

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



Diseño de cabeza y cuello animatrónicos con dieciocho grados
de libertad con movimientos suaves

Trabajo de graduación presentado por Christopher Alexander Jenatz
Melgar para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería
Mecatrónica

Guatemala,

2021

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



Diseño de cabeza y cuello animatrónicos con dieciocho grados
de libertad con movimientos suaves

Trabajo de graduación presentado por Christopher Alexander Jenatz
Melgar para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería
Mecatrónica

Guatemala,


2021

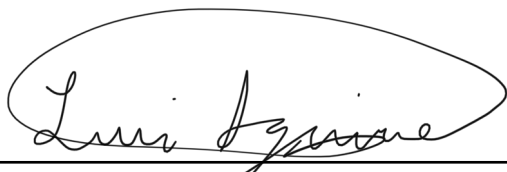
Vo.Bo.:

(f) 
Ing. Kurt Kellner

Tribunal Examinador:

(f) 
Ing. Kurt Kellner

(f) 
Ing. Pablo Mazariegos

(f) 
Ing. Luis Aguirre

Fecha de aprobación: Guatemala, 22 de enero de 2021.

La ejecución de este trabajo de graduación no se hubiera podido llevar a cabo sin el apoyo incondicional de las personas que se relacionan conmigo directamente. Principalmente agradezco la provisión de mi padre, quien ha brindado apoyo emocional así como económico a lo largo de todo mi trayecto universitario. De igual forma, me siento muy agradecido por el consejo y comprensión de mi madre, quien se ha tomado el tiempo y la dedicación para ofrecer su ayuda en los momentos más complicados.

Debo reconocer y agradecer el indispensable apoyo de Paula quien, además de brindarme su apoyo a lo largo de estos cinco años de estudios universitarios, ha contribuido en este proyecto con su conocimiento en diseño gráfico y técnicas de renderizado.

Expreso mi gratitud por el gran aporte de mi asesor y demás catedráticos involucrados en el desarrollo de este documento al compartirme sus conocimientos, ideas y experiencias al igual que resolviendo mis dudas.

Desde muy pequeño he sentido una pasión por la creación de mecanismos al igual que de dispositivos tecnológicos. Incluso, desde antes de que pueda recordar, mis padres siempre me han comentado que mi mejor juguete resultaba ser una caja de cartón para hacer fluir mi creatividad y crear objetos animados. Este interés que surgió desde tan joven se ve plasmado en este trabajo de graduación al brindarme la oportunidad de desenvolverme en la creación de un robot animatrónico.

Prefacio	V
Lista de figuras	XI
Lista de cuadros	XIII
Resumen	XVI
Abstract	XVIII
1. Introducción	1
2. Antecedentes	3
3. Justificación	7
4. Objetivos	9
4.1. Objetivo general	9
4.2. Objetivos específicos	9
5. Alcance	11
6. Marco teórico	13
7. Diseño mecánico	31
7.1. Imitación de movimientos	31
7.1.1. Ojos	32
7.1.2. Boca	37
7.1.3. Cuello	40
7.1.4. Cejas y párpados	45
7.2. Análisis	48
7.2.1. Esfuerzos en ojos	49
7.2.2. Esfuerzos en boca	50
7.2.3. Esfuerzos en cuello	54

7.2.4. Esfuerzos en cejas	56
7.3. Reducción de vibraciones	58
8. Diseño de circuito impreso	65
9. Diseño de software	71
9.1. Facciones faciales	71
9.2. Comunicación serial	73
9.3. Interfaz gráfica	74
10. Conclusiones	75
11. Recomendaciones	77
12. Bibliografía	79
13. Anexos	81
13.1. Planos de construcción	82
13.2. Códigos de relevancia	83

Lista de figuras

1.	Reloj mecánico tipo Cuckoo de 1650 [2]	3
2.	Animatronic de la Bruja del Oeste en <i>The Great Movie Ride</i> en <i>Walt Disney World</i> [5]	4
3.	Cabeza animatrónica del año 2018 como trabajo de graduación del Ing. Benegas [6]	5
4.	Junta universal diseñada en <i>Autodesk Inventor</i> por Manolo Benegas [6]	5
5.	Musculatura facial humana desde tres ángulos [7]	13
6.	Movilidad de los ojos según cada músculo [8]	14
7.	Anatomía muscular de los ojos [8]	15
8.	Anatomía muscular de las cejas y párpados [9]	15
9.	Anatomía muscular de la boca [7]	16
10.	Músculo risorio [10]	16
11.	Músculos del cuello para la movilidad de la cabeza [11]	17
12.	Mecanismo de cuatro barras de cadena cerrada [12]	18
13.	Mecanismo de cinco barras. Modificación de 4 barras. [12]	18
14.	Los seis pares inferiores simbolizados de forma gráfica [12]	19
15.	Actuador lineal <i>Tritex II</i> con servo-motor [13]	20
16.	Mecanismo de frenado en bicicleta con cable <i>Bowden</i> [15]	21
17.	Diagrama de funcionamiento de mecanismo <i>Bowden</i> [15]	22
18.	Bloque representativo de un sistema de control [16]	22
19.	Respuesta transiente y estacionaria de un sistema [16]	22
20.	Representación por bloques de un sistema controlado por un controlador PID [17]	23
21.	Tabla de control de memorias EEPROM y RAM [19]	25
22.	Servo-motor <i>Dynamixel XL – 320</i> [19]	26
23.	Rango de operación de <i>Dynamixel XL – 320</i> [19]	26
24.	Señal <i>PWM</i> de control para servo <i>TowerPro SG90</i>	26
25.	Micro-servo <i>TowerPro SG90</i>	27
26.	Fotografía del servo-motor <i>Dynamixel AX – 12A</i> [20]	27
27.	Diagrama de funcionamiento de fabricación FDM [21]	28
28.	Diagrama de funcionamiento de fabricación DLP [22]	29
29.	Interfaz gráfica de <i>Fusion 360</i> [23]	29

30. Render del sistema robótico completo	32
31. Render del sistema robótico para los ojos	33
32. Recorrido de barras del mecanismo de elevación de los globos oculares (dimensiones en milímetros)	34
33. Ángulos θ_3 y θ_4 en función de θ_2 en el mecanismo de elevación de los globos oculares (dimensiones en radianes)	34
34. Coordenadas de los puntos A y B del mecanismo de elevación de los globos oculares en función de θ_2 (dimensiones en milímetros)	35
35. Recorrido de barras del mecanismo del giro de los globos oculares (dimensiones en milímetros)	35
36. Ángulos θ_3 y θ_4 en función de θ_2 en el mecanismo de giro de los globos oculares (dimensiones en radianes)	36
37. Coordenadas de los puntos A y B del mecanismo de giro de los globos oculares en función de θ_2 (dimensiones en milímetros)	36
38. Render del sistema robótico para la boca	37
39. Trayectoria del efector final en el mecanismo de cinco barras en los extremos de los labios	39
40. Coordenadas del efector final en el mecanismo de cinco barras en los extremos de los labios	39
41. Ángulos θ_3 y θ_4 en el mecanismo de cinco barras en los extremos de los labios	40
42. Render del sistema robótico para el cuello	40
43. Recorrido de barras del mecanismo del giro del cuello (dimensiones en milímetros)	41
44. Ángulos θ_3 y θ_4 en función de θ_2 en el mecanismo de giro del cuello (dimensiones en radianes)	42
45. Coordenadas de los puntos A y B del mecanismo de giro del cuello en función de θ_2 (dimensiones en milímetros)	42
46. Modelo simplificado elaborado en <i>Autodesk Inventor</i> para su análisis en el ambiente <i>Dynamic Simulation</i> .	43
47. Gráfico de movimiento para cabeceo negativo	43
48. Gráfico de movimiento para cabeceo positivo	44
49. Gráfico de movimiento para alabeo negativo	44
50. Gráfico de movimiento para alabeo positivo	44
51. Render del sistema robótico para la ceja izquierda	45
52. Render del sistema robótico para la ceja derecha	46
53. Recorrido de barras del mecanismo de los párpados (dimensiones en milímetros)	47
54. Ángulos θ_3 y θ_4 en función de θ_2 en el mecanismo de los párpados (dimensiones en radianes)	47
55. Coordenadas de los puntos A y B del mecanismo de los párpados en función de θ_2 (dimensiones en milímetros)	47
56. Diagrama de desplazamientos netos del mecanismo de los ojos	50
57. Diagrama de esfuerzos <i>von Mises</i> del mecanismo de los ojos	50
58. Diagrama de desplazamientos netos en la mandíbula inferior	51
59. Diagrama de esfuerzos en la mandíbula inferior	51
60. Diagrama de esfuerzos <i>von Mises</i> en las bases del labio de la mandíbula inferior	52
61. Diagrama de desplazamientos netos en la mandíbula superior en vista isométrica	52
62. Diagrama de desplazamientos netos en la mandíbula superior en vista lateral	53
63. Diagrama de desplazamientos netos en soporte de servo de labio superior	53

64. Diagrama de esfuerzos <i>von Mises</i> en soporte de 4 servos para el movimiento del extremo de los labios	54
65. Diagrama de desplazamientos netos en soporte de 4 servos para el movimiento del extremo de los labios	54
66. Diagrama de desplazamientos netos en bases rotativa y estacionaria del cuello	55
67. Diagrama de esfuerzos <i>von Mises</i> en bases rotativa y estacionaria del cuello	55
68. Diagrama de desplazamientos netos en parte superior del cuello	56
69. Diagrama de esfuerzos <i>von Mises</i> en la parte superior del cuello	56
70. Diagrama de esfuerzos en la ceja derecha en vista lateral	57
71. Diagrama de esfuerzos <i>von Mises</i> en la ceja derecha en vista isométrica	57
72. Diagrama de desplazamientos netos en la ceja izquierda	58
73. Diagrama de esfuerzos <i>von Mises</i> en la ceja izquierda	58
74. Trayectoria del efector sin optimizar y derecha optimizada [25]	59
75. Refuerzo impreso mediante tecnología <i>FDM</i> que conecta la ceja derecha y el módulo de los ojos	60
76. Refuerzo impreso mediante tecnología <i>FDM</i> que conecta la ceja izquierda y el módulo de los ojos	60
77. Refuerzo que conecta el soporte de los cuatro actuadores que controlan los extremos de los labios y el módulo de los ojos.	61
78. Comparativo entre trayectorias suavizada y no suavizada mediante control PID de actuadores Dynamixel	63
79. Comparativo entre trayectoria con una correcta y deficiente selección de ganancias PID	63
80. Esquemático del circuito implementado en el PCB en el programa <i>Altium Designer</i>	66
81. <i>Footprint</i> del controlador OpenCm9.04, es decir, dos hileras de headers hemibra 1x20	67
82. Modelo 3D del PCB en el programa <i>Altium Designer</i>	67
83. Lado inferior de la placa diseñada en el programa <i>Altium Designer</i>	68
84. Layout para exportación de archivo gerber para fabricación de placa	69
85. Interfaz gráfica elaborada en Processing	74
86. Plano de fabricación para corte láser de la carcasa del controlador y fuente de poder	82
87. Plano de fabricación para corte láser de las bases rotativas y estática del cuello	83

Lista de cuadros

1.	Características de los músculos oculomotores [8]	14
2.	Movilidad de los músculos unilateral y bilateral [11]	17
3.	GDL asociados con los seis tipos de pares inferiores (juntas de contacto superficial)	19
4.	Tabla comparativa entre sistemas hidráulicos, neumáticos y electromecánicos [14]	20
5.	Síntesis de mecanismos utilizados en la cabeza animatrónica	32
6.	Dimensiones del mecanismo de cuatro barras para la elevación de los ojos	33
7.	Dimensiones del mecanismo de cuatro barras para cada párpado	46
8.	Características del acero empleado en la cabeza animatrónica	48
9.	Características del filamento PLA empleado en la cabeza animatrónica. Estas propiedades varían según parámetros de la impresión 3D	48
10.	Características de las planchas de MDF empleadas en la cabeza animatrónica	49
11.	Características del plástico ABS de varios elementos de los servo-motores	49
12.	Primeras 4 frecuencias modales de cada módulo	61
13.	Siguientes 4 frecuencias modales de cada módulo	61
14.	Ganancias del controlador PID de servos inteligentes	62
15.	Componentes electrónicos interconectados mediante la placa desarrollada en <i>Altium Designer</i>	66
16.	Reglas implementadas en el ruteo de pistas en el PCB en <i>Altium Designer</i>	68
17.	Secuencia de envío de datos <i>syncWrite</i>	72
18.	Secuencia de lectura de datos <i>syncRead</i>	72
19.	Paquete de datos en Protocolo 1.0	73
20.	Paquete de datos en Protocolo 2.0	73
21.	Codificación de facciones en comunicación serial UART	73

Este trabajo de graduación tiene como objetivo principal el diseño mecánico, electrónico y de control mediante software de una cabeza animatrónica con dieciocho grados de libertad. Para lograr esto se debieron seleccionar servo-motores que se acoplen a las necesidades de cada aplicación dentro del dispositivo; por ejemplo, en los ojos se buscó que estos fueran livianos, en el rostro fueran precisos y en el cuello potentes. Asimismo, se buscó que los movimientos que ejecute esta cabeza animatrónica fueran lo más naturales y fluidos posible para brindarle al sistema mayor verosimilitud.

Para lograr un diseño acertado se requirió una detallada investigación de la anatomía del cuello y rostro para transformar los movimientos orgánicos de un ser humano a una versión simplificada electromecánica. Dado que en esta sección del cuerpo existe una gran cantidad de masa muscular no sería posible asignar a cada músculo un actuador en el modelo animatrónico. Bajo el criterio de predominancia se seleccionaron los músculos más importantes y se les diseñó un mecanismo que simule el movimiento real. Basándose en esta investigación se simuló en el programa *Matlab* los mecanismos de la cabeza animatrónica para obtener rangos de funcionamiento.

El modelado de los mecanismos fue elaborado mediante el Software CAD *Autodesk Fusion 360* de forma modular para luego realizar un ensamble de todas las piezas de la boca, ojos, párpados, cejas, boca, labios y cuello. A todas estas piezas se les elaboró un estudio de esfuerzos para asegurar su buen desempeño sin correr el riesgo de romperse. De igual forma se debió ejecutar un proceso de diseño iterativo para revisar fallas de cada modelo y minimizar el problema de inestabilidad y vibraciones. Las frecuencias de resonancia fueron extraídas del modelo y tomadas en consideración en el diseño de trayectorias en *Software*.

Las piezas de los mecanismos fueron diseñadas para poder ser fabricadas mediante impresión 3D con tecnología de Modelado por Deposición de Filamento Fundido (*FDM*, por sus siglas en inglés), así como por Procesamiento de Luz Digital (*DLP*, por sus siglas en inglés). La primera técnica debe ser empleada para las piezas más simples sin necesidad de alto nivel de exactitud, mientras que una impresora *DLP* se encargaría de la fabricación de los objetos más orgánicos y complejos como los ojos y mandíbula inferior.

La suavización de los movimientos y la reducción de vibraciones se logró mediante la

colocación de refuerzos en puntos estratégicos, la utilización de materiales más robustos que los empleados en previas versiones de la cabeza animatrónica desarrolladas en la Universidad del Valle de Guatemala y la introducción de un controlador PID. Cada actuador con oportunidad de ser controlado mediante esta estrategia fue calibrado de forma individual para que las ganancias se acoplaran a la inercia de cada mecanismo.

Posteriormente, se procedió a diseñar una placa *PCB* en el programa *Altium Designer* para contar con mayor facilidad de conexión hacia los actuadores, alimentación, drivers y controlador. Por último, se diseñó un protocolo de comunicación y de control para manejar los movimientos que un agente externo le desee enviar a la cabeza animatrónica.

This graduation project has as main object the mechanical, electronic and control design thru software for an animatronic head with eighteen degrees of freedom. To achieve this, servo motors that fit the needs of each application within the device were selected. For example, in the eyes module the actuators had to be lightweight, in the face precise and in the neck to powerful. Likewise, it was sought that the movements that this animatronic head executes were as natural and fluid as possible to give the system greater realism.

To achieve a successful design a detailed research about the anatomy of the human face and neck was required to transform the organic movements of a human being to a simplified electromechanical version. Since there is a large amount of muscle mass in this section of the body it would not be possible to assign each muscle an actuator in the animatronic model. Under the criterion of predominance, the most important muscles were selected, and a mechanism was designed to simulate real movement. Based on this research the animatronic head mechanisms were simulated using *Matlab* to obtain operating ranges.

The mechanisms were modeled using *Autodesk Fusion 360* CAD Software in a modular way to later make an assembly of all the parts of the mouth, eyes, eyelids, eyebrows, lips, and neck. A stress analysis was made to all this parts to ensure their good performance without the risk of breaking in the same way, an iterative design process had to be executed to reveal failures of each model and minimize the problem of instability and vibrations. The resonance frequencies were extracted of the 3D model and taken into consideration in the design of trajectories in the software.

The parts of the mechanisms were designed to be manufactured by 3D printing with fused deposition modeling and digital light processing technologies. The first technic should be used for the simplest parts as they do not need great level of accuracy, while a DLP printer would be responsible for the manufacture of the most organic and complex objects such as the eyes and lower jaw.

