programmable Flash
 - 4Kbytes EEPROM
 - 8Kbytes Internal SRAM
 - Write/Erase Cycles: 10,000 Flash/100,000 EEPROM
 - Data retention: 20 years at 85°C/ 100 years at 25°C
 - Optional Boot Code Section with Independent Lock Bits
 - In-System Programming by On-chip Boot Program
 - True Read-While-Write Operation
 - Programming Lock for Software Security
 - Endurance: Up to 64Kbytes Optional External Memory Space
- Atmel® QTouch® library support
 - Capacitive touch buttons, sliders and wheels
 - QTouch and QMatrix acquisition
 - Up to 64 sense channels
- JTAG (IEEE® std. 1149.1 compliant) Interface
 - Boundary-scan Capabilities According to the JTAG Standard
 - Extensive On-chip Debug Support
 - Programming of Flash, EEPROM, Fuses, and Lock Bits through the JTAG Interface
- Peripheral Features
 - Two 8-bit Timer/Counters with Separate Prescaler and Compare Mode
 - Four 16-bit Timer/Counter with Separate Prescaler, Compare- and Capture Mode
 - Real Time Counter with Separate Oscillator
 - Four 8-bit PWM Channels
 - Six/Twelve PWM Channels with Programmable Resolution from 2 to 16 Bits (ATmega1281/2561, ATmega640/1280/2560)
 - Output Compare Modulator
 - 8/16-channel, 10-bit ADC (ATmega1281/2561, ATmega640/1280/2560)
 - Two/Four Programmable Serial USART (ATmega1281/2561, ATmega640/1280/2560)
 - Master/Slave SPI Serial Interface
 - Byte Oriented 2-wire Serial Interface
 - Programmable Watchdog Timer with Separate On-chip Oscillator
 - On-chip Analog Comparator
 - Interrupt and Wake-up on Pin Change
- Special Microcontroller Features
 - Power-on Reset and Programmable Brown-out Detection
 - Internal Calibrated Oscillator
 - External and Internal Interrupt Sources
 - Six Sleep Modes: Idle, ADC Noise Reduction, Power-save, Power-down, Standby, and Extended Standby
- I/O and Packages
 - 54/86 Programmable I/O Lines (ATmega1281/2561, ATmega640/1280/2560)
 - 64-pad QFN/MLF, 64-lead TQFP (ATmega1281/2561)
 - 100-lead TQFP, 100-ball CBGA (ATmega640/1280/2560)
 - RoHS/Fully Green
- Temperature Range:
 - -40°C to 85°C Industrial
- Ultra-Low Power Consumption
 - Active Mode: 1MHz, 1.8V: 500µA
 - Power-down Mode: 0.1µA at 1.8V
- Speed Grade:
 - ATmega640V/ATmega1280V/ATmega1281V:
 - 0 - 4MHz @ 1.8V - 5.5V, 0 - 8MHz @ 2.7V - 5.5V
 - ATmega2560V/ATmega2561V:
 - 0 - 2MHz @ 1.8V - 5.5V, 0 - 8MHz @ 2.7V - 5.5V
 - ATmega640/ATmega1280/ATmega1281:
 - 0 - 8MHz @ 2.7V - 5.5V, 0 - 16MHz @ 4.5V - 5.5V
 - ATmega2560/ATmega2561:
 - 0 - 16MHz @ 4.5V - 5.5V

R. ESPECIFICACIONES DE LA RASPBERRY PI 2



Raspberry Pi



Raspberry Pi 2, Model B

Product Name Raspberry Pi 2, Model B

Product Description The Raspberry Pi 2 delivers 6 times the processing capacity of previous models. This second generation Raspberry Pi has an upgraded Broadcom BCM2836 processor, which is a powerful ARM Cortex-A7 based quad-core processor that runs at 900MHz. The board also features an increase in memory capacity to 1Gbyte.

Specifications

Chip Broadcom BCM2836 SoC
Core architecture Quad-core ARM Cortex-A7
CPU 900 MHz
GPU Dual Core VideoCore IV® Multimedia Co-Processor
 Provides Open GL ES 2.0, hardware-accelerated OpenVG, and 1080p30

Memory

Operating System Boots from Micro SD card, running a version of the Linux operating system

Dimensions 85 x 56 x 17mm

Power Micro USB socket 5V, 2A

Connectors:

Ethernet 10/100 BaseT Ethernet socket

Video Output HDMI (rev 1.3 & 1.4)

Audio Output 3.5mm jack, HDMI

USB 4 x USB 2.0 Connector

GPIO Connector 40-pin 2.54 mm (100 mil) expansion header: 2x20 strip
 Providing 27 GPIO pins as well as +3.3 V, +5 V and GND supply lines

Camera Connector 15-pin MIPI Camera Serial Interface (CSI-2)

JTAG Not populated

Display Connector Display Serial Interface (DSI) 15 way flat flex cable connector
 with two data lanes and a clock lane

Memory Card Slot Micro SDIO

S. ESPECIFICACIONES DEL ACTUADOR LINEAL LACT4P



Dimensions

Stroke:	4 in
Weight:	45 oz

General specifications

Gear ratio:	20:1
Free-run current @ 12V:	500 mA
Stall current @ 12V:	10 A
Linear speed @ 12V:	0.5 in/s
Linear force @ 12V:	110 lb ¹
Maximum duty cycle:	25% ²
Feedback potentiometer included?:	Y

T. CÓDIGO IMPLEMENTADO EN ARDUINO PARA CONTROLAR EL BRAZO

```
#include <Servo.h>
```

```
Servo servothumb; // Define thumb servo
```

```
Servo servoindex; // Define index servo
Servo servomajeure;
Servo servoringfinger;
Servo servopinky;
Servo servowrist;

void setup() {
servothumb.attach(10); // Set thumb servo to digital pin 2
servoindex.attach(9); // Set index servo to digital pin 3
servomajeure.attach(6);
servoringfinger.attach(5);
servopinky.attach(3);
servowrist.attach(11);
}

void loop() { // Loop through motion tests
  alltovirtual(); // Example: alltovirtual
  delay(2000); // Wait 4000 milliseconds (4 seconds)
  alltorest(); // Uncomment to use this
  delay(2000); // Uncomment to use this
}

// Motion to set the servo into "virtual" 0 position: alltovirtual
void alltovirtual() {
  //servothumb.write(0);
  servoindex.write(180);
  servomajeure.write(0);
  servoringfinger.write(0);
  servopinky.write(0);
  servowrist.write(0);
}

// Motion to set the servo into "rest" position: alltorest
void alltorest() {
  //servothumb.write(180);
  servoindex.write(0);
  servomajeure.write(180);
  servoringfinger.write(180);
  servopinky.write(180);
}
```

```

servowrist.write(90);
}

// Motion to set the servo into "max" position: alltomax
void alltomax() {
servothumb.write(180);
servoindex.write(0);
servomajeure.write(180);
servoringfinger.write(180);
servopinky.write(180);
servowrist.write(180);
}

// Motion to set the servo into "90" position: allto90
void allto90() {
servothumb.write(90);
servoindex.write(90);
servomajeure.write(90);
servoringfinger.write(90);
servopinky.write(90);
servowrist.write(90);
}

void saludo(){
  alltovirtual(); // Example: alltovirtual
  delay(1000); // Wait 4000 milliseconds (4 seconds)
  alltorest(); // Uncomment to use this
  delay(1000); // Uncomment to use this
}