The smoothing of the movements and the reduction of vibrations was accomplished by placing reinforcements at strategic points, the use of more robust materials than those used in previous versions of the animatronic head developed in the *Universidad del Valle de Guatemala* and the introduction of a PID controller. Each actuator with the capability to

be controlled using this strategy was individually calibrated so that the gains were matched to the inertia of each mechanism.

Subsequently a PCB board in the Altium Designer program to have greater ease of connection to the actuators, power supply, drivers, and controller. Finally, a communication and control protocol were designed to handle the movements that an external agent wishes to send to the animatronic head.

Con el paso del tiempo, la interacción del ser humano con robots humanoides y animatronics se ha convertido en una situación más común; de forma análoga a la instancia en donde contar con un teléfono móvil con mayor capacidad computacional que un ordenador parecía imposible. Los avances tecnológicos permiten crear personajes más sofisticados, compactos y realistas convirtiéndolos en un elemento más accesible en la sociedad. Actualmente, se puede encontrar una amplia variedad de robots de este tipo en la industria cinematográfica, del entretenimiento, atracciones, asistentes personales e incluso en juguetes.

En el siglo anterior se inició con esta tendencia como la conocemos hoy, pero cada vez se logra obtener sistemas más realistas que repliquen los movimientos humanos más acertadamente. En un inicio se pudo observar personajes muy sencillos como aves electromecánicas en películas, hasta la actualidad con robots con más de cien grados de libertad. Asimismo, las tecnologías introducidas en estos sistemas han variado y mejorado hasta como se presentan en la actualidad. Por ejemplo, algunos robots animatronics de atracciones para niños han pasado de utilizar sistemas neumáticos para el accionamiento de sus actuadores a sistemas servo controlados. Estas mejoras se han llevado a cabo luego de notar las ventajas de los sistemas digitales y el control moderno para los mismos.

La Universidad del Valle de Guatemala ha dedicado múltiples años en el desarrollo de partes de robots animatronics como brazos, cuellos y cabezas; en los cuales cada fase de mejoras busca replicar de forma más fiel los movimientos humanos, crear diseños más sofisticados y eficientes al igual que reducir comportamientos indeseados como las vibraciones y oscilaciones naturales de las piezas mecánicas utilizadas. De esta forma se espera que los modelos generados en esta casa de estudios sean considerablemente superiores cada año.

En forma de avance de dichos proyectos, en este trabajo de graduación se detalla el proceso de diseño y análisis de la cabeza y cuello animatronics. En estos procedimientos principalmente se buscó ampliar el rango de movilidad al igual que reducir las vibraciones mediante la implementación de un control PID. La previa investigación de la anatomía humana de esta región del cuerpo permitió la definición de dieciocho grados de libertad que logren crear varias facciones de forma acertada. Dentro del alcance de este proyecto se

contempló el diseño mecánico, modelado 3D, análisis de esfuerzos, reducción de vibraciones, programación de trayectorias y el diseño de placa *PCB*.

A pesar de que los personajes animatrónicos no fueron creados como tal hasta el siglo XX, la historia de esta técnica empieza en el siglo XVII con los relojeros. Ellos iniciaron creando relojes mecánicamente avanzados permitiendo que personajes miniatura se movieran y salieran de los relojes cada vez que la hora cambiara; esto siendo incluso antes de la Revolución Industrial Francesa a principios del siglo XVIII. Debido a que para esta época aún la electricidad no había sido descubierta por Benjamin Franklin, ni mucho menos popularizada como en el siglo XIX su estrategia para la elaboración de estos sistemas consistía en programar los movimientos mediante engranes que coincidieran en los cambios de hora; posteriormente, sonidos fueron agregados para atraer la atención de los usuarios [1].

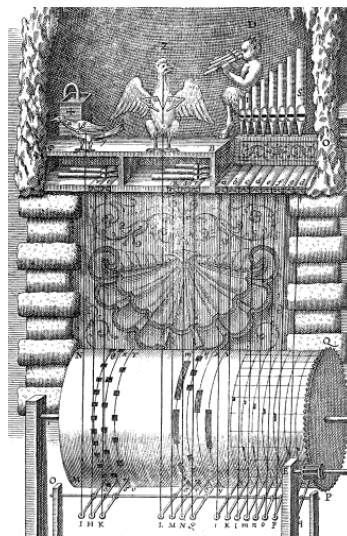


Figura 1: Reloj mecánico tipo Cuckoo de 1650 [2]

La era de los robots animatrónicos modernos inició en 1961 cuando en el mundo del entretenimiento Walt Disney junto a los *imagineers* decidieron crear una figura humana de

nueve pulgadas de alto. Este acercamiento a la creación de personajes se tornó en un nuevo interés para los creadores de material recreativo. De esta forma se fueron introduciendo más tecnologías a dichos sistemas como robótica, programación en computadora o controladores, prototipado e innovadoras técnicas para la selección de materiales para proporcionarle al personaje más realismo. De hecho, se fue experimentando para controlar de forma más acertada los movimientos de los robots para imitar a las facciones reales y engañar de esta forma el ojo humano [3].

A pesar de que paralelamente se estuvo desarrollando la creación de personajes digitales como el *CGI*, bajo muchas circunstancias se prefiere hasta la actualidad la utilización de caracteres animatrónicos. Esto radica en que la interacción entre actores y robots es mucho más fluida que con personajes generados por ordenador [4].

Solamente dos años después de la introducción de esta tecnología, Walt Disney expuso en un musical polinesio aves animatrónicas, las cuales fueron las primeras figuras con esta tecnología en todos los parques temáticos de Disneyland y Disneyworld. En 1963 un robot de Abraham Lincoln se convirtió en el primer humano animatrónico. Justo el año siguiente se empleó esta tecnología para darle vida a una ave en la película *Mary Poppins*. Luego de mucho esfuerzo en la materia en 1982 en *EPCOT* se instaló un robot de Ben Franklin, el cual se convirtió en el primer personaje animatrónico en subir gradas por su cuenta [3].

En el año 1989 se experimentó la implementación del primer robot tipo A-100, es decir, con enorme cantidad de grados de libertad, articulaciones flexibles y velocidades variables; siendo esta la Bruja del Oeste de la película *El Mago de Oz*. Cuatro años más tarde se construyó un dinosaurio *T - Rex* en escala real y alto realismo para la película *Jurassic Park*. Recientemente es incontable la cantidad de robots animatrónicos que se emplean para su utilización en películas como *Jaws*, *E.T.*, *Star Wars*, *Gremlins*, *The Terminator*, *King Kong* entre muchas otras; o bien parques temáticos como *Walt Disney World* o *UniversalStudios* [3].



Figura 2: Animatronic de la Bruja del Oeste en *The Great Movie Ride* en *Walt Disney World* [5]

Por otro lado, en la Universidad del Valle de Guatemala se ha invertido bastante esfuerzo por el desarrollado de sistemas animatrónicos como brazos y cabezas desde hace varios años empleando metodologías de impresión 3D, corte láser entre otras en donde cada año se mejora el modelo previo. El diseño más reciente de la cabeza animatrónica, el cual se puede apreciar en la ilustración número 3, fue presentado por el Ing. Manolo Enrique Benegas Villeda en el 2018 en la cual se logró controlar dicho sistema de forma exitosa; sin embargo, se presentaron algunos aspectos por mejorar en forma de recomendaciones 6.



Figura 3: Cabeza animatrónica del año 2018 como trabajo de graduación del Ing. Benegas 6

En la cabeza y cuello animatrónicos presentados en el año 2018 se lograron avances en el diseño mecánico para el movimiento de ojos, párpados, boca, cejas y cuello; representando un total de diez grados de libertad. La estructura que sostiene dichos mecanismos fue principalmente elaborada de planchas de *MDF* cortadas mediante láser. La minoría de piezas, como la junta universal para el cuello, fue fabricada utilizando técnicas de impresión 3D; ver figura 4 6.

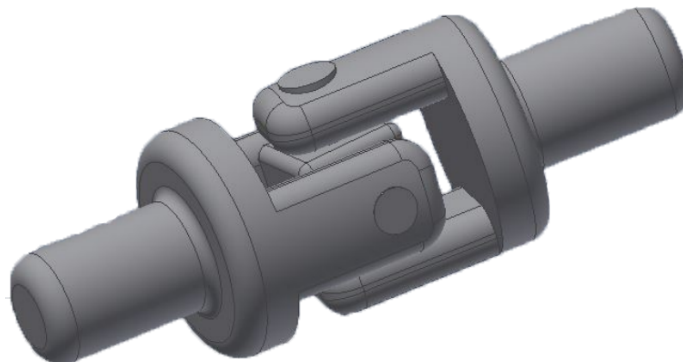


Figura 4: Junta universal diseñada en *Autodesk Inventor* por Manolo Benegas 6

En la actualidad el uso de robots animatrónicos se ha popularizado en la industria cinematográfica, efectos especiales y parques de diversiones para darle vida personajes ficticios utilizando mecanismos y circuitos electrónicos, hidráulicos y neumáticos. De hecho, este tipo de sistemas pueden ser encontrados en Guatemala en lugares recreativos a pequeña escala y con bajo nivel de realismo; sin embargo, ninguno de estos ha sido creado en este país. Dado que en la Universidad del Valle de Guatemala se ha llevado el hilo para la creación de uno de estos robots, en este proyecto de graduación se busca iniciar con este tipo de construcciones y diseños para la implementación de ellos con un considerable nivel de verosimilitud.

Previas versiones de este ámbito de estudio han mostrado resultados positivos aunque presentan gran oportunidad de mejora; por lo que en esta ocasión se busca optar por la introducción de mayor cantidad de grados de libertad, aumento de robustez de construcción y la colocación del importante *underskull* cuyo propósito es ser el elemento unificador del sistema. Paralelamente, se le dará seguimiento a los avances previos para determinar las bondades y fallos de diseños previos.

En esencia, la motivación de este proyecto de graduación es poder proporcionarle a la cabeza animatrónica desarrollada en la Universidad del Valle de Guatemala un mayor nivel de realismo y facilitarle a futuras generaciones de esta casa de estudios las herramientas base para crear robots animatrónicos realistas aplicables a humanos o personajes ficticios.

4.1. Objetivo general

Diseño de una cabeza y cuello humanos animatrónicos con dieciocho grados de libertad y suavidad en sus movimientos

4.2. Objetivos específicos

- Implementar mecanismos para movimientos faciales y de la cabeza de forma simplificada
- Suavizar los movimientos del sistema utilizando control clásico y mecanismos más robustos.
- Modelar una estructura del sistema que minimice vibraciones u oscilaciones indeseadas.
- Diseñar un *underskull* que permita darle forma a la cabeza y brindar la facilidad de acople a un cobertor látex para futuras versiones de este modelo.
- Desarrollar un protocolo de comunicación para manejar las facciones y movimientos de la cabeza.
- Diseñar un mecanismo para el cuello que permita movimientos similares a los naturales del ser humano.
- Realizar análisis de elementos finitos a las piezas críticas del modelo CAD.
- Diseñar PCB para interconectar el controlador, drivers, actuadores y la alimentación en la cabeza y cuello animatrónicos.

La cabeza animatrónica desarrollada en el 2020 propone lograr avances en el diseño CAD, desarrollo mecánico, análisis y programación del sistema a previas versiones implementadas por otros estudiantes de la Universidad del Valle de Guatemala.

El alcance de este trabajo de graduación abarca la investigación de la anatomía del cuello y cabeza humanos para la creación de mecanismos que simulen dichos movimientos orgánicos. En este proceso se involucra la simplificación muscular a una cantidad de 18 grados de libertad en todo el sistema. Estos mecanismos son diseñados y estudiados para lograr trayectorias deseadas y permitir que la variedad de facciones replicables por la cabeza animatrónica sea la mayor posible.

Dentro del diseño *CAD* se propone un modelo tomando en consideración la acumulación de esfuerzos al igual que la experimentación de vibraciones y oscilaciones indeseadas. Para validar este aspecto se introducirá el diseño *3D* al programa *Autodesk Fusion 360* para el análisis de estados finitos así como de frecuencias modales.

En el diseño de *Software* este trabajo de graduación abarca la programación de trayectorias controladas por un *PID* y servo- motores inteligentes que cuentan con parámetros para suavizar dichos movimientos. Por último, se propone un diseño de *Hardware* en una placa PCB, la cual logre unificar y compatibilizar los dispositivos involucrados, es decir, etapas de potencia, controlador, driver de servos y los actuadores.

6.1 Anatomía facial

Los músculos de la cabeza pueden dividirse principalmente en dos grupos, los de la cabeza per se y los faciales. Los primeros son los músculos más grandes y fuertes, por ejemplo los de la masticación. Por otro lado, los músculos de la mímica son de menor tamaño y tienen como principal propósito la expresión facial. Los músculos de la cara, de igual forma, se pueden subdividir en los de la órbita, boca, nariz y las orejas. Su principal característica radica en que sus inserciones son la piel y aponeurosis. La aponeurosis se refiere a la membrana conjuntiva que recubre los músculos y fija estos a otras partes del cuerpo. Esta propiedad permite modificar las expresiones contrayéndose y arrastrando consigo la piel suprayacente. La combinación de movimientos de cientos de músculos en el rostro logran transmitir a una tercera persona un mensaje corporal el cual puede ser interpretado en base a experiencias previas [7].



Figura 5: Musculatura facial humana desde tres ángulos [7]

6.1.1 Anatomía de los ojos

Los ojos cuentan con dos tipos de músculos encargados de la movilidad de los mismos: los rectos y oblicuos. En el siguiente cuadro se presenta la característica de cada uno de estos músculos de forma sintetizada:

Músculos rectos		
Recto inferior	Guía el ojo hacia abajo.	Está ubicado en la parte inferior de la órbita ocular.
Recto superior	Guía el ojo hacia arriba.	Se ubica en la región techo de la órbita ocular.
Recto interno	Guía el ojo la seducción de la nariz.	Se encuentra en la región media de la órbita ocular.
Rector lateral	Guía el ojo en dirección opuesta a la nariz.	Se localiza en la sección externa de la órbita ocular.
Músculos oblicuos		
Oblicuo inferior	Guía el ojo hacia la sien y hacia arriba simultáneamente.	Forma parte de la musculatura intrínseca del ojo.
Oblicuo superior	Guía el ojo hacia la nariz y abajo simultáneamente.	Pertenece a los músculos extraoculares.

Cuadro 1: Características de los músculos oculomotores [8]

De forma gráfica se pueden trasladar las movilidades de cada músculo a vectores dependiendo de su ubicación; esto se puede apreciar en la Figura 6.

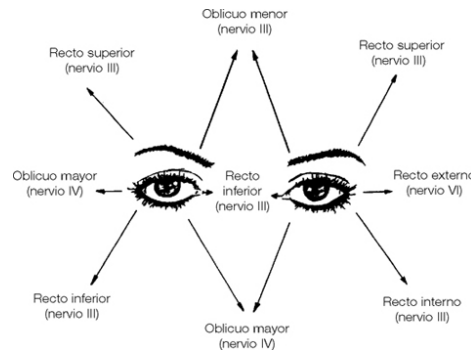


Figura 6: Movilidad de los ojos según cada músculo [8]

6.1.2 Anatomía de las cejas y párpados

Las órbitas oculares se encuentran rodeadas de músculos que permiten la movilidad tanto de las cejas como de los párpados inferiores. Asimismo, existen los músculos intraorbitarios que permiten la elevación de los párpados superiores. El músculo piramidal se encuentra sobre el dorso de la nariz y entre las cejas por lo que cuando este se contrae se arruga el entrecejo además de que estas se dirigen hacia abajo [9].

El músculo orbicular de los párpados está conformado por las fibras en forma de óvalo al rededor de cada órbita ocular; estos cuando se contraen se cierran los párpados. Estos tienen la peculiaridad de que al excitarse mueven las cejas descendentemente. Arriba de este

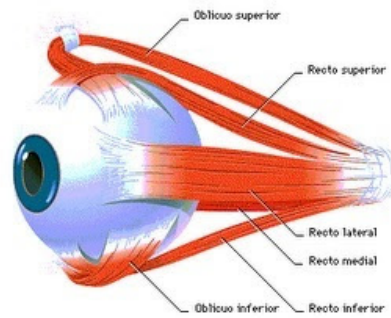


Figura 7: Anatomía muscular de los ojos [8]

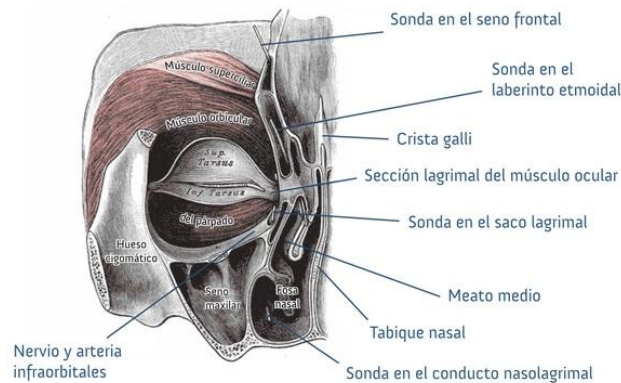


Figura 8: Anatomía muscular de las cejas y párpados [9]

músculo, específicamente en donde se encuentra cada ceja, se ubica el músculo superciliar el cual funciona como el antagonista del piramidal. Su movimiento es netamente horizontal hacia afuera del rostro. Se debe mencionar que, a pesar de que el músculo occipito-frontal (vientre posterior) no pertenece a los músculos de recubrimiento, este es el que se encarga de elevar las cejas y el cuero cabelludo hacia atrás, es decir, frunce el ceño [7].