```

U. CÓDIGO IMPLEMENTADO EN ARDUINO PARA CONTROLAR LA ROTACIÓN DEL TORSO

```
#include <DynamixelSerial.h>
```

```
/*
```

```
* Universidad del Valle de Guatemala
```

* Megaproyecto: Animatronis
 * Módulo: Torso animatrónico
 * Creado por: Julio Javier Maldonado Barrios
 * Carné: 12377
 * Fecha: Octubre 2016

* Este programa controla la rotación del torso animatrónico
 * permitiendo girar o rotar hacia un ángulo deseado utilizando
 * como actuador el motor Dynamixel MX-106T y como sensor un potenciómetro.
 */

```
const int analogInPin = A0;    // Pin analógico utilizado para leer el potenciómetro

int sensorValue = 0;          // Valor leído del potenciómetro
int degree = 0;               // Angulo correspondiente a la lectura del potenciómetro
int reference = 90;           // Angulo deseado
int error = 0;                // Error
int vel=500;                  // Velocidad del motor
int motor=6;                  // ID del motor Dynamixel

void setup() {

  Serial.begin(230400);        //Inicializar comunicación serial a 9600 bps:
  Dynamixel.begin(115200,2);    //Establecer comunicación con el motor a 115200 bps
  delay(1000);
  Dynamixel.setEndless(motor,ON); //Establecer modo de operación continuo
  Dynamixel.setTempLimit(motor,60); //Establecer límite de temperatura de operación
  Dynamixel.setMaxTorque(motor,950); //Establecer el torque máximo del motor
}

void loop() {
  // Leer el valor analogo del potenciómetro
  sensorValue = analogRead(analogInPin);
  // Mapear el rango de la lectura del sensor ADC al rango entre 0 y 180 grados
  degree = map(sensorValue, 65, 910, 0, 180);
  // Calculo del error respecto a la posición deseada
  error = reference - degree;
```



```

// Se muestran los resultados en el monitor
Serial.print("\nDesired degree: ");
Serial.println(reference);
Serial.print("Sensor = ");
Serial.print(sensorValue);
Serial.print("\t Degree = ");
Serial.print(degree);
Serial.print("\t Error = ");
Serial.println(error);
// Enviar datos solo cuando se reciba información
if (Serial.available() > 0) {
  // Leer el byte de recibido en el puerto serial:
  reference= Serial.parseInt();
}
// Se limita la rotación del torso de 10 a 170 grados
// debido a la limitante física del potenciómetro
if(degree>=10 and degree<=170){
  Dynamixel.ledStatus(motor,ON);
  // Se verifica si el error es menor a 5 para detener la rotación
  if(error>=-5 and error<=5){
    Dynamixel.setEndless(motor,OFF);
    Dynamixel.turn(motor,LEFT,0);
    Dynamixel.ledStatus(motor,OFF);
  }
  // Si el error es menor a -5 el motor gira hacia la izquierda
  if(error<-5){
    Dynamixel.turn(motor,LEFT,vel);
  }
  // Si el error es mayor a 5 el motor gira hacia la derecha
  else if(error>+5){
    Dynamixel.turn(motor,RIGTH,vel);
  }
}
else{
  // Si el motor no está en los límites 10-170 se desactiva el modo
  // continuo del motor para proteger al potenciómetro
  Dynamixel.setEndless(motor,OFF);
}

```

```

Dynamixel.ledStatus(motor,OFF);
}
// Esperar 2 milisegundos antes del siguiente ciclo
delay(2);
}

```

V. BASE DE DATOS PALABRAS Y FRASES RECONOCIDAS

Cuadro 117. Base de datos palabras a reconocer

Palabra a reconocer	Respuesta
“hola”	“Hola, ¿cómo te llamas?”
“rojo”	“Haz dicho la palabra rojo”
“verde”	“Haz dicho la palabra verde”
“azul”	“Haz dicho la palabra azul”
“buenas tardes”	“Buenas tardes amigo”
“buenos días”	“Buenos días compañero”
“¿qué haces?”	“Platicando contigo”
“¿cuántos años tienes?”	Años y meses
“¿qué hora es?”	Hora exacta
“¿qué día es hoy?”	Día de la semana
“¿cuándo es tu cumpleaños?”	“El 1 de enero”
“¿cómo te llamas?”	“Mi nombre es Pepita”
“¿en dónde estás?”	“UVG, sede central”
“gracias, igualmente”	“¿Cómo estas?”
“bien gracias, ¿y tú?”	“Muy bien, gracias”
“mi nombre es pablo”	“Hola Pablo, es un gusto conocerte”
“mi nombre es luis”	“Hola Luis, es un gusto conocerte”
“mi nombre es jose”	“Hola Jose, es un gusto conocerte”
“mi nombre es glenda”	“Hola Glenda, es un gusto conocerte”
“mi nombre es maría”	“Hola María, es un gusto conocerte”
“mi nombre es angelica”	“Hola Angelica, es un gusto conocerte”
“mi nombre es javier”	“Hola Javier, es un gusto conocerte”
“mi nombre es alex”	“Hola Alex, es un gusto conocerte”
“mi nombre es julio”	“Hola Julio, es un gusto conocerte”
“mi nombre es raul”	“Hola Raul, es un gusto conocerte”

Continuación cuadro 117

Palabra a reconocer	Respuesta
"mi nombre es pedro"	"Hola Pedro, es un gusto conocerte"
"mi nombre es waleska"	"Hola Waleska, es un gusto conocerte"
"mi nombre es marla"	"Hola Marla, es un gusto conocerte"
"mi nombre es chito"	"Hola Chito, es un gusto conocerte"
"mi nombre es jopi"	"Hola Jopi, es un gusto conocerte"
"mi nombre es ana"	"Hola Ana, es un gusto conocerte"
"mi nombre es cristian"	"Hola Cristian, es un gusto conocerte"
"mi nombre es perez"	"Hola Pérez, es un gusto conocerte"
"mi nombre es monica"	"Hola Monica, es un gusto conocerte"
"mi nombre es alejo"	"Hola Alejo, es un gusto conocerte"
"mi nombre es domingo"	"Hola Domingo, es un gusto conocerte"
"mi nombre es daniel"	"Hola Daniel, es un gusto conocerte"
"mi nombre es fatima"	"Hola Fatima, es un gusto conocerte"
"mi nombre es francisco"	"Hola Francisco, es un gusto conocerte"
"cuanto es cuatro más cuatro"	"la respuesta es ocho"

W. RESULTADOS PRUEBAS RECONOCIMIENTO AUDIO

Cuadro 118. Prueba 1, frase: "Mi nombre es Marla".

Distancia [m]	Repetición	Confiabilidad voz [%]
1.2	1	67.00
	2	0.00
	3	98.00
	4	96.00
	5	99.00
	6	61.00
	7	58.00
	8	92.00
	9	85.00
	10	99.00
	PROMEDIO	75.50

Continuación cuadro 118

Distancia [m]	Repetición	Confiabilidad voz [%]
2	1	0.00
	2	68.00
	3	72.00
	4	61.00
	5	64.00
	6	81.00
	7	79.00
	8	78.00
	9	99.00
	10	92.00
	PROMEDIO	69.40
3	1	49.00
	2	43.00
	3	47.00
	4	84.00
	5	88.00
	6	83.00
	7	75.00
	8	91.00
	9	76.00
	10	75.00
	PROMEDIO	71.10

Cuadro 119. Prueba 2, frase: "Mi nombre es Chito".

Distancia [m]	Repetición	Confiabilidad voz [%]
1.2	1	77.00
	2	97.00
	3	81.00
	4	77.00
	5	95.00
	6	98.00
	7	96.00
	8	93.00
	9	66.00

Continuación cuadro 119

Distancia [m]	Repetición	Confiabilidad voz [%]
1.2	10	45.00
	PROMEDIO	82.50
2	1	79.00
	2	0.00
	3	74.00
	4	56.00
	5	58.00
	6	67.00
	7	65.00
	8	54.00
	9	69.00
	10	73.00
	PROMEDIO	59.50
3	1	64.00
	2	92.00
	3	84.00
	4	86.00
	5	84.00
	6	76.00
	7	71.00
	8	78.00
	9	85.00
	10	82.00
	PROMEDIO	80.20

Cuadro 120. Prueba 3, frase: "Mi nombre es Hoppy".

Distancia [m]	Repetición	Confiabilidad voz [%]
1.2	1	95.00
	2	97.00
	3	86.00
	4	98.00
	5	99.00
	6	92.00
	7	97.00

Continuación cuadro 120

Distancia [m]	Repetición	Confiabilidad voz [%]
1.2	8	98.00
	9	99.00
	10	98.00
	PROMEDIO	95.90
2	1	93.00
	2	86.00
	3	88.00
	4	65.00
	5	78.00
	6	68.00
	7	92.00
	8	0.00
	9	82.00
	10	80.00
	PROMEDIO	73.20
3	1	53.00
	2	51.00
	3	53.00
	4	77.00
	5	0.00
	6	18.00
	7	39.00
	8	58.00
	9	87.00
	10	64.00
	PROMEDIO	50.00

Cuadro 121. Prueba 4, frase: "Mi nombre es Raúl".

Distancia [m]	Repetición	Confiabilidad voz [%]
1.2	1	0.00
	2	68.00
	3	82.00
	4	75.00
	5	72.00

Continuación cuadro 121

Distancia [m]	Repetición	Confiabilidad voz [%]
1.2	6	80.00
	7	87.00
	8	79.00
	9	94.00
	10	93.00
	PROMEDIO	73.00
2	1	0.00
	2	41.00
	3	83.00
	4	65.00
	5	76.00
	6	86.00
	7	97.00
	8	72.00
	9	76.00
	10	76.00
	PROMEDIO	67.20
3	1	63.00
	2	83.00
	3	59.00
	4	0.00
	5	75.00
	6	64.00
	7	79.00
	8	69.00
	9	0.00
	10	69.00
	PROMEDIO	56.10

Cuadro 122. Prueba 5, frase: "Mi nombre es Pedro"

Distancia [m]	Repetición	Confiabilidad voz [%]
1.2	1	96.00
	2	97.00
	3	98.00
	4	86.00
	5	89.00
	6	93.00
	7	97.00
	8	83.00
	9	88.00
	10	98.00
	PROMEDIO	92.50
2	1	88.00
	2	97.00
	3	96.00
	4	98.00
	5	97.00
	6	89.00
	7	87.00
	8	92.00
	9	99.00
	10	0.00
	PROMEDIO	84.30
3	1	51.00
	2	96.00
	3	99.00
	4	95.00
	5	96.00
	6	98.00
	7	98.00
	8	0.00
	9	91.00
	10	0.00
	PROMEDIO	72.40

Cuadro 123. Prueba 6, frase: "Mi nombre es Ana".

Distancia [m]	Repetición	Confiabilidad voz [%]
1.2	1	98.00
	2	64.00
	3	87.00
	4	95.00
	5	96.00
	6	94.00
	7	92.00
	8	95.00
	9	97.00
	10	70.00
	PROMEDIO	88.80
2	1	65.00
	2	90.00
	3	0.00
	4	92.00
	5	80.00
	6	94.00
	7	85.00
	8	65.00
	9	72.00
	10	82.00
	PROMEDIO	72.50
3	1	75.00
	2	86.00
	3	67.00
	4	63.00
	5	86.00
	6	92.00
	7	0.00
	8	0.00
	9	85.00
	10	86.00
	PROMEDIO	64.00

Cuadro 124. Prueba 7, frase: "Mi nombre es Pérez".

Distancia [m]	Repetición	Confiabilidad voz [%]
1.2	1	61.00
	2	80.00
	3	99.00
	4	79.00
	5	92.00
	6	72.00
	7	96.00
	8	88.00
	9	99.00
	10	89.00
	PROMEDIO	85.50
2	1	80.00
	2	47.00
	3	94.00
	4	16.00
	5	27.00
	6	67.00
	7	96.00
	8	0.00
	9	98.00
	10	0.00
	PROMEDIO	52.50
3	1	51.00
	2	56.00
	3	52.00
	4	38.00
	5	87.00
	6	67.00
	7	72.00
	8	47.00
	9	82.00
	10	63.00
	PROMEDIO	61.50

Cuadro 125. Prueba 8, frase: "Mi nombre es Waleska".

Distancia [m]	Repetición	Confiabilidad voz [%]
1.2	1	72.00
	2	95.00
	3	96.00
	4	95.00
	5	92.00
	6	96.00
	7	80.00
	8	94.00
	9	97.00
	10	97.00
	PROMEDIO	91.40
2	1	40.00
	2	39.00
	3	0.00
	4	42.00
	5	34.00
	6	52.00
	7	56.00
	8	50.00
	9	0.00
	10	57.00
	PROMEDIO	37.00
3	1	0.00
	2	0.00
	3	0.00
	4	0.00
	5	0.00
	6	0.00
	7	0.00
	8	0.00
	9	0.00
	10	0.00
	PROMEDIO	0.00

Cuadro 126. Prueba 9, frase: "Mi nombre es Cristian".

Distancia [m]	Repetición	Confiabilidad voz [%]
1.2	1	97.00
	2	77.00
	3	71.00
	4	66.00
	5	95.00
	6	70.00
	7	82.00
	8	97.00
	9	96.00
	10	99.00
	PROMEDIO	85.00
2	1	0.00
	2	84.00
	3	99.00
	4	98.00
	5	96.00
	6	95.00
	7	97.00
	8	99.00
	9	88.00
	10	79.00
	PROMEDIO	83.50
3	1	76.00
	2	98.00
	3	79.00
	4	98.00
	5	91.00
	6	82.00
	7	79.00
	8	92.00
	9	98.00
	10	92.00
	PROMEDIO	88.50

Cuadro 127. Prueba 10, frase: "Mi nombre es Luis".

Distancia [m]	Repetición	Confiabilidad voz [%]
1.2	1	74.00
	2	86.00
	3	85.00
	4	49.00
	5	66.00
	6	89.00
	7	76.00
	8	91.00
	9	48.00
	10	77.00
	PROMEDIO	74.10
2	1	80.00
	2	72.00
	3	0.00
	4	78.00
	5	87.00
	6	72.00
	7	95.00
	8	80.00
	9	93.00
	10	80.00
	PROMEDIO	73.70
3	1	63.00
	2	68.00
	3	75.00
	4	42.00
	5	0.00
	6	83.00
	7	82.00
	8	80.00
	9	79.00
	10	83.00
	PROMEDIO	65.50

Cuadro 128. Prueba 11, frase: "Mi nombre es Mónica".