6.1.3 Anatomía de boca

Los músculos encargados de la masticación son cuatro y se encuentran a cada lado de la mandíbula: músculo mesetero, músculo temporal, pterigoideo externo e interno. El músculo mesetero trata de una masa muscular cuadrilátera y gruesa que comprende el espacio entre la cada lateral hasta el maxilar superior [7].

Por otro lado, los músculos de mímica de los labios y boca son los más numerosos y complejos del rostro además de participar en la fonación, es decir, el proceso mediante el cual el ser humano articula las palabras al expresarse. El músculo elevador del ala de la nariz y el labio superior es largo y delgado permitiendo que al contraerse se alce la comisura de la boca. El músculo del labio superior se ubica detrás del músculo anteriormente mencionado;

cuello se expresan en el Cuadro 2 [11].

Músculo	Acción unilateral	Acción bilateral
<i>Esternocleidomastoideo</i>	Rotación de la cabeza al lado opuesto	Flexión de la cabeza por área de las vértebras cervicales
<i>Semispinalis Capitis</i>	Rotación de la cabeza hacia su mismo lado	Extensión de la cabeza
<i>Splenius Capitis</i>	Rotación de la cabeza hacia su mismo lado	Extensión de la cabeza
<i>Longissimus Capitis</i>	Rotación de la cabeza al lado opuesto	Extensión de la cabeza

Cuadro 2: Movilidad de los músculos unilateral y bilateral [11]

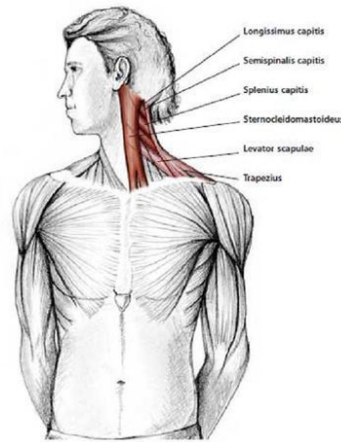


Figura 11: Músculos del cuello para la movilidad de la cabeza [11]

6.2 Mecanismos

Se le denomina mecanismo a todo conjunto de cuerpos que transforman una energía de entrada en un movimiento deseado. Comúnmente se utilizan engranes, poleas, barras y juntas entre sí. Es importante mencionar que en los mecanismos existe un determinado número de grados de libertad el cual coincide con el número de ecuaciones diferenciales de segundo orden que se requieren para describir completamente cada sistema. Los grados de libertad pueden ser calculados mediante la ecuación [1] [12].

$$GL = 3 * (n_s - 1) - 2 * j_1 - j_2 \quad (1)$$

GL, Número de Grados de Libertad
 n_s , Número de elementos (eslabones, barras, etc.)
 j_1 , Número de uniones de 1 grados de libertad
 j_2 , Número de uniones de 2 grados de libertad

6.2.1 Mecanismo de cuatro barras

Se le denomina mecanismo de cuatro barras a aquel que está formado por tres barras móviles y una fija unidas por articulaciones tipo revoluta. Ver Figura 12. Normalmente una de las barras móviles acopladas a la bancada es la entrada y alguno de los otros eslabones o incluso un punto asociado con uno de ellos suele ser la salida. Para determinar si el mecanismo es capaz de que una de sus barras recorra una revolución completa es necesario evaluar la Ley de Grashof en la ecuación número 2. Si esta se cumple se puede afirmar que al menos uno de los eslabones es capaz de ejecutar una rotación completa 12.

$$S + L \leq P + Q \quad (2)$$

- S, Longitud del eslabón más corto
- L, Longitud del eslabón más largo
- P, Primer eslabón restante
- Q, Segundo eslabón restante

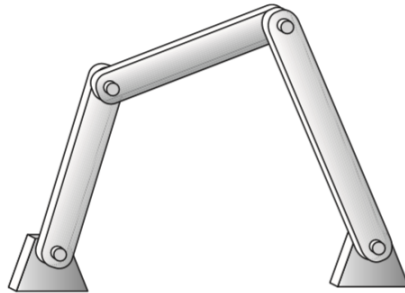


Figura 12: Mecanismo de cuatro barras de cadena cerrada 12

Un caso específico de un mecanismo de cuatro barras al cual se le puede introducir una quinta barra sin modificar su funcionamiento es el quinteto E con $GDL = 1$. Se puede apreciar que los tres eslabones acoplados a la bancada deben ser de exactamente la misma longitud para que dicho mecanismo sea consistente y no sufra de esfuerzos muy grandes en sus juntas. Ver Figura 13.

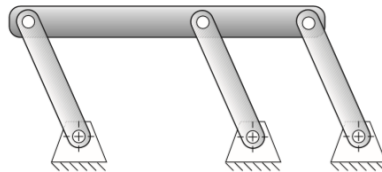


Figura 13: Mecanismo de cinco barras. Modificación de 4 barras. 12

6.2.2 Tipos de juntas

Las juntas son básicamente conexiones entre dos o más eslabones (en sus nodos), lo cual permite movilidad entre dichos componentes conectados. Estos pares cinemáticos pueden ser clasificados de varias formas [12].

1. Por el tipo de contacto entre los elementos (línea, punto o superficie)
2. Por el número de grados de libertad permisibles en cada unión
3. Por el tipo de cierre físico (por forma o fuerza)
4. Por el orden o número de eslabones unidos en la junta

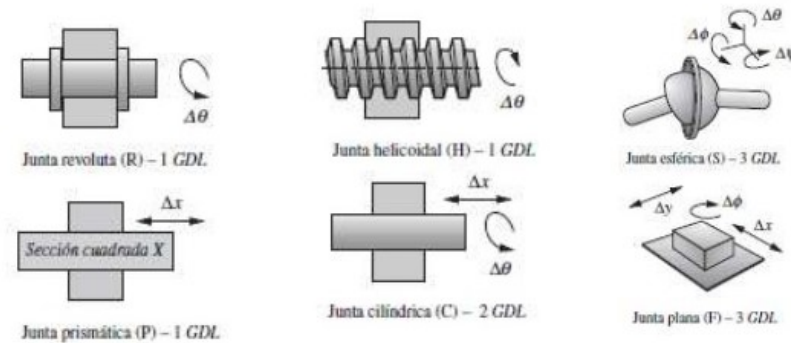


Figura 14: Los seis pares inferiores simbolizados de forma gráfica [12]

Los grados de libertad en las juntas se encuentran asociados al tipo de las mismas lo cual se detalla en el Cuadro 3.

Nombre	GDL	Contiene
Revoluta	1	R
Prismático	1	P
Helicoidal	1	RP
Cilíndrica	2	RP
Esférica	3	RRR
Plana	3	RPP

Cuadro 3: GDL asociados con los seis tipos de pares inferiores (juntas de contacto superficial)

La fórmula de Kutzbach-Grübler permite conocer el grado de movilidad de un mecanismo en donde dicho criterio simplemente consiste en realizar una resta entre los grados de libertad de la uniones de los eslabones del mecanismo y las restricciones impuestas por los pares cinemáticos [12]. En la ecuación [1] se plantea dicha solución para la determinación de los GDL de un mecanismo.

6.2.3 Actuador lineal

Se le denomina actuador lineal al elemento que transforma un movimiento circular de un motor eléctrico en uno en forma de línea recta. Este tipo de actuadores son muy utilizados en máquinas, herramientas, la industria, unidades de disco, válvulas entre muchos otros. Las tres metodologías más utilizadas para realizar esta transformación son mediante un tornillo, torno o caja de engranes. En la Figura 15 se muestra un ejemplo de actuador lineal electromecánico de la marca *Tritex*.

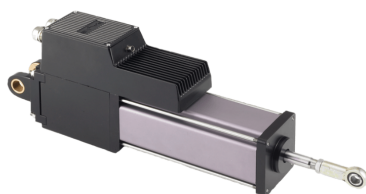


Figura 15: Actuador lineal *Tritex II* con servo-motor [13]

Similarmente a los actuadores lineales anteriormente mencionados existen de tipo hidráulicos y neumáticos, los cuales se basan en el mismo funcionamiento pero con diferentes propiedades. Los actuadores hidráulicos emplean un cilindro hueco con un pistón concéntrico el cual se desplaza cuando las presiones en las dos cavidades se descompensa. Este tipo de actuador tiene la capacidad de ser muy preciso en sus movimientos dado que el aceite que emplean es casi incompresible además de poder movilizar grandes cargas. Por otra parte, los actuadores neumáticos utilizan el mismo concepto para mover el pistón, pero dado que emplean aire en sus cavidades y este es compresible, sus movimientos resultan ser rápidos pero imprecisos. La principal desventaja que presentan los actuadores neumáticos e hidráulicos sobre los eléctricos es el hecho que necesitan de un compresor y tanque o bomba y depósito respectivamente. En el Cuadro 4 se muestran las propiedades y demás factores por considerar al implementar un sistema de actuación mecánica [14].

	Sistemas neumáticos	Sistemas hidráulicos	Sistemas electromecánicos
Potencia	Alta	Muy alta	Alta
Velocidad	Muy alta	Moderada	Moderada
Factores medioambientales	Contaminación auditiva	Pueden sufrir de fugas	Ninguno
Vida útil	Moderada	Muy prolongada	Muy prolongada
Inversión inicial	Moderada	Elevada	Elevada
Costo de mantenimiento	Bajo	Alto	Bajo

Cuadro 4: Tabla comparativa entre sistemas hidráulicos, neumáticos y electromecánicos [14]

6.2.4 Cable Bowden

Un mecanismo *Bowden* se basa en un tipo de cable flexible compuesto de fibras de acero o sintéticas en forma de helicoidal el cual es capaz de transmitir una fuerza mecánica o energía mediante su movimiento dentro de una camisa exterior también flexible. Esta carcasa es comúnmente fabricada de plástico con un coeficiente de fricción interno considerablemente bajo para facilitar el movimiento del cable y minimizar pérdidas energéticas [15].

Este mecanismo se ha utilizado desde el siglo XIX para una gran cantidad de aplicaciones en donde la primera fue el sistema de frenos de bicicletas patentado en 1896 por el irlandés Ernest Monnington Bowden y seguido por su implementación en sistemas automovilísticos y motocicletas en 1902 por George Frederick Larkin. Ver Figura [16]. De hecho, hasta la fecha este es el mecanismo que predomina en mecanismos de bicicletas como en la marca *Shimano* [15].



Figura 16: Mecanismo de frenado en bicicleta con cable *Bowden* [15]

Los cálculos en dicho mecanismo pueden ser simplificados de forma adecuada sin perjudicar en gran magnitud el funcionamiento del mismo. Estas expresiones se muestran a continuación y de forma gráfica en la Figura [17]:

$$F = c_s * l \quad (3)$$

$$T = r * F \quad (4)$$

$$\theta = \frac{l}{r} \quad (5)$$

En donde F es fuerza, c_s la dureza del resorte, l el desplazamiento lineal, r el radio y T el torque requerido para mover el mecanismo.

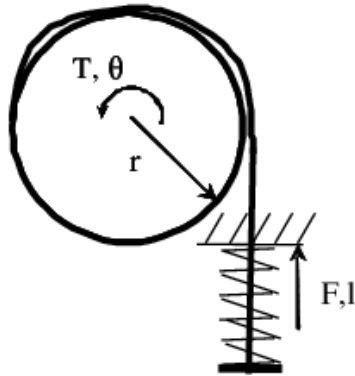


Figura 17: Diagrama de funcionamiento de mecanismo *Bowden* [15]

6.3 Sistemas de control

Los sistemas de control se han convertido en una parte integral de la sociedad moderna, ya que estos se pueden encontrar en numerosas aplicaciones. Un sistema de control consiste en el conjunto de subsistemas y procesos que cumplen con una salida y propósito deseados en función de una entrada. Ver Figura [18]. Por ejemplo, si se considera el escenario de un elevador si un individuo presiona el botón para alcanzar un nivel en específico, el elevador se deberá mover hasta ese punto con la velocidad y aceleración adecuada para no incomodar a los pasajeros. Bajo esta perspectiva se pueden identificar dos medidas de desempeño: la respuesta transiente y el error en estado estacionario lo cual se puede apreciar en la figura [19] [16].

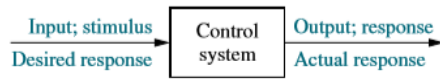


Figura 18: Bloque representativo de un sistema de control [16]

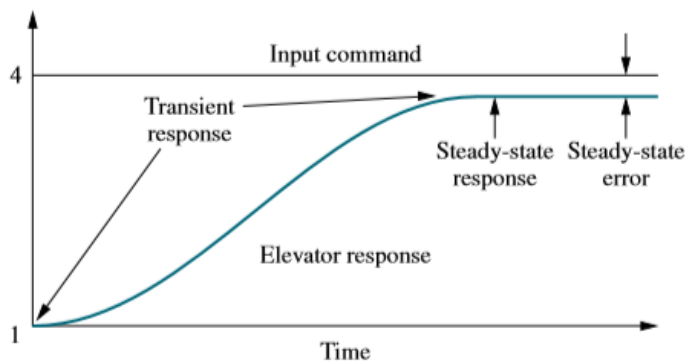


Figura 19: Respuesta transiente y estacionaria de un sistema [16]

6.3.1 Control *PID*

Se le denomina controlador *PID* (proporcional, integral y derivativo) al mecanismo que mediante retroalimentación negativa regula la salida de un sistema. Este controlador puede ser implementado de forma analógica en forma de un circuito o digital en forma de un algoritmo. En ambas versiones se cuenta con tres parámetros que se encuentran asociados con el error pasado, actual y futuro. Este tipo de control tiene la versatilidad de poder ser implementado en aplicaciones en donde se desconoce el modelo de la planta y ser ajustado empíricamente. Sin embargo, los controladores *PID* no garantizan un control óptimo o la estabilidad del mismo. En la Figura 20 se puede apreciar de forma gráfica la implementación de este tipo de controlador [17].

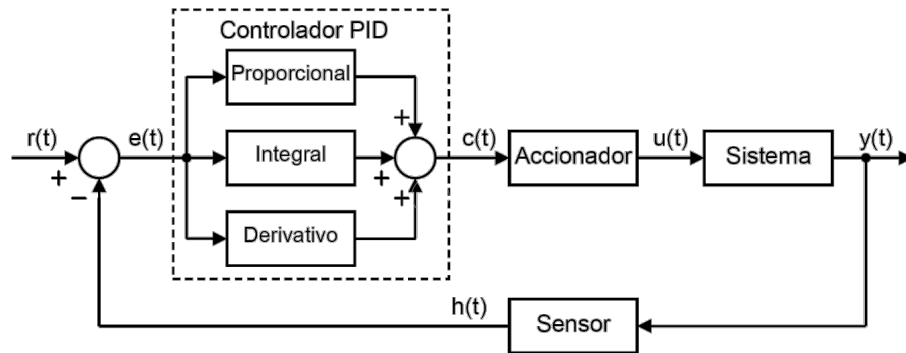


Figura 20: Representación por bloques de un sistema controlado por un controlador *PID* [17]

La ecuación que describe el comportamiento de un controlador *PID* es la siguiente:

$$C(t) = k_p * e(t) + k_i * \int_0^t e(\tau) * d\tau + k_d * \frac{de}{dt} \quad (6)$$

6.4 Servo-motores

Los servo-motores consisten en un dispositivo electromecánico que internamente cuenta con un motor de corriente directa, una caja reductora de engranes y una tarjeta de control. Su funcionamiento se basa en posicionar su eje de salida en una posición deseada mediante una señal de entrada. Habitualmente estos emplean una señal de control modulada por el ancho de pulso (*PWM*) aunque existen variaciones que emplean otro tipo de comunicación como *SPI* o *I2C*. El rango de movilidad máxima de estos dispositivos se encuentra entre 180° y 360° dependiendo del modelo y marca. Para propósitos de este proyecto se utilizarán los servos *Dynamixel XL – 320*, *TowerProSG90* y *Hitec HS – 322HD* [18].

6.4.1 Dynamixel XL-320

El servo-motor *Dynamixel XL – 320* es un actuador con características inteligentes para aplicaciones en robótica dado que, además de los componentes clásicos que involucran

estos dispositivos, cuenta con un controlador *PID*, un driver y módulo de comunicación incorporados. Este servo-motor de alta gama tiene la ventaja de ser de alta precisión y de ser conectado de forma serial mediante un conector *TTL* entre ellos para minimizar el cableado dentro del robot. Además de tener excelente precisión de 0.29° es posible modificar los parámetros k_p , k_i y k_d del controlador *PID* para poder obtener movimientos más suaves, rápidos o demás características que se puedan requerir en cualquier aplicación. Además, este actuador emplea un protocolo de comunicación serial asíncrona half-duplex de un byte de tamaño más un bit de parada y sin paridad [19].