Distancia [m]	Repetición	Confiabilidad voz [%]
1.2	1	96.00
	2	95.00
	3	95.00
	4	97.00
	5	97.00
	6	99.00
	7	98.00
	8	99.00
	9	94.00
	10	95.00
	PROMEDIO	96.50
2	1	97.00
	2	93.00
	3	93.00
	4	91.00
	5	73.00
	6	73.00
	7	43.00
	8	78.00
	9	98.00
	10	80.00
	PROMEDIO	81.90
3	1	89.00
	2	92.00
	3	92.00
	4	99.00
	5	97.00
	6	99.00
	7	97.00
	8	94.00
	9	96.00
	10	94.00
	PROMEDIO	94.90

X. RESULTADOS PRUEBAS RECONOCIMIENTO DE GESTOS

Cuadro 129. Prueba 1, reconocimiento gestos.

Distancia [m]	Repetición	Saludo	Cruzar brazos	Mano der. Arriba	Mano izq. Arriba	Ambas manos arriba	Abrir brazos
1.2	1	1	1	1	1	1	1
	2	0	0	1	1	1	1
	3	1	1	1	1	1	1
	4	1	1	1	1	1	1
	5	1	1	1	1	1	1
	6	1	1	1	1	1	1
	7	0	0	1	1	1	1
	8	1	1	1	1	1	1
	9	1	0	1	1	1	1
	10	1	1	1	1	1	1
	TOTAL	8	7	10	10	10	10
2	1	1	1	1	1	1	1
	2	1	1	1	1	1	1
	3	0	0	1	1	1	1
	4	0	1	1	1	1	1
	5	1	0	1	1	1	1
	6	1	1	1	1	1	1
	7	0	0	1	1	1	1
	8	1	0	1	1	1	1
	9	1	0	1	1	1	1
	10	1	1	1	1	1	1
	TOTAL	7	5	10	10	10	10
3	1	1	1	1	1	1	1
	2	1	1	1	1	1	1
	3	0	1	1	1	1	1
	4	1	1	1	1	1	1
	5	1	1	1	1	1	1
	6	1	1	1	1	1	1
	7	1	1	1	1	1	1
	8	1	1	1	1	1	1
	9	1	0	1	1	1	1
	10	1	1	1	1	1	1
	TOTAL	9	9	10	10	10	10

Cuadro 130. Prueba 2, reconocimiento gestos.

Distancia [m]	Repetición	Saludo	Cruzar brazos	Mano der. Arriba	Mano izq. Arriba	Ambas manos arriba	Abrir brazos
1.2	1	1	1	1	1	1	1
	2	1	1	1	1	1	1
	3	1	1	1	1	1	1
	4	1	1	1	1	1	1
	5	1	1	1	1	1	1
	6	1	1	1	1	1	1
	7	1	1	1	1	1	1
	8	1	1	1	1	1	1
	9	1	1	1	1	1	1
	10	0	1	1	1	1	1
	TOTAL	9	10	10	10	10	10
2	1	0	1	1	1	1	1
	2	1	1	1	1	1	1
	3	1	1	1	1	1	1
	4	1	1	1	1	1	1
	5	1	1	1	1	1	1
	6	1	1	1	1	1	1
	7	1	1	1	1	1	1
	8	0	1	1	1	1	1
	9	1	1	1	1	1	1
	10	1	1	1	1	1	1
	TOTAL	8	10	10	10	10	10
3	1	1	1	1	1	1	1
	2	0	1	1	1	1	1
	3	1	1	1	1	1	1
	4	0	0	1	1	1	1
	5	1	0	1	1	1	1
	6	1	0	1	1	1	1
	7	1	0	1	1	1	1
	8	1	0	1	1	1	1
	9	1	0	1	1	1	1
	10	1	0	1	1	1	1
	TOTAL	8	3	10	10	10	10

Cuadro 132. Prueba 4, reconocimiento gestos.

Distancia [m]	Repetición	Saludo	Cruzar brazos	Mano der. Arriba	Mano izq. Arriba	Ambas manos arriba	Abrir brazos
1.2	1	1	1	1	1	1	1
	2	1	1	1	1	1	1
	3	1	1	1	1	1	1
	4	0	1	1	1	1	1
	5	0	1	1	1	1	1
	6	1	1	1	1	1	1
	7	1	1	1	1	1	1
	8	1	1	1	1	1	1
	9	1	1	1	1	1	1
	10	1	1	1	1	1	1
	TOTAL	8	10	10	10	10	10
2	1	1	1	1	1	1	1
	2	1	1	1	1	1	1
	3	1	1	1	1	1	1
	4	1	1	1	1	1	1
	5	1	1	1	1	1	1
	6	1	1	1	1	1	1
	7	1	1	1	1	1	1
	8	1	1	1	1	1	1
	9	1	1	1	1	1	1
	10	1	1	1	1	1	1
	TOTAL	10	10	10	10	10	10
3	1	1	1	1	1	1	1
	2	1	0	1	1	1	1
	3	1	0	1	1	1	1
	4	1	1	1	1	1	1
	5	1	1	1	1	1	1
	6	1	0	1	1	1	1
	7	1	1	1	1	1	1
	8	1	0	1	1	1	1
	9	1	0	1	1	1	1
	10	1	0	1	1	1	1
	TOTAL	10	4	10	10	10	10

Cuadro 133. Prueba 5, reconocimiento gestos.

Distancia [m]	Repetición	Saludo	Cruzar brazos	Mano der. Arriba	Mano izq. Arriba	Ambas manos arriba	Abrir brazos
1.2	1	1	1	1	1	1	1
	2	1	1	1	1	1	1
	3	1	1	1	1	1	1
	4	1	1	1	1	1	1
	5	1	1	1	1	1	1
	6	1	0	1	1	1	1
	7	1	0	1	1	1	1
	8	1	1	1	1	1	1
	9	1	1	1	1	1	1
	10	1	1	1	1	1	1
	TOTAL	10	8	10	10	10	10
2	1	1	1	1	1	1	1
	2	1	1	1	1	1	1
	3	1	1	1	1	1	1
	4	1	1	1	1	1	1
	5	1	1	1	1	1	1
	6	0	1	1	1	1	1
	7	1	1	1	1	1	1
	8	1	1	1	1	1	1
	9	0	1	1	1	1	1
	10	1	1	1	1	1	1
	TOTAL	8	10	10	10	10	10
3	1	1	1	1	1	1	1
	2	1	0	1	1	1	1
	3	1	0	1	1	1	1
	4	1	0	1	1	1	1
	5	1	0	1	1	1	1
	6	1	0	1	1	1	1
	7	1	0	1	1	1	1
	8	1	0	1	1	1	1
	9	1	0	1	1	1	1
	10	1	0	1	1	1	1
	TOTAL	10	1	10	10	10	10

Cuadro 134. Prueba 6, reconocimiento gestos.

Distancia [m]	Repetición	Saludo	Cruzar brazos	Mano der. Arriba	Mano izq. Arriba	Ambas manos arriba	Abrir brazos
1.2	1	0	1	1	1	1	1
	2	1	1	1	1	1	1
	3	1	0	1	1	1	1
	4	0	1	1	1	1	1
	5	0	0	1	1	1	1
	6	1	0	1	1	1	1
	7	1	1	1	1	1	1
	8	1	1	1	1	1	1
	9	1	1	1	1	1	1
	10	1	0	1	1	1	1
	TOTAL	7	6	10	10	10	10
2	1	1	1	1	1	1	1
	2	1	1	1	1	1	1
	3	1	1	1	1	1	1
	4	1	1	1	1	1	1
	5	1	1	1	1	1	1
	6	1	1	1	1	1	1
	7	1	1	1	1	1	1
	8	1	1	1	1	1	1
	9	1	1	1	1	1	1
	10	1	1	1	1	1	1
	TOTAL	10	10	10	10	10	10
3	1	1	0	1	1	1	1
	2	0	1	1	1	1	1
	3	1	1	1	1	1	1
	4	1	1	1	1	1	1
	5	1	1	1	1	1	1
	6	1	1	1	1	1	1
	7	1	1	1	1	1	1
	8	1	1	1	1	1	1
	9	0	1	1	1	1	1
	10	1	0	1	1	1	1
	TOTAL	8	8	10	10	10	10

Cuadro 135. Prueba 7, reconocimiento gestos.

Distancia [m]	Repetición	Saludo	Cruzar brazos	Mano der. Arriba	Mano izq. Arriba	Ambas manos arriba	Abrir brazos
1.2	1	1	1	1	1	1	1
	2	1	0	1	1	1	1
	3	1	1	1	1	1	1
	4	1	1	1	1	1	1
	5	1	1	1	1	1	1
	6	1	1	1	1	1	1
	7	1	1	1	1	1	1
	8	1	1	1	1	1	1
	9	1	1	1	1	1	1
	10	1	1	1	1	1	1
	TOTAL	10	9	10	10	10	10
2	1	1	1	1	1	1	1
	2	1	1	1	1	1	1
	3	1	1	1	1	1	1
	4	1	1	1	1	1	1
	5	1	1	1	1	1	1
	6	1	1	1	1	1	1
	7	1	1	1	1	1	1
	8	1	1	1	1	1	1
	9	1	1	1	1	1	1
	10	1	1	1	1	1	1
	TOTAL	10	10	10	10	10	10
3	1	1	1	1	1	1	1
	2	1	0	1	1	1	1
	3	0	1	1	1	1	1
	4	1	1	1	1	1	1
	5	1	1	1	1	1	1
	6	0	1	1	1	1	1
	7	1	1	1	1	1	1
	8	1	1	1	1	1	1
	9	1	0	1	1	1	1
	10	1	1	1	1	1	1
	TOTAL	8	8	10	10	10	10

Cuadro 136. Prueba 8, reconocimiento gestos.

Distancia [m]	Repetición	Saludo	Cruzar brazos	Mano der. Arriba	Mano izq. Arriba	Ambas manos arriba	Abrir brazos
1.2	1	1	1	1	1	1	1
	2	1	1	1	1	1	1
	3	1	1	1	1	1	1
	4	1	1	1	1	1	1
	5	1	1	1	1	1	1
	6	0	1	1	1	1	1
	7	1	1	1	1	1	1
	8	1	1	1	1	1	1
	9	1	1	1	1	1	1
	10	1	1	1	1	1	1
	TOTAL	9	10	10	10	10	10
2	1	1	1	1	1	1	1
	2	1	1	1	1	1	1
	3	1	1	1	1	1	1
	4	1	1	1	1	1	1
	5	0	1	1	1	1	1
	6	1	1	1	1	1	1
	7	1	1	1	1	1	1
	8	1	1	1	1	1	1
	9	1	1	1	1	1	1
	10	1	1	1	1	1	1
	TOTAL	9	10	10	10	10	10
3	1	1	1	1	1	1	1
	2	1	1	1	1	1	1
	3	1	1	1	1	1	1
	4	1	1	1	1	1	1
	5	1	1	1	1	1	1
	6	1	1	1	1	1	1
	7	1	1	1	1	1	1
	8	1	1	1	1	1	1
	9	0	1	1	1	1	1
	10	1	1	1	1	1	1
	TOTAL	9	10	10	10	10	10

Cuadro 137. Prueba 9, reconocimiento gestos.

Distancia [m]	Repetición	Saludo	Cruzar brazos	Mano der. Arriba	Mano izq. Arriba	Ambas manos arriba	Abrir brazos
1.2	1	1	1	1	1	1	1
	2	1	1	1	1	1	1
	3	1	1	1	1	1	1
	4	1	1	1	1	1	1
	5	1	1	1	1	1	1
	6	1	1	1	1	1	1
	7	1	1	1	1	1	1
	8	1	1	1	1	1	1
	9	1	1	1	1	1	1
	10	1	1	1	1	1	1
	TOTAL	10	10	10	10	10	10
2	1	1	1	1	1	1	1
	2	1	1	1	1	1	1
	3	1	1	1	1	1	1
	4	1	1	1	1	1	1
	5	1	1	1	1	1	1
	6	1	1	1	1	1	1
	7	1	1	1	1	1	1
	8	1	1	1	1	1	1
	9	1	1	1	1	1	1
	10	1	1	1	1	1	1
	TOTAL	10	10	10	10	10	10
3	1	1	1	1	1	1	1
	2	1	0	1	1	1	1
	3	1	1	1	1	1	1
	4	1	1	1	1	1	1
	5	1	1	1	1	1	1
	6	1	1	1	1	1	1
	7	1	1	1	1	1	1
	8	1	1	1	1	1	1
	9	1	1	1	1	1	1
	10	1	1	1	1	1	1
	TOTAL	10	9	10	10	10	10

Cuadro 138. Prueba 10, reconocimiento gestos.

Distancia [m]	Repetición	Saludo	Cruzar brazos	Mano der. Arriba	Mano izq. Arriba	Ambas manos arriba	Abrir brazos
1.2	1	1	1	1	1	1	1
	2	1	1	1	1	1	1
	3	1	1	1	1	1	1
	4	1	1	1	1	1	1
	5	0	1	1	1	1	1
	6	1	0	1	1	1	1
	7	1	1	1	1	1	1
	8	1	1	1	1	1	1
	9	1	1	1	1	1	1
	10	1	1	1	1	1	1
	TOTAL	9	9	10	10	10	10
2	1	1	1	1	1	1	1
	2	1	1	1	1	1	1
	3	1	1	1	1	1	1
	4	1	1	1	1	1	1
	5	1	1	1	1	1	1
	6	1	1	1	1	1	1
	7	1	1	1	1	1	1
	8	1	1	1	1	1	1
	9	1	1	1	1	1	1
	10	1	1	1	1	1	1
	TOTAL	10	10	10	10	10	10
3	1	0	1	1	1	1	1
	2	0	1	1	1	1	1
	3	1	1	1	1	1	1
	4	1	1	1	1	1	1
	5	1	0	1	1	1	1
	6	1	0	1	1	1	1
	7	1	1	1	1	1	1
	8	0	1	1	1	1	1
	9	0	0	1	1	1	1
	10	0	0	1	1	1	1
	TOTAL	5	6	10	10	10	10

Cuadro 139. Prueba 11, reconocimiento gestos.