Todos los parámetros de configuración y medidas de sensores son accesibles mediante a las direcciones de las memorias EEPROM y RAM. Algunos de estos son velocidad, posición, carga, voltaje, torque, temperatura entre muchos otros más descritos en la Figura 21.

Este servo-motor cuenta con dos modalidades de operación en donde la llamada *joint* es capaz de desplazar al dispositivo a posiciones específicas mientras que la opción *wheel* permite que el eje gire libremente a lo largo de todo su rango de operación, es decir, de 0° a 300° [19].

Area	Address (Hexadecimal)	Size(byet)	Name	Description	Access	Initial Value	Min	Max
EEPROM	0	2	Model Number	Model number	R	350	-	-
	2	1	Version of Firmware	Information on the version of firmware	R	-	-	-
	3	1	ID	ID of Dynamixel	RW	1	0	252
	4	1	Baud Rate	Baud Rate of Dynamixel	RW	3	0	3
	5	1	Return Delay Time	Return Delay Time	RW	250	0	254
	6	2	CW Angle Limit	clockwise Angle Limit	RW	0	0	1023
	8	2	CCW Angle Limit	counterclockwise Angle Limit	RW	1023	0	1023
	11	1	Control Mode	Control Mode	RW	2	1	2
	12	1	Limit Temperature	Internal Limit Temperature	RW	65	0	150
	13	1	lower Limit Voltage	Lowest Limit Voltage	RW	60	50	250
	14	1	Upper Limit Voltage	Upper Limit Voltage	RW	90	50	250
	15	2	Max Torque	Lowest byte of Max. Torque	RW	1023	0	1023
	17	1	Return Level	Return Level	RW	2	0	2
	18	1	Alarm Shutdown	Shutdown for Alarm	RW	3	0	7
R7AM	24	1	Torque Enable	Torque On/Off	RW	0	0	1
	25	1	LED	LED On/Off	RW	0	0	7
	27	1	D Gain	D Gain	RW	0	0	254
	28	1	I Gain	I Gain	RW	0	0	254
	29	1	P Gain	P Gain	RW	32	0	254
	30	2	Goal Position	Goal Position	RW	-	0	1023
	32	2	Moving Speed	Goal Speed	RW	-	0	2047
	35	2	Torque Limit	Goal Torque	RW	-	0	1023
	37	2	Present Position	Current Position	R	-	-	-
	39	2	Present Speed	Current Speed	R	-	-	-
	41	2	Present Load	Current Load	R	-	-	-
	45	1	Present Voltage	Current Voltage	R	-	-	-
	46	1	Present Temperature	Present temperature	R	-	-	-
	47	1	Registered Instruction	Registered Instruction	R	0	-	-
49	1	Moving	Moving	R	0	-	-	
50	1	Hardware Error Status	Hardware error status	R	0	-	-	
51	2	Punch	Punch	RW	32	0	1023	

Figura 21: Tabla de control de memorias EEPROM y RAM [19]

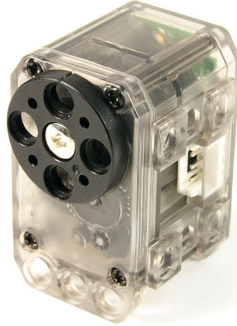


Figura 22: Servo-motor *Dynamixel XL – 320* [19]

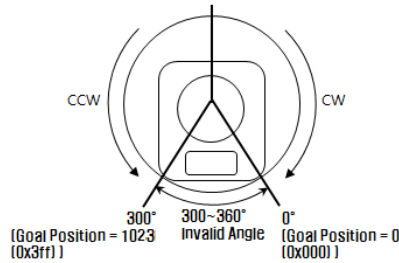


Figura 23: Rango de operación de *Dynamixel XL – 320* [19]

6.4.2 TowerPro SG90

El micro-servo *TowerPro SG90* tiene como principal propiedad su alta potencia de salida a pesar de su diminuto tamaño y peso. Este actuador puede rotar 180° y cuenta con los componentes clásicos de un servo-motor de menor tamaño. Para controlar este dispositivo se le debe enviar un pulso de 20ms con un ciclo de trabajo correspondiente al ángulo deseado; esto se puede apreciar en la Figura 25.

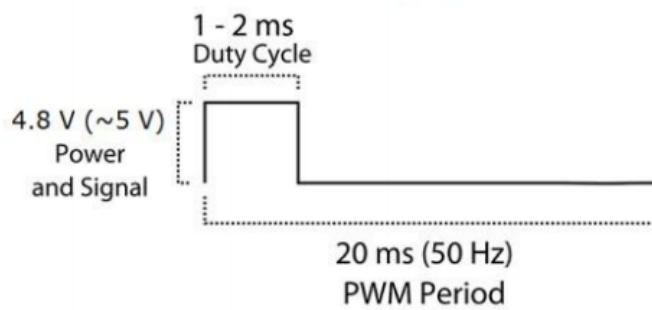


Figura 24: Señal *PWM* de control para servo *TowerPro SG90*

Este servo puede no ser el más preciso y potente, pero su gran ventaja es su compacto tamaño y versatilidad para colocar muchos grados de libertad en poco espacio volumétrico. Sin embargo, su torque a voltaje nominal es de 2.5kgcm lo cual resulta ser suficiente para accionamiento de piezas livianas como el caso de los ojos y párpados en este proyecto.

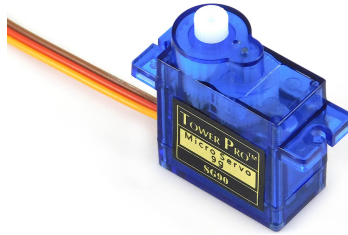


Figura 25: Micro-servo *TowerPro SG90*

6.4.3 Dynamixel AX-12A

El servo-motor *Dynamixel AX – 12A* se emplea en aplicaciones en donde se requiera bastante torque. Esto radica en que su caja reductora interna está fabricada de plástico de ingeniería, es decir, un polímero muy resistente utilizado en motores marca *Dynamixel*. Este material puede ser hasta cuatro veces más resistente y durable que los engranes convencionales de nylon [20].

De forma similar a los servo-motores anteriormente mencionados este actuador cuenta con su respectivo motor de corriente directa, caja de engranes, un potenciómetro como sensor y una tarjeta de control. Para controlar este dispositivo se debe mandar un comando bajo el protocolo *Half Duplex*, comunicación serial asíncrona, en el cual se puede acceder en forma de lectura y escritura a sus registros EEPROM y RAM. Es posible obtener información de voltaje de entrada, carga, posición o bien asignar valores de posición, velocidad o torque. [20].

Para el propósito de este proyecto se introdujo este motor en los movimientos en donde se requiera bastante torque y motores convencionales o de robótica pequeños no funcionarían. Se debe hacer énfasis en que este actuador no cuenta con ningún tipo de control por lo que se deberá suavizar el movimiento de forma mecánica o mediante Software.



Figura 26: Fotografía del servo-motor *Dynamixel AX – 12A* [20]

6.5 Fabricación 3D

6.5.1 FDM

La tecnología FDM (*Fused Deposition Modeling*) consiste en un método de fabricación de prototipos o bien producción a pequeña escala. Su funcionamiento se basa en la deposición de un material fundido en forma de capas para formar un objeto en 3 dimensiones. Un controlador desplaza en los tres ejes una boquilla con filamento a temperatura superior a la de fusión de este material solidificándose luego de ser colocado en su posición deseada. En la mayoría de situaciones la boquilla es movilizada mediante motores tipo *stepper* o bien servo-motores. Este funcionamiento puede ser observado en la Figura 27 [21].

Esta tecnología de fabricación de prototipos fue inventada por S. Scott Crump en la década de 1980 y lanzada al mercado en 1990. Por otro lado, los materiales más comunes para realizar esta deposición son Acrilonitrilo butadieno estireno (ABS), Poliacido láctico (PLA), policarbonato, Policaprolactona (PCL), Polifenilsulfona (PPSU), Polieterimida (PEI), ceras y Acetato de polivinilo (PVA) [21].

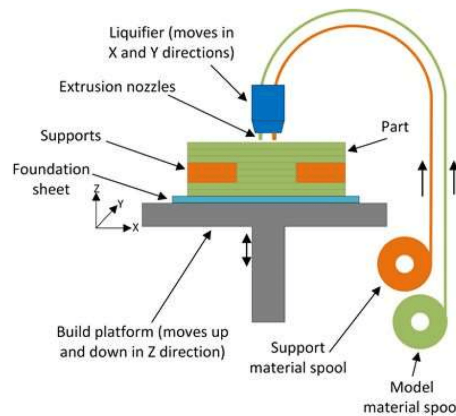


Figura 27: Diagrama de funcionamiento de fabricación FDM [21]

6.5.2 DLP

La tecnología DLP (*Digital Light Processing*) consiste en un proceso similar al de la estereolitografía para la impresión en tres dimensiones. La principal diferencia radica en el hecho que la fuente de luz que emplea esta tecnología es mucho más convencional como una lámpara de arco con una pantalla de cristal líquido. Al iluminar la superficie mediante este proyector de luz digital el polímero foto-reactivo cura capa por capa hasta crear un objeto tridimensional [22].

Los tres elementos básicos para este tipo de impresora son: el proyector de luz digital, el cual está compuesto por miles de microespejos (DMD) para dirigir la luz a la posición deseada; el tanque de resina, el cual es transparente de su parte inferior para permitir el paso de la luz; y la plataforma elevadora, en donde el objeto impreso es elevado y le da solidez a su base. Este concepto de funcionamiento se diagrama en la Figura 28 [22].

Este tipo de impresora es bastante más lenta que una impresora *FDM*, pero resulta ser más rápida que la *stereolitografía*. La gran ventaja de este dispositivo es su precisión en donde se puede alcanzar hasta una resolución de $50\mu m$ [22].

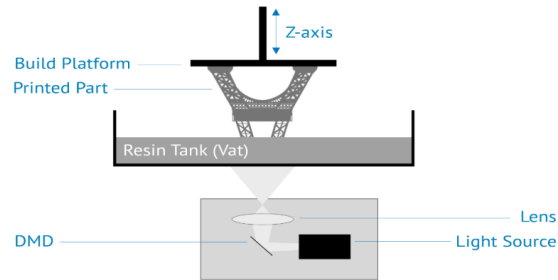


Figura 28: Diagrama de funcionamiento de fabricación DLP [22]

6.6 Modelado CAD - Fusion 360

El programa de *Autodesk Fusion 360* es una herramienta CAD fácil de utilizar con comandos de modelado directo y manejo de versiones en la nube para llegar la geometría deseada de forma segura y precisa. Este software permite solucionar retos ingenieriles consolidando partes, reduciendo peso y mejorando el desempeño de las piezas en general a través de una plataforma sencilla de utilizar [23].

Dentro de sus principales modalidades están los modelados de forma libre, paramétrica, directa, de superficie, láminas metálicas y *mesh*. El manejo de versiones en la nube permite un proceso de diseño iterativo simple y útil para implementar más mejoras en cada versión del prototipo [23].

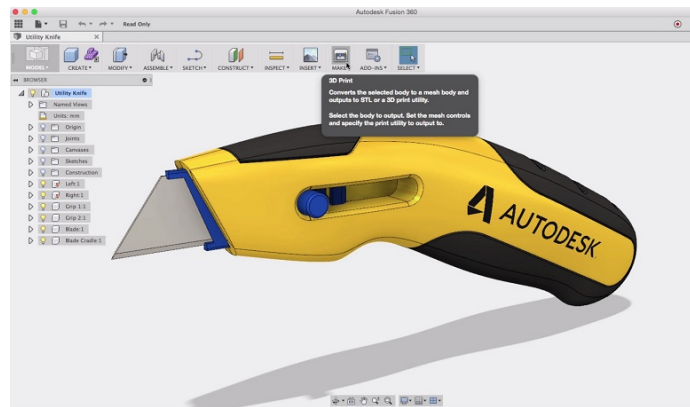


Figura 29: Interfaz gráfica de *Fusion 360* [23]

Parte fundamental para la creación de la cabeza y cuello animatrónicos consistió en el diseño de las piezas y mecanismos que logren replicar los movimientos humanos. Como punto de partida se investigó la anatomía específicamente de la musculatura de estos sectores del cuerpo humano para simplificar sus movimientos a una cantidad manejable de actuadores. La imitación de movimientos se ha separado en cuatro módulos, es decir, ojos, boca, cuello, y cejas y párpados.

Luego de la simulación y diseño de cada mecanismo se ha llevado a cabo un análisis de esfuerzos utilizando el Software *Autodesk Fusion 360* en donde se controlaron y corrigieron los puntos de acumulación de esfuerzos. De forma similar, se ha propuesto una estrategia de reducción de vibraciones con información extraída de esta herramienta CAD.

Los resultados de dichos procesos y análisis se muestra a continuación:

7.1. Imitación de movimientos

La composición muscular facial de una persona resulta ser muy compleja, con redundancia de músculos y complicada de trasladar a un sistema electro-mecánico que permita replicar sus movimientos con fidelidad sin tener que recurrir a una enorme cantidad de actuadores. Por esta razón se seleccionaron los músculos con mayor predominancia en las facciones para la elaboración de mecanismos que busquen imitar dicho comportamiento. A continuación se muestra esta selección muscular y los actuadores asociados a cada movimiento.

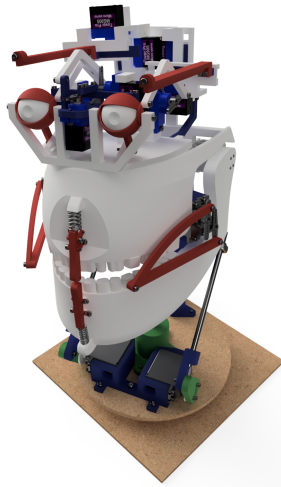


Figura 30: Render del sistema robótico completo

	Nombre	Función	Ubicación	GDL
1	Mandíbula inferior	Apertura de mandíbula	Boca	1
2	Extremos de labios	Trasladar los extremos de los labios	Boca	4
3	Labio superior	Abrir y cerrar punto superior centrado de labios	Boca	1
4	Labio inferior	Abrir y cerrar punto inferior centrado de labios	Boca	1
5	Cejas	Movimiento en dos dimensiones de cejas	Ceja 1 y 2	4
6	Párpados	Apertura de párpados independiente	Ojos	2
7	Elevación de ojos	Rotación vertical del globo ocular	Ojos	1
8	Giro de ojos	Rotación horizontal del globo ocular	Ojos	1
9	Giro de cuello	Giro horizontal del cuello	Cuello	1
10	Rotaciones cuello	Rotaciones orgánicas del cuello	Cuello	2
Total				18

Cuadro 5: Síntesis de mecanismos utilizados en la cabeza animatrónica

7.1.1. Ojos

En el área ocular los seres humanos cuentan con una gran cantidad de músculos que permiten que se mueva cada globo ocular y párpado en prácticamente cualquier dirección; esto se puede apreciar en la Figura 6. Dada la complejidad de este sistema muscular se simplificó la movilidad a dos rotaciones en cada ojo. Esto permite que el robot pueda dirigir la mirada arriba, abajo, derecha, izquierda o combinaciones entre las anteriores.

Un motor servo ubicado en el centro del módulo ocular del robot es el encargado de replicar la tarea de los músculos recto inferior y recto superior, es decir, el movimiento vertical de cada ojo. De forma similar otro motor *TowerPro* lleva la tarea de mover los globos oculares horizontalmente; en la anatomía del ser humano los músculos dedicados a esta función es el recto interno y recto lateral como se explica en el Cuadro 1. De esta

forma los ojos pueden dirigirse en cualquier ángulo gracias a estos dos grados de libertad. La selección de este actuador para estas tareas se basó en su alta rapidez, bajo tamaño, peso y costo.

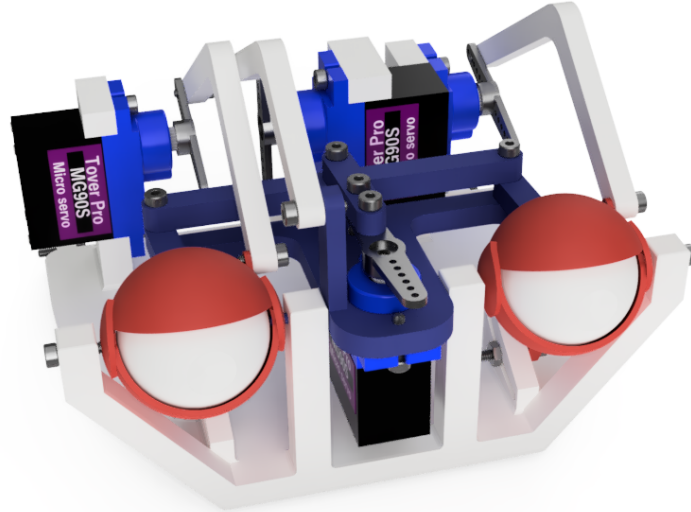


Figura 31: Render del sistema robótico para los ojos

Los músculos oblicuo inferior y oblicuo superior se dedican a mover los ojos en dos direcciones simultáneamente por lo que los dos actuadores implementados también toman en consideración esta movilidad natural.