Distancia [m]	Repetición	Saludo	Cruzar brazos	Mano der. Arriba	Mano izq. Arriba	Ambas manos arriba	Abrir brazos
1.2	1	1	1	1	1	1	1
	2	1	1	1	1	1	1
	3	1	1	1	1	1	1
	4	1	1	1	1	1	1
	5	1	1	1	1	1	1
	6	1	1	1	1	1	1
	7	1	1	1	1	1	1
	8	1	0	1	1	1	1
	9	1	1	1	1	1	1
	10	1	1	1	1	1	1
	TOTAL	10	9	10	10	10	10
2	1	1	1	1	1	1	1
	2	1	1	1	1	1	1
	3	1	1	1	1	1	1
	4	1	1	1	1	1	1
	5	1	1	1	1	1	1
	6	1	1	1	1	1	1
	7	1	1	1	1	1	1
	8	1	1	1	1	1	1
	9	1	1	1	1	1	1
	10	1	1	1	1	1	1
	TOTAL	10	10	10	10	10	10
3	1	1	1	1	1	1	1
	2	1	1	1	1	1	1
	3	1	1	1	1	1	1
	4	1	1	1	1	1	1
	5	1	1	1	1	1	1
	6	1	0	1	1	1	1
	7	1	1	1	1	1	1
	8	1	1	1	1	1	1
	9	1	1	1	1	1	1
	10	1	0	1	1	1	1
	TOTAL	10	8	10	10	10	10

Y. REPOSITORIO DE CÓDIGO DE PROGRAMACIÓN

En el siguiente enlace se puede encontrar el código fuente y la documentación necesaria del presente proyecto:

https://www.dropbox.com/sh/2lduuqwoxsgzajt/AABeIIHj5kRB4p13CAf_ckWWa?dl=0

Z. TABLA COMPARATIVA DE PLATAFORMAS ARDUINO

	Processor	Processor Voltage	Supply Voltage	Flash	SRAM	Digital I/O Pins	PWM Pins	Analog Inputs	Hardware Serial Ports	Dimensions	Shield Compatibility	Notes and Special Features
Uno	16MHz Atmega 328	5v	7-12v	32Kb	2Kb	14	6	6	1	2.1"x2.7" 53x75mm	Excellent (most will work)	
Uno Ethernet	16MHz Atmega 328	5v	7-12v	32Kb	2Kb	14	6	6	1	2.1"x2.7" 53x75mm	Very Good (some pin conflicts)	Has Ethernet Port. Requires FTDI cable to program.
Mega	16MHz Atmega 2560	5v	7-12v	256Kb	8Kb	54	14	16	4	2.1"x4" 53x102mm	Good (some pinout differences)	
Mega ADK	16MHz Atmega 2560	5v	7-12v	256Kb	8Kb	54	14	16	4	2.1"x4" 53x102mm	Good (some pinout differences)	Works with Android Development Kit.
Leonardo	16MHz Atmega 32U4	5v	7-12v	32Kb	2.5Kb	20*	7	12*	1	2.1"x2.7" 53x75mm	Fair (many Pinout Differences)	Native USB capabilities. USB Micro B programming port.
Due	84MHz ARM SAM3X8E	3.3v	7-12v	512Kb		54	12	12	4	2.1"x4" 53x102mm	Poor (voltage and pinout differences)	Fastest processor. Most memory. 2-channel DAC. USB micro B programming port. Native micro AB port.
Micro	16MHz Atmega 32U4	5v	5v	32Kb	2.5Kb	20*	7	12*	1	0.7"x1.9" 18x49mm	N/A	Smallest board size. Native USB capabilities
Flora	16MHz Atmega 32U4	3.3v	3.5-16v	32Kb	2.5Kb	8*	4	4*	1	1.75" dia 44.5mm dia	N/A	Sewable Pads. Fabric-friendly design. Native USB Capabilities
DC Boarduino	16MHz Atmega 328	5v	7-12v	32Kb	2Kb	14	6	6	1	0.8"x3" 20.5x76mm	N/A	Can build without headers or sockets for smaller size. Requires FTDI cable for programming
USB Boarduino	16MHz Atmega 328	5v	5v (USB)	32Kb	2Kb	14	6	6	1	0.8"x3" 20.5x76mm	N/A	Can build without headers or sockets for smaller size. USB Mini B programming port.
Menta	16MHz Atmega 328	5v	7-12v	32Kb	2Kb	14	6	6	1	0.8"x3" 20.5x76mm	Excellent (most will work)	Mint-Tin Size and Prototyping Area. Requires FTDI cable for programming.

AA. CÓDIGO EN ARDUINO

```
#include <DynamixelSerial1.h>
```

```
#include <Servo.h>
```

```
Servo Servo1;
Servo Servo2;
Servo Servo3;
Servo Servo4;
Servo Servo5;
Servo Servo6;
float Angulo[] = {0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0};
float AntAngulo[] = {0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0};
int ID [] = {4,8,3,7,6,0,0,0,0,0,0};
float Grados;
String inString = "";
int index;
float conversion1;
boolean horario1;
boolean llegar1;
float conversion2;
boolean horario2;
boolean llegar2;
float conversion3;
boolean horario3;
boolean llegar3;
int MotorB;
int MotorD;
int MotorE;

void setup(){
  Dynamixel.begin(115200,2);
  delay(1000);
  Dynamixel.setEndless(8, ON);
  Dynamixel.setEndless(7, ON);
  Dynamixel.moveSpeed(4,0,1000);
  delay(1000);
  Dynamixel.turn(8,LEFT,0);
  Dynamixel.turn(7,LEFT,0);
  Serial.begin(115200);
  Servo1.attach(3);
  Servo2.attach(4);
```

```

Servo3.attach(5);
Servo4.attach(6);
Servo5.attach(7);
Servo6.attach(8);
}

void loop(){
  Serial.print(analogRead(0));
  Serial.print("  ");
  Serial.println(conversion1);
  while (Serial.available()) {
    char inChar = (char)Serial.read(); //Leer el serial y convertirlo a char
    if (isDigit(inChar)) {           //Agarrando los digitos de lo que se recibe
      inString += inChar;           //Se le suma el digito al inString
    }
    else if (inChar == '\n' and inString.length() > 0) { //Que se apache enter y que no sea nada lo que se
envia
      Serial.println("NUEVO ANGULO ");
      AntAngulo[index] = Angulo[index];           //Guardando la posicion nueva como la anterior para
tomarla como la nueva inicial
      Angulo[index] = inString.toInt();           //Se convierten los numeros recibidos a integer y se guardan
en la variable angulo
      inString = "";
    }
    else if (inChar == '#'){
      Serial.println("MOVER");
      Mover();
      for(int i = 0; i < 12; i++){
        AntAngulo[i] = Angulo[i];           //Se updatea la referencia de angulo para la siguiente iteración
      }
    }
    else {
      if (inChar - 65 < 13 and inChar - 65 > -1){
        Serial.println(inChar);
        Serial.println("CAMBIO INDEX");
        index = inChar-65;
      }
    }
  }
}

```

```

    }
  }
}

void Mover(){
//-----
  llegar1 = false;
  conversion1 = 540 + (float)(1023-540)*(Angulo[1]/180);
  if (conversion1 > analogRead(0)) {
    horario1 = true;
  }
  else {
    horario1 = false;
  }
//-----

  llegar2 = false;
  conversion2 = 540 + (float)(1023-540)*(Angulo[1]/180);
  if (conversion2 > analogRead(1)) {
    horario2 = true;
  }
  else {
    horario2 = false;
  }
//-----

  llegar3 = false;
  conversion3 = 540 + (float)(1023-540)*(Angulo[1]/180);
  if (conversion3 > analogRead(2)) {
    horario3 = true;
  }
  else {
    horario3 = false;
  }
//-----

  for(float x = 0; x<1; x = x+0.05){ //Definiendo la cantidad de iteraciones del angulo
    comparar();
  }
}

```

```

comparar1();
comparar2();
for(int y = 0; y<sizeof(ID); y++){ // Iterar los motores
  Grados = (AntAngulo[y] + (Angulo[y] - AntAngulo[y])*x); //
  if (y < 5 and y != 1){
    Dynamixel.move(ID[y],Grados);
  }
  else {
    switch(y){
      case 5:
        Servo1.write(Grados);
        break;
      case 6:
        Servo2.write(Grados);
        break;
      case 7:
        Servo3.write(Grados);
        break;
      case 8:
        Servo4.write(Grados);
        break;
      case 9:
        Servo5.write(Grados);
        break;
      case 10:
        Servo6.write(Grados);
        break;
    }
  }
}
}
}
}
//-----
while (!legar1 and !legar2 and !legar3 ) {
  comparar();
  comparar1();
  comparar2();
}

```

```

//-----

// Serial.println(AntAngulo[1]);
// Serial.println(Angulo[1]);

}

void comparar(){
    MotorB = analogRead(0);
    if (abs(MotorB - conversion1) <= 15){
        Dynamixel.turn(8, LEFT, 0);
        llegar1 = true;
    }
    else {
        if (horario1){
            Dynamixel.turn(8, RIGTH, 300);
        }
        else {
            Dynamixel.turn(8, LEFT, 300);
        }
    }
}

void comparar1(){
    MotorD = analogRead(1);
    if (abs(MotorD - conversion2) <= 15){
        Dynamixel.turn(7, LEFT, 0);
        llegar2 = true;
    }
    else {
        if (horario2){
            Dynamixel.turn(7, RIGTH, 300);
        }
        else {
            Dynamixel.turn(7, LEFT, 300);
        }
    }
}

```

```

}

void comparar2(){
    MotorE = analogRead(2);
    if (abs(MotorE - conversion3) <= 15){
        Dynamixel.turn(8, LEFT, 0);
        llegar3 = true;
    }
    else {
        if (horario3){
            Dynamixel.turn(8, RIGTH, 300);
        }
        else {
            Dynamixel.turn(8, LEFT, 300);
        }
    }
}
}

```

BB. RUTINA PRINCIPAL DE CÓDIGO EN MATLAB

```

objetos = instrfind;
delete(objetos)
clear
clc

x = 1;
n = 2;
y = 1;
m = 2;
palabra = ";
gesto = ";

s = serial('COM3');
BaudRate = 115200;
fopen(s)
pause(5);
while 1

```



```

xmlfile = fullfile('C:\Users\User\Desktop\reconocido.xml');
DispositivoTraductordeStruct = xml2struct(xmlfile);
largoPalabra = length(DispositivoTraductordeStruct.Children(4).Children);
largoGesto = length(DispositivoTraductordeStruct.Children(2).Children);

if largoPalabra > x
    palabra = DispositivoTraductordeStruct.Children(4).Children(n).Children(1).Data
    x = largoPalabra;
    n = n+2;
    pause (1)
end
if largoGesto > y
    gesto = DispositivoTraductordeStruct.Children(2).Children(m).Children(1).Data
    y = largoGesto;
    m = m+2;
    pause (1)
end

if strcmp(palabra,'hola')
    MoverMotores(s,1);
    pause(1.05)
    MoverMotores(s,2);
    pause(1.05)
    MoverMotores(s,3);
    pause(1.05)
    MoverMotores(s,2);
    pause(1.05)
    MoverMotores(s,3);
    pause(1.05)
    MoverMotores(s,2);
    pause(1.05)
    MoverMotores(s,3);
    pause(1.05)
    MoverMotores(s,2);
    pause(1.05)
    MoverMotores(s,3);
    pause(1.05)

```

```

MoverMotores(s,2);
pause(1.05)
MoverMotores(s,1);
pause(1.05)
palabra = "";
end

if strcmp(gesto,'derecha arriba')
    MoverMotores(s,4);
    pause(2.2)
    MoverMotores(s,5);
    pause(2.2)
    gesto = "";
end
end

```

CC. FUNCIÓN MOVERMOTORES DEL CÓDIGO EN MATLAB

```

function MoverMotores(s, Posicion)
Nombres = [ 'A' 'B' 'C' 'D' 'E' 'F' 'G' 'H' 'I' 'J' 'K' 'L'];
Matriz = {4000, 0, 0, 0, 0, 180, 180, 180, 0, 180, 90, 0; % |1|-----
    4000, 0, 0, 0, 0, 180, 180, 180, 0, 180, 35, 0; % |2| Saludo      |
    4000, 0, 0, 0, 0, 180, 180, 180, 0, 180, 180, 0; % |3|-----
    4000,4000, 0, 0, 0, 180, 180, 180, 0, 180, 90, 0; % |4| Derecha arriba |
    0,1000,1000, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0;
    0,2000,2000, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0;
    0,3000,3000, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0;
    0,4000,4000, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0;
};

% fprintf(s,Nombres(1))
% char(Nombres(1))
% fprintf(s,mat2str(Matriz{2,1}))
% mat2str(Matriz{2,1})
for i = 1:12

```

```

fprintf(s,Nombres(i))
fprintf(s,mat2str(Matriz{Posicion,i}))
% Nombres(i)
% Matriz{Posicion,i}
end
fprintf(s,'#')

end

```

DD. PROGRAMA PARA ENSAYOS DE FUNCIONAMIENTO

```

//*****

//Universidad del Valle de Guatemala
//Facultad de Ingeniería
//Departamento de Ingeniería Mecatrónica
//Trabajo de graduación
//Código micro controlador para ensayos de funcionamiento
//Ana Debroy
//Controlador: ADAFRUIT METRO
//Interruptor: E3Z-R81
//*****

//*****

//DEFINICIÓN DE CONSTANTES
const int RELAY_1 = 7;    //Relevador 1.
const int RELAY_2 = 6;    //Relevador 2.
const int PE_SENSOR = 2; //Sensor fotoeléctrico.

//DEFINICIÓN DE VARIABLES
//PARA EL MENÚ
int OPCION = 0;          //Guarda la seleccion de menú del usuario.
int PRUEBA_T = 0;        //Guardan el # de prueba actual.
int PRUEBA_C = 0;        //
int PRUEBA_D = 0;        //

//PRUEBAS DE TIEMPO
int PRESION_T[20];       //Guarda las presiones utilizadas.
unsigned long TIEMPO1;   //Referencia.
unsigned long TIEMPO2;   //Cuando se recibe la señal del sensor.