El sistema empleado para elevar los ojos oculares simultáneamente es un mecanismo de cuatro barras, el cual cumple con la condición de *Grashof*: la manivela de entrada es capaz de dar una revolución completa. Las dimensiones de las barras empleadas se detallan en el Cuadro 6.

Barra	Dimensión
Entrada	12.43mm
Salida	19mm
Biela	50mm
Bancada	50.53mm

Cuadro 6: Dimensiones del mecanismo de cuatro barras para la elevación de los ojos

Se elaboró una simulación en *Matlab* para analizar este mecanismo en donde se obtuvieron gráficas para el recorrido de las barras, los ángulos θ_3 y θ_4 en función de θ_2 y las coordenadas de los puntos *A* y *B*. Los resultados se pueden observar en las figuras 32, 33 y 34 respectivamente.

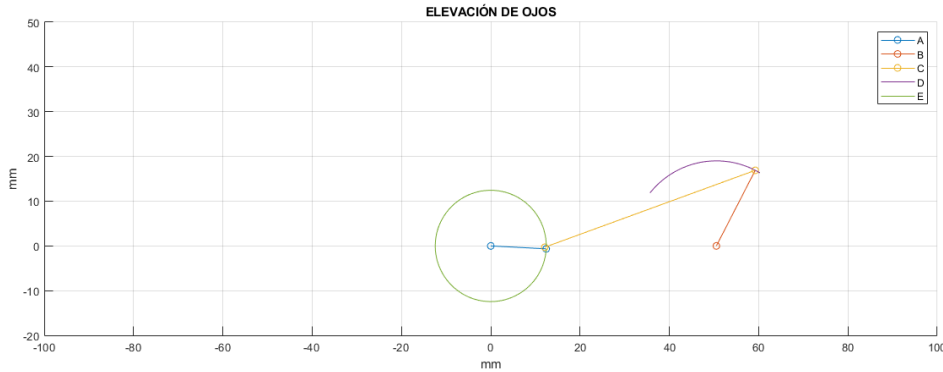


Figura 32: Recorrido de barras del mecanismo de elevación de los globos oculares (dimensiones en milímetros)

La Figura 32 representa la manivela de entrada A con su trayectoria angular E , el acoplador C y el balancín de salida B con su trayectoria angular D . Dado que los actuadores *TowerPro* cuentan con un rango de 180° la salida se traduce a un ángulo de 43° , lo cual resulta suficiente para ejecutar exitosamente la elevación de los ojos.

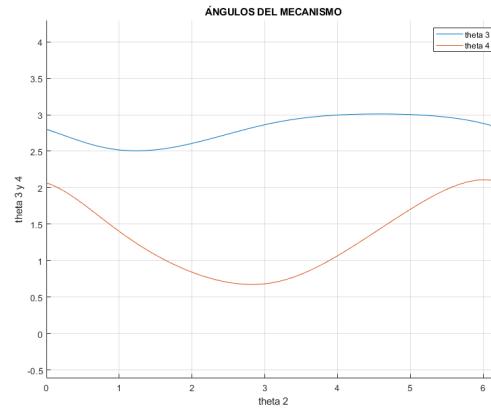


Figura 33: Ángulos θ_3 y θ_4 en función de θ_2 en el mecanismo de elevación de los globos oculares (dimensiones en radianes)

La Figura 33 muestra la trayectoria de los ángulos θ_3 y θ_4 en función de θ_2 , es decir, permite predecir las posiciones angulares del acoplador y el balancín de salida si se conoce la ubicación angular del actuador. De forma similar, la Figura 34 despliega los valores de las coordenadas en dos dimensiones de dichos eslabones conociendo el ángulo de entrada θ_3 .

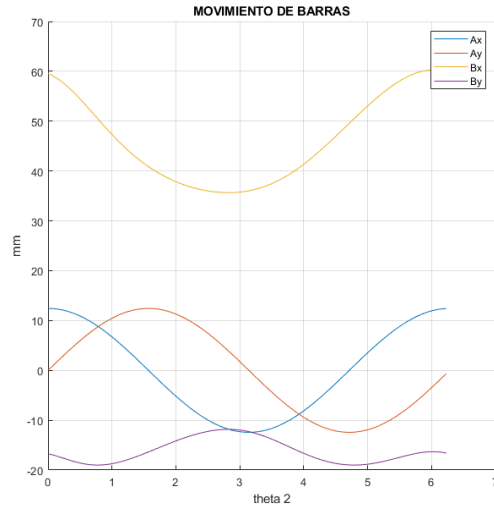


Figura 34: Coordenadas de los puntos A y B del mecanismo de elevación de los globos oculares en función de θ_2 (dimensiones en milímetros)

Por otro lado, el sistema encargado de girar los ojos horizontalmente es un mecanismo de cinco barras que puede ser analizado como si fuera de cuatro barras gracias a que tres de sus barras tienen exactamente la misma longitud tal y como se puede apreciar en la Figura 13. Se elaboró una simulación en *Matlab* en donde la manivela de entrada es la que se omite al tratarse de la quinta barra. Las gráficas generadas son las mismas que se obtuvieron en el caso de la elevación de los globos oculares.

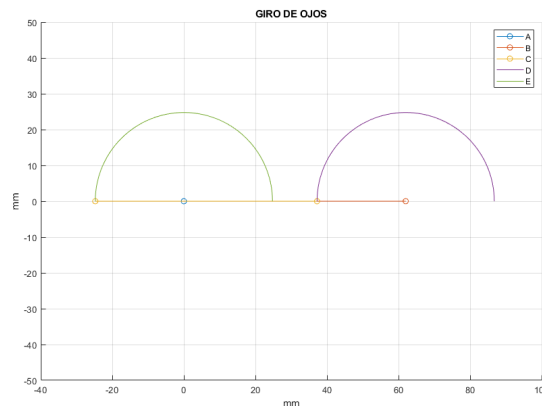


Figura 35: Recorrido de barras del mecanismo del giro de los globos oculares (dimensiones en milímetros)

La Figura 35 representa la manivela de entrada A con su trayectoria angular E , el acoplador C y el balancín de salida B con su trayectoria angular D . Se puede notar que la trayectoria angular de los eslabones de salida y entrada son idénticos, lo cual indica que el movimiento de giro de los dos ojos será sincronizado. El rango de funcionamiento supera el requerido en esta aplicación, siendo estos 180° y 45° respectivamente.

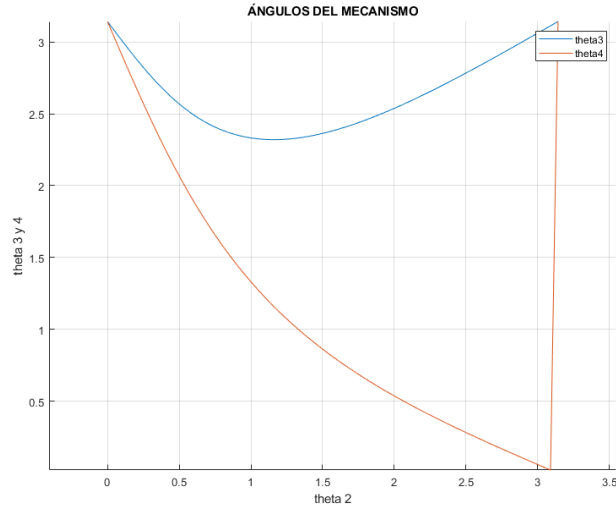


Figura 36: Ángulos θ_3 y θ_4 en función de θ_2 en el mecanismo de giro de los globos oculares (dimensiones en radianes)

Similarmente al mecanismo de la elevación de los ojos, en la Figura 36 muestra la trayectoria de los ángulos θ_3 y θ_4 en función de θ_2 , es decir, permite predecir las posiciones angulares del acoplador y el balancín de salida si se conoce la ubicación angular del actuador. Igualmente la Figura 37 despliega los valores de las coordenadas en dos dimensiones de dichos eslabones conociendo el ángulo de entrada θ_3 .

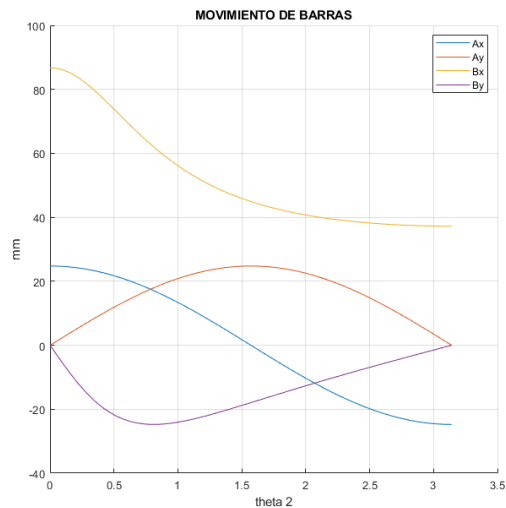


Figura 37: Coordenadas de los puntos A y B del mecanismo de giro de los globos oculares en función de θ_2 (dimensiones en milímetros)

Al unificar estos dos mecanismos es posible orientar los globos oculares a cualquier dirección sin que exista interferencia entre estos. Gracias a que los servo-motores utilizados en este sistema son muy compactos y ligeros, los movimientos generados son fluidos y rápidos.

Asimismo, otra gran ventaja es que el movimiento de ambos globos oculares se encuentra acoplado mecánicamente, lo que garantiza el sincronismo entre ambos ojos.

7.1.2. Boca

La boca cuenta con la cantidad de músculos más numerosa de todo el rostro dado que es la encargada de la masticación, fonación y expresión. Esta estructura muscular se muestra gráficamente en la Figura 9. La masticación, por su parte, involucra cuatro músculos en donde principalmente se despreció la acción del músculo temporal debido a que este se encarga del movimiento hacia adelante y atrás de la mandíbula inferior siendo un movimiento utilizado prácticamente sólo al masticar. Los músculos mesetero, pterigoideo externo e interno son representados por dos motores robóticos *XL320* colocados en la intersección de la mandíbula superior e inferior sobre un mismo eje para duplicar el torque que mueve este elemento. Este actuador se eligió para esta aplicación al cumplir una tarea muy susceptible a movimientos poco naturales, por lo que su controlador PID facilitaría la suavización de sus trayectorias.

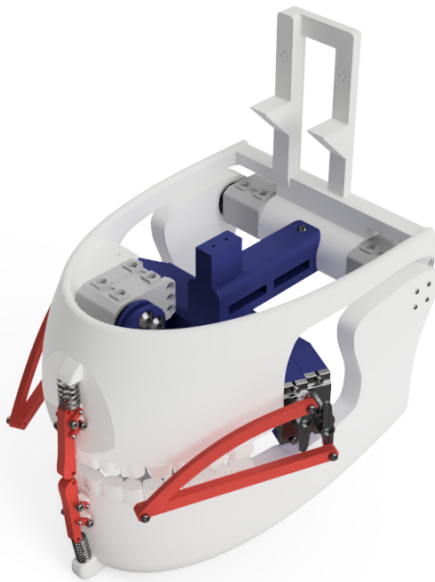


Figura 38: Render del sistema robótico para la boca

Por otro lado, en los labios de este robot se involucraron cuatro puntos para trasladar un movimiento orgánico a uno robótico. En cada extremo lateral de la boca se ubicaron dos actuadores que rotan permitiendo un punto de dos grados de libertad para los extremos labiales. Esta estrategia permite que los extremos de los labios puedan alejarse, acercarse, subir o bajar logrando múltiples expresiones faciales. Los músculos que se representan mediante estos cuatro actuadores son risorio, buccinador, cigomáticos mayor y menor, para los movimientos horizontales y verticales respectivamente. La ubicación de los músculos involucrados se pueden apreciar en la Figura 10. Los otros dos puntos de los labios que se eligieron, dada su importancia al hablar, son los que se ubican en el centro de la boca por debajo de la nariz y encima de la barbilla. Los músculos que tienen a su cargo elevar y bajar estos puntos

de los labios son el orbicular al igual que depresor inferior. En la cabeza animatrónica estos movimientos verticales se obtuvieron mediante un sistema de cableado *Bowden* en donde un actuador tira de un cable de fibras de acero para comprimir un resorte y lograr mover de la forma deseada la punta de los labios. En total la boca de la cabeza robótica cuenta con 8 motores, pero solamente 7 grados de libertad dado que existe redundancia de servos en el accionamiento de la mandíbula inferior para duplicar el torque efectivo.

El elemento principal en la boca es la apertura de la mandíbula inferior. Este mecanismo fue analizado desde la perspectiva de un péndulo con un centro de gravedad desfasado. El toque necesario en este punto fue calculado de la siguiente forma:

$$\tau = m * g * l = 0.2792kg * 9.81 \frac{m}{s^2} * 0.06725m = 0.1842Nm \quad (7)$$

En donde m es la masa equivalente de todos los elementos acoplados la mandíbula inferior, g la aceleración gravitatoria y l el brazo entre el pivote y el centro de gravedad del sistema cuando este se encuentra más alejado. Dado que se colocaron dos actuadores en el eje de este mecanismo, el torque real requerido por motor es de $0.09Nm$, lo cual brinda un factor de seguridad de 4.33 si se compara con su torque nominal de $0.39Nm$ expresado en el Cuadro de valores preestablecidos número [21](#).

Por otro lado, los mecanismos que mueven ambos labios en su punto central se basan en el funcionamiento del cable *Bowden* en donde un actuador hala un cable de fibras de acero comprimiendo un resorte y moviendo un mecanismo de cuatro barras. Tanto para el labio superior como el inferior se utilizó un carrete acoplado a un servo-motor con un radio de $9.35mm$ entorno al cual el cable se enrolla. El torque requerido por el actuador para desplazar el labio inferior se calculó de la siguiente forma:

$$F_{inf} = c_s * l_{inf} = 12.07 \frac{N}{m} * 0.0148m = 0.179N \quad (8)$$

En donde F es la fuerza requerida para comprimir el resorte con constante del resorte c_s una distancia l . De esta forma se procedió a calcular el torque experimentado por el servo-motor inferior.

$$\tau_{inf} = r * F_{inf} = 0.00935m * 0.179N = 0.00167Nm \quad (9)$$

Este procedimiento se repitió con el mecanismo del labio superior en donde la única dimensión que varía es la distancia de compresión $l = 13mm$ resultando en $0.00146Nm$. Posteriormente se calculó el ángulo que representa este desplazamiento lineal.

$$\theta_{inf} = \frac{l_{inf}}{r} = \frac{0.0148}{0.00935} = 1.58rad \quad (10)$$

$$\theta_{sup} = \frac{l_{sup}}{r} = \frac{0.013}{0.00935} = 1.39rad \quad (11)$$

Se puede notar que en ambos casos es necesaria aproximadamente media revolución del carrete para ejecutar el movimiento completo, lo cual excede la rango de operación de 310° de los motores *XL320*. Los factores de seguridad para el servo del labio superior e inferior son 267 y 233 respectivamente debido a que los torques requeridos son muy bajos.

Por último, el espacio de trabajo del efector final del mecanismo de los actuadores de los extremos de los labios consiste en una superficie orgánica la cual se muestra en la Figura 39. Este mecanismo fue analizado utilizando *Matlab* como uno de cuatro barras en donde se fue variando la posición de la quinta barra entre iteraciones. Gracias a que este mecanismo cuenta con dos grados de libertad es posible obtener gran cantidad de posiciones del extremo del labio, lo cual es crítico dada su importancia en la creación de facciones. Gracias a la simetría del rostro, existe perfecta simetría entre los mecanismos para los dos extremos de los labios.

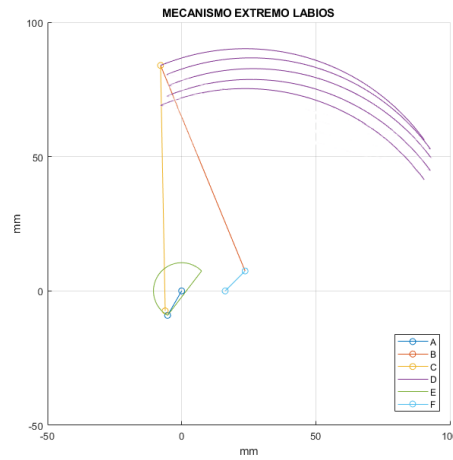


Figura 39: Trayectoria del efector final en el mecanismo de cinco barras en los extremos de los labios

La distancia entre el extremo del labio hacia el centro de la boca resulta ser suficiente para poder apertura y cerrar la boca de forma realista al tener una carrera superior a los 2.5cm; verticalmente, la distancia entre máximo y mínimo es de aproximadamente 10cm, lo cual es bastante superior a lo necesario. Las barras, coordenadas del efector final y ángulos internos del mecanismo se pueden apreciar en las figuras 39, 40 y 41 respectivamente.

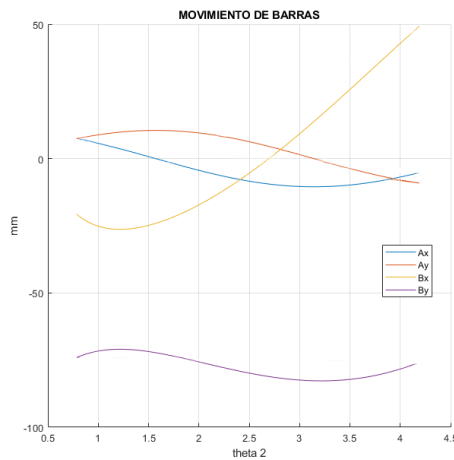


Figura 40: Coordenadas del efector final en el mecanismo de cinco barras en los extremos de los labios

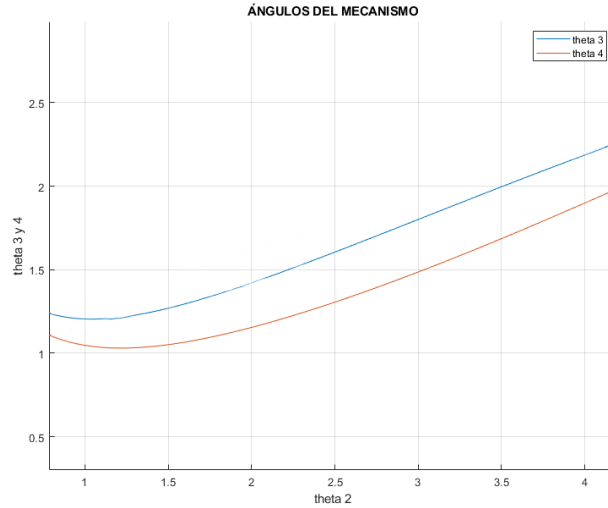


Figura 41: Ángulos θ_3 y θ_4 en el mecanismo de cinco barras en los extremos de los labios

7.1.3. Cuello

El cuello logra mover la cabeza contrayendo múltiples músculos de forma simultánea. En el caso de este sistema robótico se despreció la extensión y desplazamiento hacia adelante y atrás de la cabeza, es decir, no se tomaron en consideración los músculos *Splenius Capitis* y *Longissimus Capitis* en su accionamiento bilateral. El Cuadro 2 muestra claramente la forma en la que funcionan los músculos involucrados en el robot.

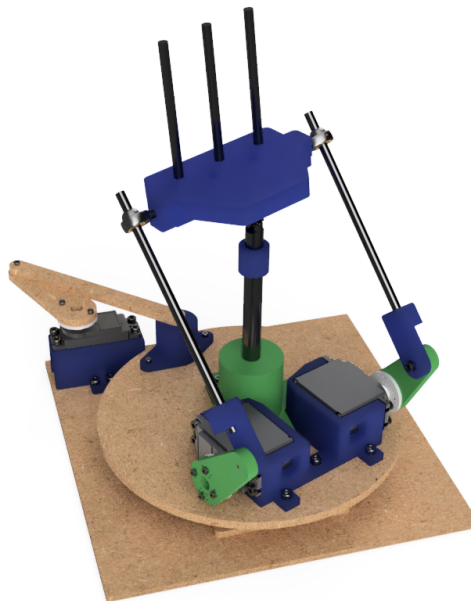


Figura 42: Render del sistema robótico para el cuello

Para la rotación del cuello se utilizó un servo-motor de alto torque fijado en una base haciendo girar otra base sobre un cojinete axial. Para las dos rotaciones restantes de la

cabeza animatrónica se emplearon otros dos actuadores de alto torque logrando de esta forma que el cuello cuente con tres grados de libertad y logre replicar movimientos bastante verosímiles.

La rotación del cuello puede ser analizada como un mecanismo de cuatro barras. Este sistema fue simulado en *Matlab* por lo que se obtuvieron gráficas del rango de movilidad del mecanismo, los ángulos θ_3 y θ_4 en función de θ_2 al igual que las coordenadas de los puntos *A* y *B*. Este mecanismo cumple con el criterio de *Grashof* por lo que la manivela de entrada es capaz de dar una revolución completa. En este caso se despreció la configuración cruzada del mecanismo ya que este modo de operación nunca será posible físicamente.

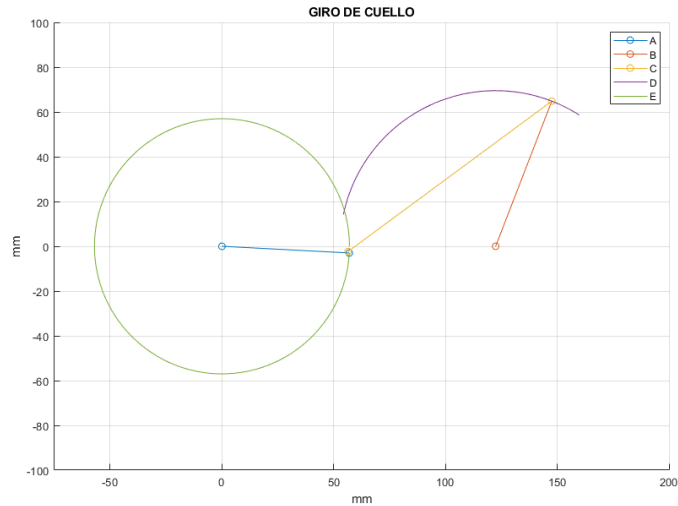


Figura 43: Recorrido de barras del mecanismo del giro del cuello (dimensiones en milímetros)

En la Figura 43 se muestra una representación del mecanismo de cuatro barras para el giro del cuello, en donde la línea azul *A* representa la manivela de entrada, la amarilla *C* el acoplador entre la base estática y la rotativa del cuello, y la roja *B* la salida del mecanismo, es decir, la posición angular de la cabeza. Gracias a que el actuador *AX – 12A* encargado de esta tarea cuenta con un rango de operación de 310° la salida supera los 90° requeridos.

Los ángulos θ_3 y θ_4 en la Figura 44 se refieren a la posición angular del acoplador y balancín de salida del mecanismo del giro del cuello respectivamente dependiendo del ángulo de entrada del actuador θ_2 . Es evidente que con una rampa de entrada el movimiento de salida es suave y simétrico entre las dos mitades de trayectoria. Las coordenadas cartesianas de estos dos eslabones en función de θ_2 se puede observar en la Figura 45.

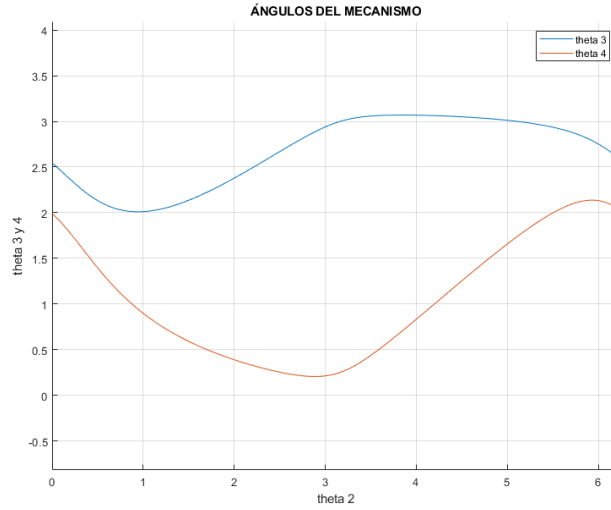


Figura 44: Ángulos θ_3 y θ_4 en función de θ_2 en el mecanismo de giro del cuello (dimensiones en radianes)

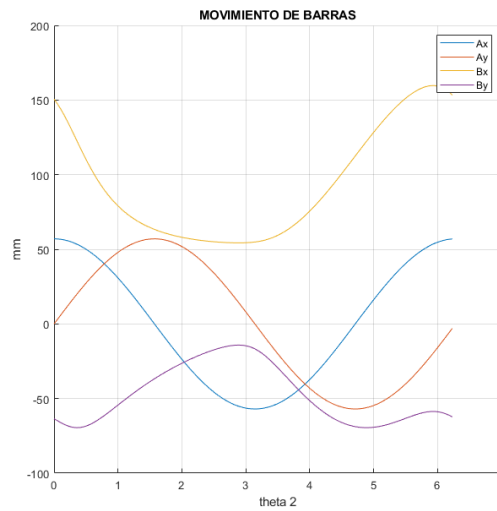


Figura 45: Coordenadas de los puntos A y B del mecanismo de giro del cuello en función de θ_2 (dimensiones en milímetros)

Por otro lado, para analizar los movimientos de cabeceo y alabeo de la cabeza mediante el cuello fue necesario emplear el ambiente de *Dynamic Simulation* en el programa de *Autodesk Inventor* debido a la complejidad del mecanismo. Se reconstruyó todo el sistema del cuello de forma simplificada respetando las dimensiones reales y se definieron las juntas esféricas y revolutas según cada conexión entre piezas.

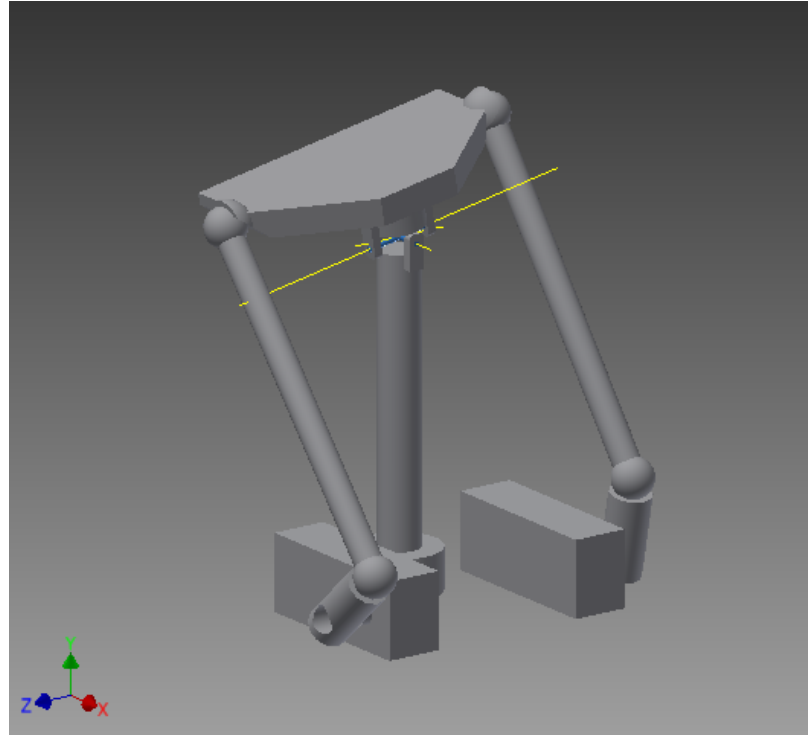


Figura 46: Modelo simplificado elaborado en *Autodesk Inventor* para su análisis en el ambiente *Dynamic Simulation*.

Se plantearon cuatro movimientos básicos a ser analizados, es decir, en el sentido positivo y negativo de los dos ejes mencionados previamente. Se encontró que el ángulo para ambos servo actuadores de entrada que logra ubicar la base de la cabeza en una posición completamente horizontal es 59.25° , por lo que cada uno de estos movimientos parte de esta posición inicial.

Las gráficas que representan dichos movimientos se ilustran de la Figura 48 a la 50 en donde los trazos rosados, azules y rojo identifican la trayectoria angular del servo motor derecho, alabeo y cabeceo, respectivamente.

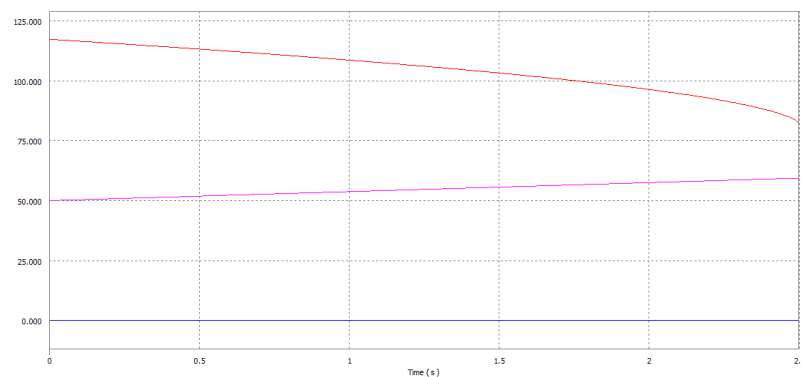


Figura 47: Gráfico de movimiento para cabeceo negativo

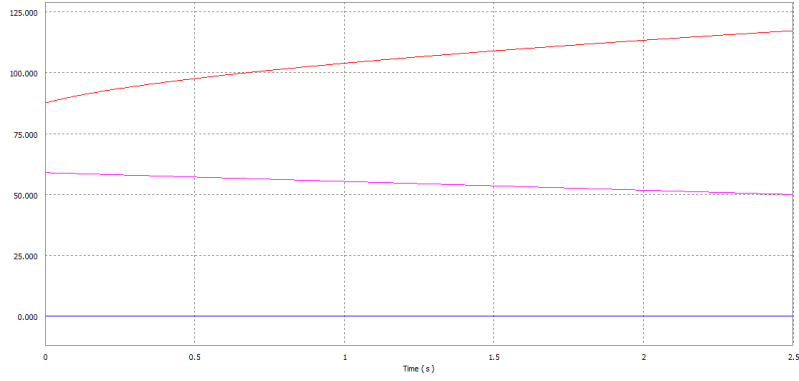


Figura 48: Gráfico de movimiento para cabeceo positivo

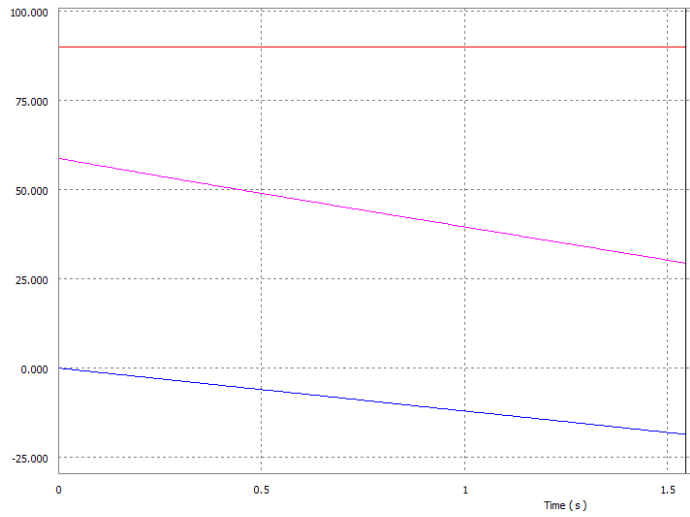


Figura 49: Gráfico de movimiento para alabeo negativo

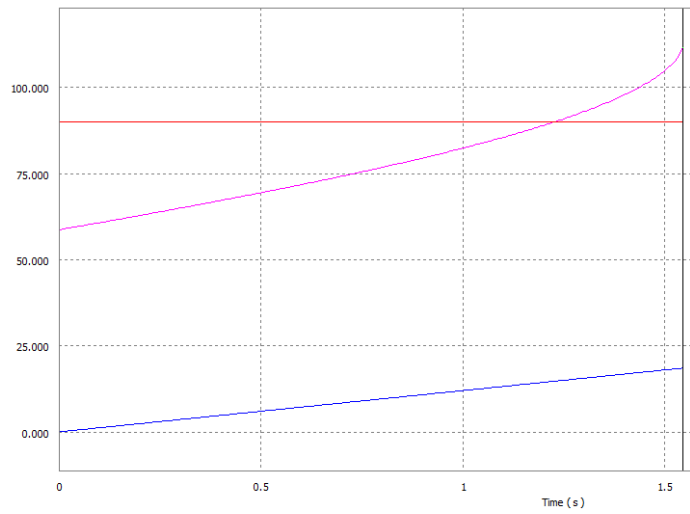


Figura 50: Gráfico de movimiento para alabeo positivo

Este análisis permite conocer los rangos de movimiento en donde un giro de 10° en los actuadores representan un giro de cabeceo de 25° ; esto sucede en dirección positiva y negativa como se puede observar en las figuras 48 y 47. Es necesario que los motores no excedan la posición de agarrotamiento, ya que el movimiento del cuello cambia de dirección.

Similarmente, para obtener giros de alabeo en la cabeza, los servos de entrada deben moverse de forma contraria, es decir, si uno se mueve de 59° a 69° , el otro debe desplazarse de 59° a 49° . Dichos movimientos se pueden observar en las figuras 49 y 50. Un desplazamiento angular de 25° en los servos de entrada representa un movimiento de aproximadamente 21° de alabeo para la cabeza.

Es evidente que la combinación de diferentes ángulos de entrada en ambos actuadores permite la creación de movimientos más orgánicos y complejos; los cuales pueden ser calibrados o de forma empírica.

7.1.4. Cejas y párpados

Los párpados superiores son accionados gracias a los músculos intraorbitarios, los cuales funcionan de forma independiente entre ojos. De forma similar, la cabeza robótica logra controlar cada párpado independientemente regulando el ángulo de apertura de forma precisa utilizando dos servo-motores compactos y livianos *TowerPro*. Dichos actuadores han sido seleccionados para esta tarea gracias a su alta velocidad y alto torque para su bajo peso y tamaño. En la Figura 51 se puede notar que al colocar los mecanismos en serie es necesario que cada módulo no sea muy pesado ni grande.