```

```

    unsigned long TIEMPO_FINAL[20]; //Reacción.
//PRUEBAS DE CARGA
    int PESO[9];           //Pesos utilizados como cargas.
    int PRESION_C[9];      //Presiones utilizadas.
    int LONGITUD[9];      //Longitudes de los actuadores.
//PRUEBAS DESTRUCTIVAS
    int PRESION_D[20];     //Presiones utilizadas.
//DEFINICION DE VARIABLES
    int incomingByte = 0;  //Datos seriales entrantes.
//*****

//*****

void setup() {
    //CONFIGURACION DE PINES DE SALIDA
    pinMode(RELAY_1, OUTPUT);
    pinMode(RELAY_2, OUTPUT);
    pinMode(PE_SENSOR, INPUT);
    //INICIALIZACIÓN DE COMUNICACIÓN SERIAL
    Serial.begin(9600);    //BaudRate de 9600
    delay(1000);
    limpiarP();           //Limpiamos pantalla
}
//*****

//*****

void loop() {
    menuP();
    if(OPCION == 1){
        menuT();           //Se despliega el menu para pruebas de tiempo
        TIEMPO1 = millis(); //Tiempo de referencia 1
        digitalWrite(RELAY_1, HIGH); //Abre valvula de entrada de aire
        while(1){
            //Ya llegó el actuador a su longitud en activación máxima?
            if(digitalRead(PE_SENSOR) == HIGH){
                TIEMPO2 = millis(); //Tiempo de referencia 2
                digitalWrite(RELAY_1, LOW); //Cierra valvula de entrada de aire
                TIEMPO_FINAL[PRUEBA_T] = (TIEMPO2 - TIEMPO1); //Tiempo de reaccion del actuador
            }
        }
    }
}

```

```

digitalWrite(RELAY_2, HIGH); //Abre valvula de salida de aire
delay(1000);
digitalWrite(RELAY_2, LOW); //Cierra valvula de salida de aire
break;
}
}
Serial.println("Listo!"); //Se le muestra al usuario el tiempo de reaccion
Serial.print("Tiempo: ");
Serial.print(TIEMPO_FINAL[PRUEBA_T]);
Serial.println(" mS");
if(PRUEBA_T == 19){ //Se usaron todos los espacios de memoria?
  Serial.println("MEMORIA LLENA!!!!");
  Serial.println("SE SOBRESERIBIRAN DATOS DE AHORA EN ADELANTE");
  PRUEBA_T = 0;
}
PRUEBA_T++;
}
if(OPCION == 2){
  menuC();
  Serial.println("Presione cualquier tecla para continuar... ");
  in();
  inflar();
  Serial.println("Ingrese la longitud actual del actuador: ");
  LONGITUD[PRUEBA_C] = in();
  digitalWrite(RELAY_2, HIGH); //Abrimos el desfogue de aire
  delay(1000);
  digitalWrite(RELAY_2, LOW); //Cerramos el desfogue de aire
  if(PRUEBA_C == 8){ //Se usaron todos los espacios de memoria?
    Serial.println("MEMORIA LLENA!!!!");
    Serial.println("SE SOBRESERIBIRAN DATOS DE AHORA EN ADELANTE");
    PRUEBA_C = 0;
  }
  PRUEBA_C++;
}
if(OPCION == 3){
  menuD();
  Serial.println("Presione cualquier tecla para continuar... ");

```

```

in();
inlar();
delay(100);
digitalWrite(RELAY_2, HIGH); //Abrimos el desfogue de aire
delay(1000);
digitalWrite(RELAY_2, LOW); //Cerramos el desfogue de aire
if(PRUEBA_D == 19){ //Se usaron todos los espacios de memoria?
  Serial.println("MEMORIA LLENA!!!!");
  Serial.println("SE SOBRESERIBIRAN DATOS DE AHORA EN ADELANTE");
  PRUEBA_D = 0;
}
PRUEBA_D++;
}
if(OPCION == 4){
  salir();
}
}
int in(){
  while(1){
    if (Serial.available() > 0) {
      incomingByte = int(Serial.parseInt());
      return incomingByte;
      break;
    }
  }
}
//*****

//*****

void menuP(){
  Serial.println("+-----+");
  Serial.println("|          MENU          |");
  Serial.println("+-----+");
  Serial.println("| (1) INICIAR PRUEBA DE TIEMPO  |");
  Serial.println("| (2) INICIAR PRUEBA DE CARGA   |");
  Serial.println("| (3) INICIAR PRUEBA DESTRUCTIVA |");
  Serial.println("| (4) SALIR                     |");
}

```

```

Serial.println("+-----+");
Serial.println("|      Eliga una opcion      |");
Serial.println("+-----+");
OPCION = in();
}
//*****

//*****

void menuT() {
Serial.println("+-----+");
Serial.println("|  PRUEBAS DE TIEMPO  |");
Serial.println("+-----+");
Serial.println("| Ingrese presion actual |");
Serial.println("+-----+");
PRESION_T[PRUEBA_T] = in();
Serial.print("Valor registrado: ");
Serial.print(PRESION_T[PRUEBA_T]);
Serial.println(" psi");
}
//*****

//*****

void menuC() {
Serial.println("+-----+");
Serial.println("|  PRUEBAS DE CARGA  |");
Serial.println("+-----+");
Serial.println("| Ingrese presion y carga actual |");
Serial.println("+-----+");
PRESION_C[PRUEBA_C] = in();
PESO[PRUEBA_C] = in();
Serial.print("Valores registrados: ");
Serial.print(PRESION_C[PRUEBA_C]);
Serial.println(" psi");
Serial.print(PESO[PRUEBA_C]);
Serial.println(" kg");
}

```

```

}
//*****

//*****

void menuD() {
    Serial.println("+-----+");
    Serial.println("|  PRUEBAS DE DESTRUCTIVAS  |");
    Serial.println("+-----+");
    Serial.println("|  Ingrese presion actual  |");
    Serial.println("+-----+");
    PRESION_D[PRUEBA_D] = in();
    Serial.print("Valor registrado: ");
    Serial.print(PRESION_D[PRUEBA_D]);
    Serial.println(" psi");
}
//*****

//*****

void limpiarP(){
    int cont = 30;
    while (cont != 0){
        Serial.println("");
        cont--;
    }
}
//*****

//*****

void salir(){
    //SALIR
    Serial.println("+-----+");
    Serial.println("|=====FIN=====|");
    Serial.println("+-----+");
    Serial.println("");
    Serial.println("");
}

```



```
Serial.println("Presione 'Ctrl+R' y presione 'Ctrl+Shift+R' al finalizar el envio de datos");
Serial.println("Enter para continuar...");
in();
//PRUEBAS DE TIEMPO
int k = 1;
while(PRUEBA_T >0){
  Serial.print(k);
  Serial.print(',');
  Serial.print(PRESION_T[k-1]);
  Serial.print(',');
  Serial.println(TIEMPO_FINAL[k-1]);
  PRUEBA_T--;
  k++;
}

//Divisor
Serial.println(" -, -, -");

//PRUEBAS DE CARGA
int l = 1;
while(PRUEBA_C >0){
  Serial.print(l);
  Serial.print(',');
  Serial.print(PRESION_C[l-1]);
  Serial.print(',');
  Serial.print(PESO[l-1]);
  Serial.print(',');
  Serial.println(LONGITUD[l-1]);
  PRUEBA_C--;
  l++;
}

//Divisor
Serial.println(" -, -, -");

//PRUEBAS DESTRUCTIVAS
int m = 1;
```

```
while(PRUEBA_D >0){
  Serial.print(m);
  Serial.print(',');
  Serial.println(PRESION_D[m-1]);
  PRUEBA_D--;
  m++;
}
while(1){
}
}
//*****
//*****
void inflar(){
  digitalWrite(RELAY_1, HIGH);    //Abre valvula
  delay(1500);
  digitalWrite(RELAY_1, LOW);    //Cierra valvula
}
//*****
```