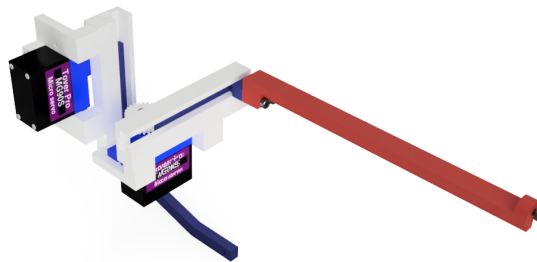


Figura 51: Render del sistema robótico para la ceja izquierda

Por otro lado, las cejas son parte elemental de las facciones humanas, especialmente para aquellas que denotan exaltación o asombro. Los dos movimientos básicos de las cejas son arrugar el entrecejo y elevarse, es decir, se trata de un movimiento planar no rotacional. Basándose en este concepto se implementó un sistema de dos grados de libertad por ceja para poder desplazarse en ambos ejes. En esencia, entre el sistema de las cejas y párpados de ambos ojos se involucran 6 grados de libertad.

Los párpados utilizan un mecanismo de cuatro barras con las dimensiones del Cuadro 7.

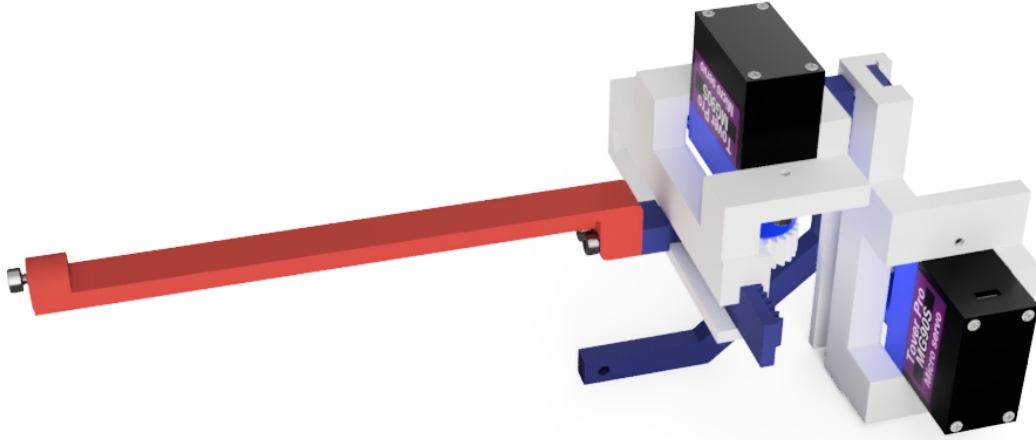


Figura 52: Render del sistema robótico para la ceja derecha

Barra	Dimensión
Entrada	12.45mm
Salida	10.54mm
Biela	70.5mm
Bancada	66.68mm

Cuadro 7: Dimensiones del mecanismo de cuatro barras para cada párpado

Para analizar este mecanismo se empleó *Matlab* elaborando las gráficas de posición angular de θ_3 y θ_4 en función de θ_2 al igual que las coordenadas de los puntos *A* y *B* en donde se hace evidente que el rango de operación se encuentra entre 0.9 y 5.3 *rad*, lo cual permite ubicar la trayectoria del párpado de 90° dentro de este rango sin problemas ni limitaciones. Asimismo, se verificó que este mecanismo se clasifica como *no Grashof* por lo que ninguno de sus eslabones puede dar una revolución completa. En esta ocasión se despreció la configuración cruzada del mecanismo de cuatro barras dado que en el robot nunca se hará funcionar de esta forma.

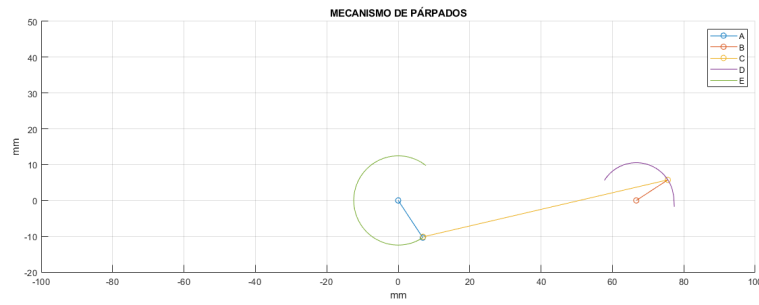


Figura 53: Recorrido de barras del mecanismo de los párpados (dimensiones en milímetros)

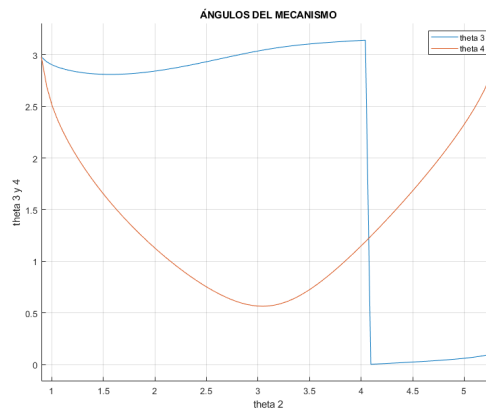


Figura 54: Ángulos θ_3 y θ_4 en función de θ_2 en el mecanismo de los párpados (dimensiones en radianes)

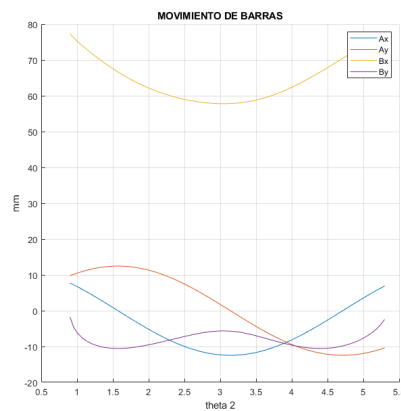


Figura 55: Coordenadas de los puntos A y B del mecanismo de los párpados en función de θ_2 (dimensiones en milímetros)

Por otro lado, cada ceja es capaz de moverse en dos dimensiones mediante la colocación de dos actuadores lineales en serie. La rotación de cada servo-motor se traduce en un movimiento en x o y . El rack de cada actuador tiene una carrera de $41.29mm$ por lo que el área de trabajo de cada ceja es de $1704.86mm^2$ estando ambas cejas espejeadas.

Para calcular el desplazamiento angular para trasladar una deseada cantidad de milímetro linealmente se obtuvo la siguiente relación:

$$l = r * \theta = 5.92mm * 1^\circ * \frac{\pi}{180^\circ} = 0.103mm \quad (12)$$

La cual indica que por cada grado que rote el engrane el rack se desplazará $0.1033mm$, o bien una revolución completa del piñón representa un desplazamiento de $37.188mm$.

7.2. Análisis

El software *Fusion 360* cuenta con un ambiente de trabajo de simulación para analizar los esfuerzos de cuerpos rígidos. Esto es logrado mediante la simulación tipo *NASTRAN* de análisis de elementos finitos, *FEA* por sus siglas en inglés. Este algoritmo fue originalmente desarrollado por *NASA* en la década de 1960 y posteriormente implementado por desarrolladores de programas CAD como *Autodesk*.

La cabeza animatrónica fue analizada utilizando esta herramienta en cada módulo independientemente, es decir, boca, cejas, cuello y ojos. Para obtener la mayor exactitud a los cálculos se predefinieron las características físicas de cada material dentro de los ensamblajes en los cuadros [8](#), [9](#), [10](#) y [11](#).

Acero	
Densidad	$7.8 * 10^{-6} \text{ kg/mm}^3$
Módulo de Young	$210,000 * 10^3 \text{ MPa}$
Coefficiente de Poisson	0.3
Esfuerzo de fluencia	207 MPa
Esfuerzo último	345 MPa

Cuadro 8: Características del acero empleado en la cabeza animatrónica

Biopolímero de ácido poliláctico (PLA)	
Densidad	$1.38 * 10^{-6} \text{ kg/mm}^3$
Módulo de Young	6,890 MPa
Coefficiente de Poisson	0.34
Esfuerzo de fluencia	51.71 MPa
Esfuerzo último	51.71 MPa

Cuadro 9: Características del filamento PLA empleado en la cabeza animatrónica. Estas propiedades varían según parámetros de la impresión 3D

Medium Density Fiberboard (MDF)	
Densidad	$8 * 10^{-7} \text{ kg/mm}^3$
Módulo de Young	2,400 MPa
Coefficiente de Poisson	0.25
Esfuerzo de fluencia	7.72 MPa
Esfuerzo último	7.72 MPa

Cuadro 10: Características de las planchas de MDF empleadas en la cabeza animatrónica

Acrilonitrilo butadieno estireno (plástico ABS)	
Densidad	$1.1 * 10^{-6} \text{ kg/mm}^3$
Módulo de Young	2,780 MPa
Coefficiente de Poisson	0.4
Esfuerzo de fluencia	54.4 MPa
Esfuerzo último	54.4 MPa

Cuadro 11: Características del plástico ABS de varios elementos de los servo-motores

Las fuerzas definidas en el modelo fueron estimadas con base en los torques máximos de cada actuador y las fuerzas del látex en las uniones con el cobertor por instalar siendo este el escenario menos favorecedor. La resistencia ofrecida por el látex fue basada en los estudios realizados en el reporte publicado por el Centro de Investigaciones en Óptica en México en el año 2003 [24].

$$F_{latex} = E * A * \epsilon = 703 * 10^3 Pa * 0.002m * 0.05m * 0.1 = 7.03N \quad (13)$$

En donde F_{latex} es la fuerza que ofrece la cubierta de látex en una superficie A de 5cm de largo por 2mm de espesor en donde el material experimenta una elongación relativa ϵ del 10% y E el módulo de *Young* del hule látex según la interferometría electrónica de patrones de moteado (ESPI) [24]. De esta forma, en cada punto de acople entre el cobertor de látex y los mecanismos se definió una fuerza de 7.03N.

7.2.1. Esfuerzos en ojos

Todo el sistema de los ojos fue simulado en conjunto, dado que se trata de un módulo relativamente sencillo y con pocos elementos. En la simulación *NASTRAN* se colocaron fuerzas en puntos claves en los mecanismos como resistencias en los globos oculares, párpados y torques máximos de cada actuador para representar el escenario menos favorecedor. El esfuerzo *von Mises* más elevado se ubica en los dientes internos del engrane del servo-motor que acciona el párpado superior; sin embargo, no representa un riesgo para el sistema dado a que antes de llegar a este punto el torque del actuador *TowerPro* cedería sin que esta parte se dañe.

Los acopladores de los mecanismos de cuatro barras sufren un esfuerzo entre 0.2 y 0.6 MPa. Por otro lado, el desplazamiento neto máximo se encuentra en los globos oculares en caso uno tenga movilidad y el otro se atasque. Esta deflexión puede llegar a ser hasta de 0.6875mm. La Figura 57 muestra los puntos críticos en esfuerzos *von Mises* y la Figura 56 los desplazamientos netos del módulo ocular.

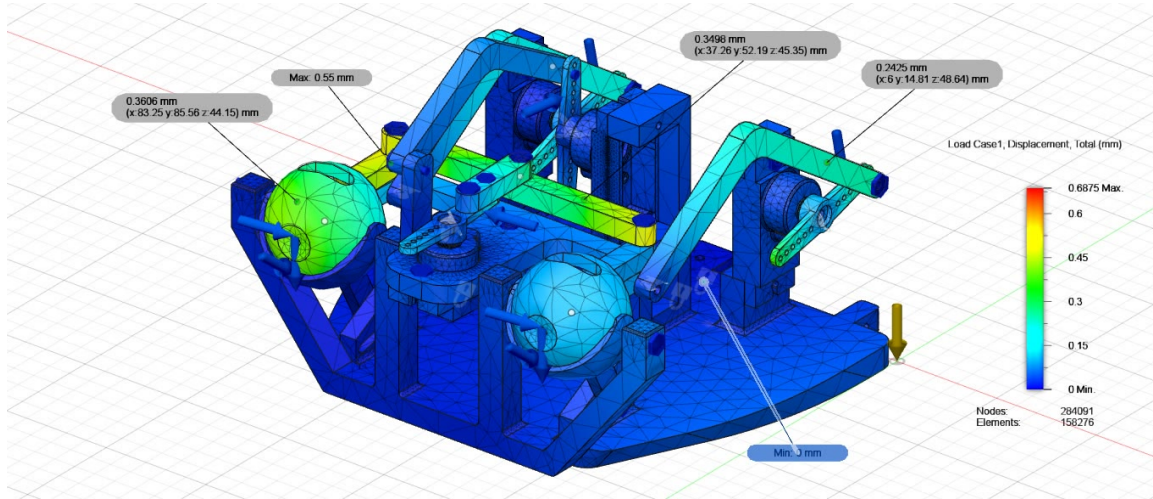


Figura 56: Diagrama de desplazamientos netos del mecanismo de los ojos

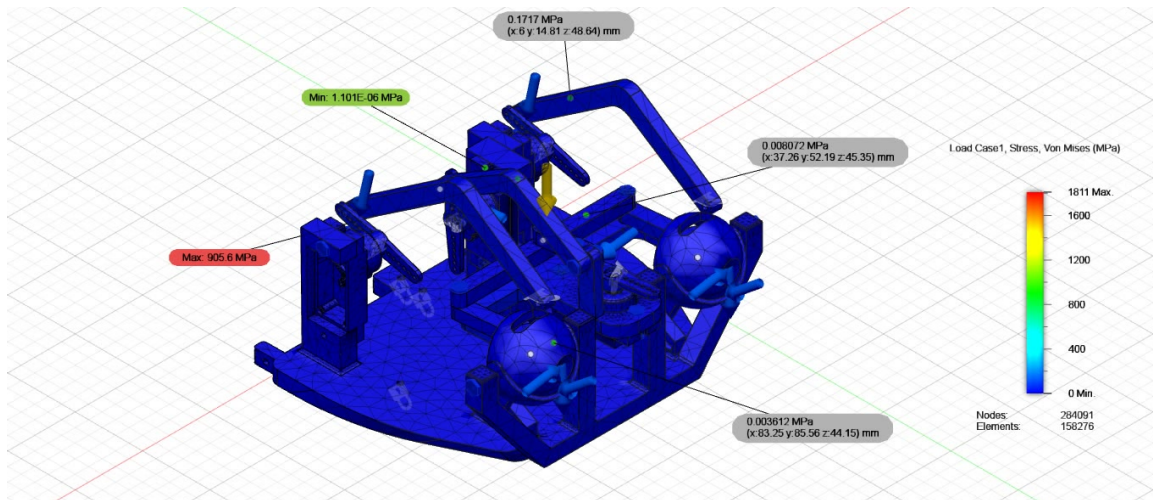


Figura 57: Diagrama de esfuerzos *von Mises* del mecanismo de los ojos

7.2.2. Esfuerzos en boca

El módulo de la boca fue separado en tres análisis para obtener mayor visibilidad de los esfuerzos al igual que permitirle al algoritmo *FEA* converger a un valor correcto con menos iteraciones. En todos los subensambles se implementaron fuerzas más grandes de las esperadas en un funcionamiento normal, por ejemplo, se asumió que el cobertor de látex ejercería en cada punto de conexión con el mecanismo una fuerza de 7.03N; asimismo, se

introdujeron fuerzas externas en puntos clave para simular en caso algo se atasque con el mecanismo.

En el caso de la mandíbula inferior se colocó una fuerza ajena al sistema en la parte frontal de la dentadura simulando algún objeto siendo atascado al igual que las fuerzas en los pivotes del mecanismo del labio inferior y la resistencia del resorte del labio en el carrete del actuador detrás de la dentadura. El esfuerzo *von Mises* más grande encontrado se ubica en los agujeros para los tornillos de ambos actuadores en la parte superior de la mandíbula inferior como se puede apreciar en la Figura 59 con un valor de 6.825 MPa, mientras que el desplazamiento más grande se encuentra en la parte frontal del mecanismo con un desplazamiento neto de 0.183mm, lo cual se puede observar en las figuras 58 y 61. Los pivotes del labio inferior sufren un esfuerzo equivalente de máximo 0.6 MPa. El factor de seguridad mínimo de este sistema es de 7.577.

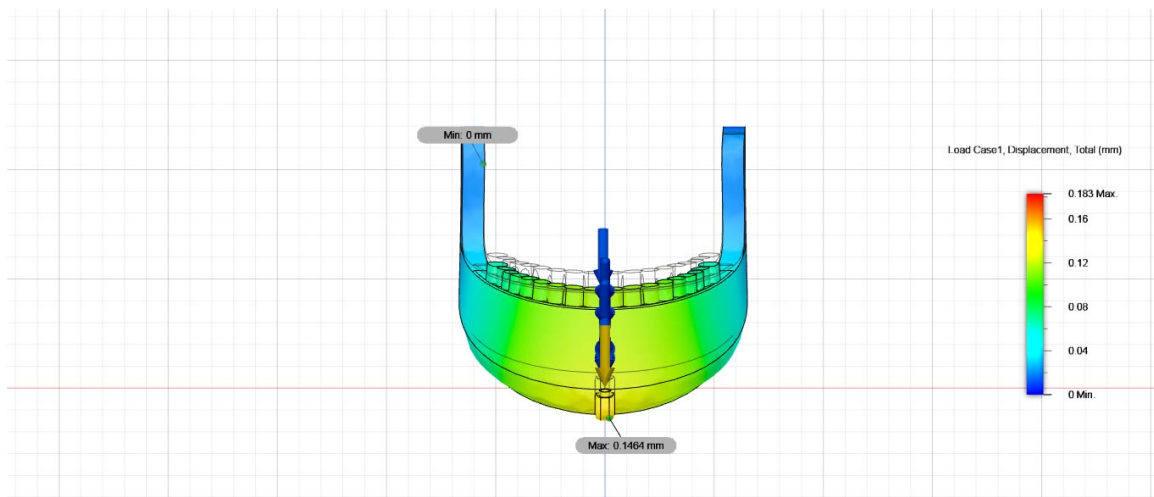


Figura 58: Diagrama de desplazamientos netos en la mandíbula inferior

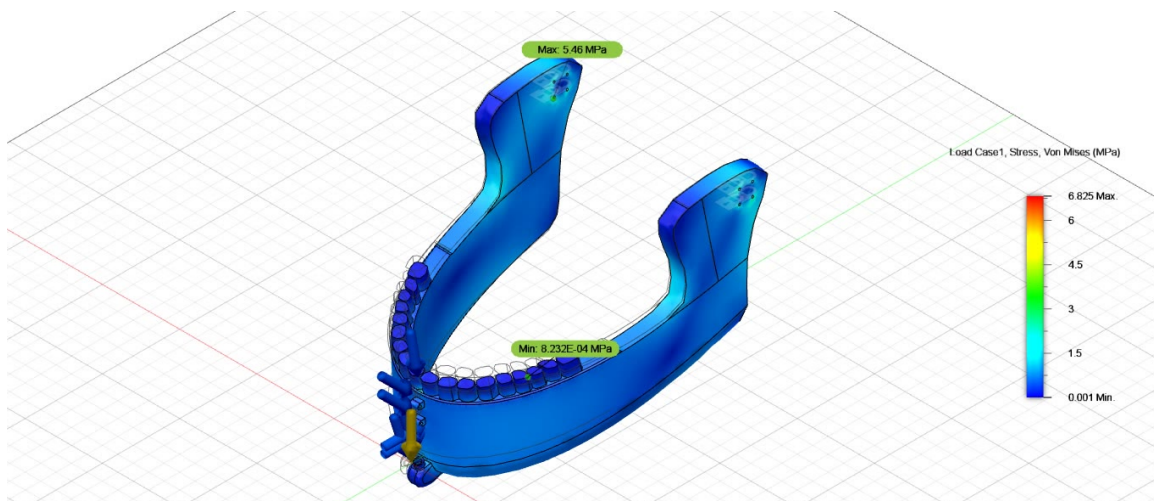


Figura 59: Diagrama de esfuerzos en la mandíbula inferior

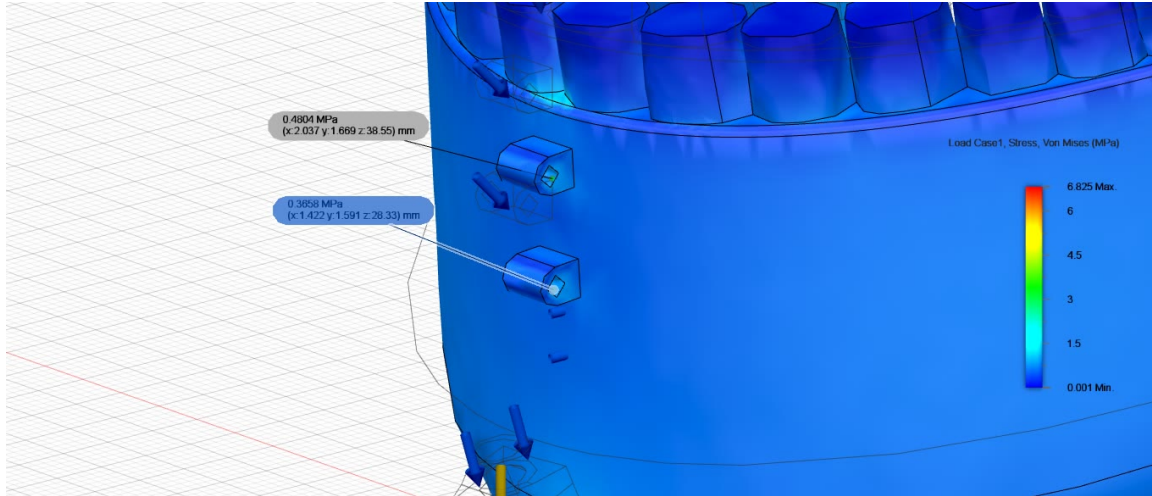


Figura 60: Diagrama de esfuerzos *von Mises* en las bases del labio de la mandíbula inferior

La mandíbula superior cuenta con un esfuerzo máximo de 236.2 MPa y un factor de seguridad mínimo de 0.21 en el contacto del actuador del labio superior y el *underskull* en donde el filo de dicho acople es detectado por el algoritmo de *Autodesk Fusion* como una acumulación de esfuerzos; sin embargo, ha sido analizado y no representa un riesgo para el mecanismo. Luego de este punto el subensamble cuenta con un factor de seguridad superior a 8.0, un desplazamiento neto máximo de 0.2102 mm en la carrete del actuador del labio superior y un esfuerzo *von Mises* máximo de 18.16 MPa en el agujero para el tornillo para el módulo que mueve los cuatro servo-motores para los extremos de los labios. A pesar de que los acopladores para las cejas del robot se alejan considerablemente del *underskull*, estos sufren solamente un desplazamiento neto de 0.08mm. Esta información se evidencia de forma gráfica en las figuras [61](#), [62](#) y [63](#).

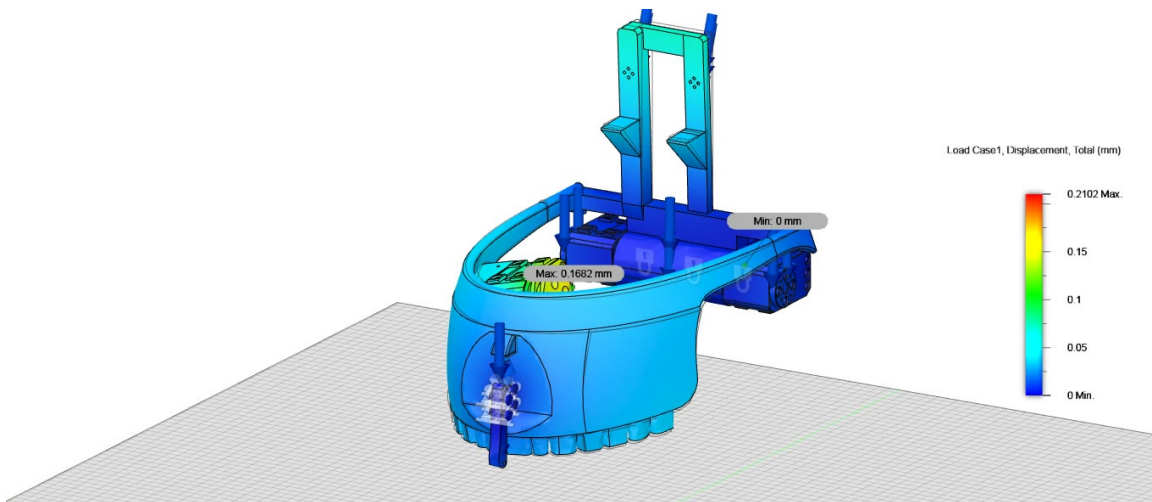


Figura 61: Diagrama de desplazamientos netos en la mandíbula superior en vista isométrica

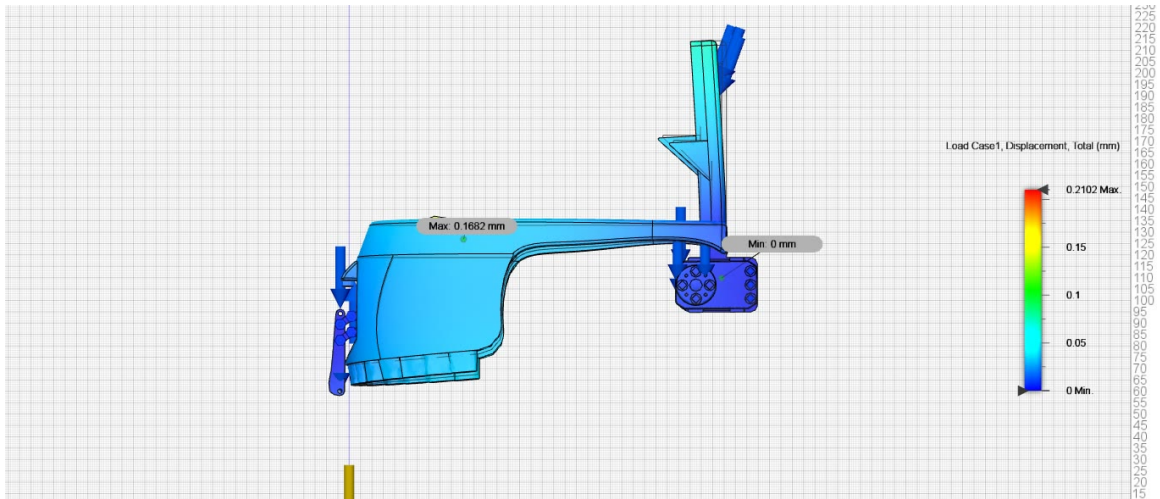


Figura 62: Diagrama de desplazamientos netos en la mandíbula superior en vista lateral

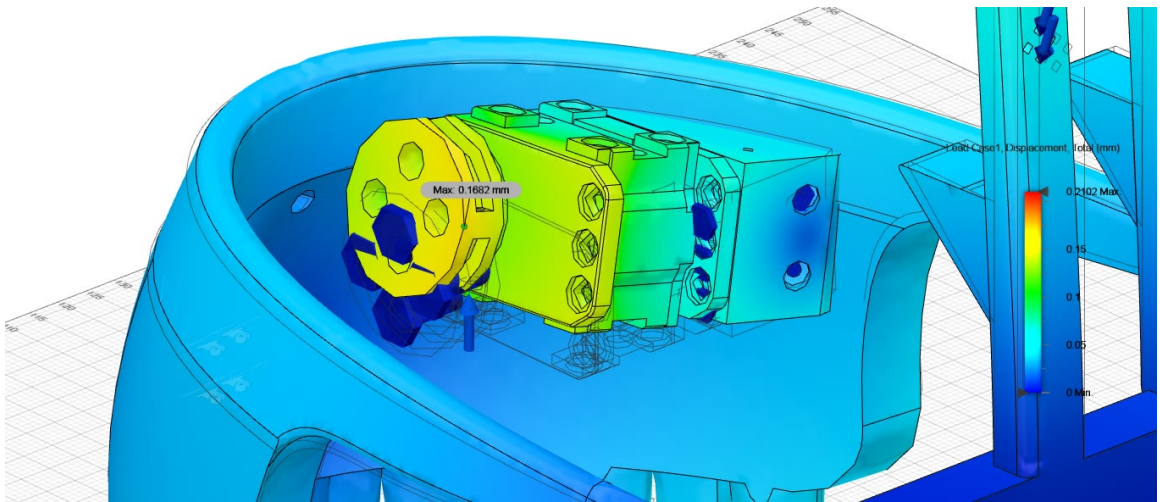


Figura 63: Diagrama de desplazamientos netos en soporte de servo de labio superior

El tercer y último subensamble del sistema de la boca es el soporte de los cuatro servo-motores que mueven los extremos de los labios. Este sistema sufre de un esfuerzo máximo de 31.18 MPa en el accesorio de los actuadores, aunque se debe a que las fuerzas ejercidas por los servo-motores han sido colocadas al máximo y simultáneamente. Por otro lado, el desplazamiento neto máximo es de 5.704 mm justo en la conexión con el cobertor de látex bajo las mismas circunstancias extremas mencionadas anteriormente. Esta deflexión puede ser compensada por el amplio rango de movilidad del mecanismo de cinco barras. La representación gráfica de estos esfuerzos se puede observar en la Figura [64](#) y la de los desplazamientos netos en la [65](#).

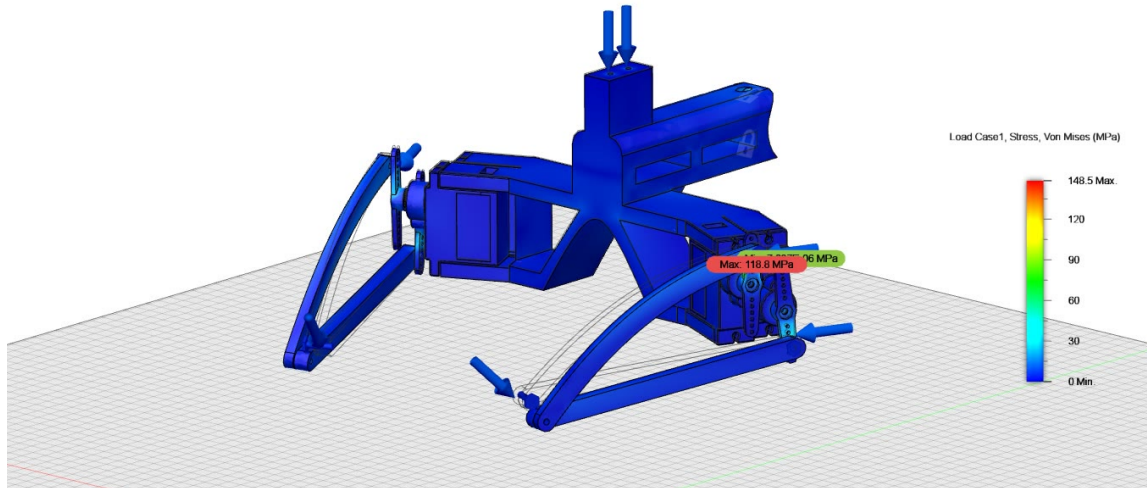


Figura 64: Diagrama de esfuerzos *von Mises* en soporte de 4 servos para el movimiento del extremo de los labios

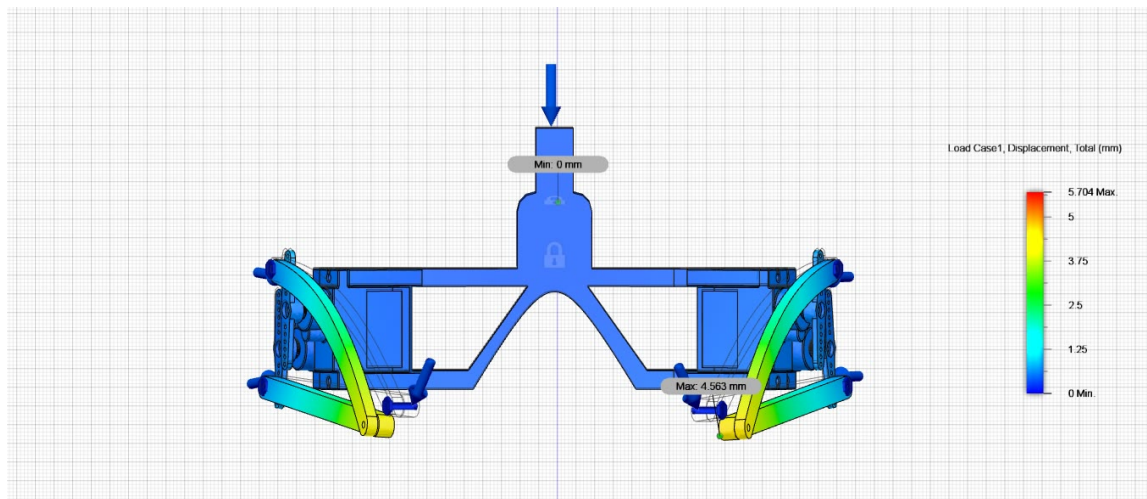


Figura 65: Diagrama de desplazamientos netos en soporte de 4 servos para el movimiento del extremo de los labios

7.2.3. Esfuerzos en cuello

El cuello del robot fue analizado en dos subensamblajes, uno para la parte superior y otro para las bases del sistema. En el primero el esfuerzo más alto se encuentra en la junta universal con un valor de 851.2 MPa; esta pieza es de acero por lo que no significa un problema para el diseño. La barras de acero sufren un esfuerzo equivalente entre 0.1 MPa y 1.5 MPa. Algunos puntos claves se pueden evidenciar en la Figura 69. Por otro lado, los elementos más propensos a sufrir desplazamientos netos indeseados son las tres barras de acero que conectan el cuello con el módulo de la boca con un valor de 0.04474 mm tomando en consideración el peso de todos los módulos que debe soportar. Estas deflexiones se pueden notar en la Figura 68.

En el caso del subensamblaje de las bases rotativa y estacionaria del cuello el elemento sujeto a un mayor nivel de esfuerzos es la biela que conecta el actuador *Dynamixel* con la base rotativa. Este elemento corre el riesgo de ruptura en caso la cabeza deje de girar por un atascamiento; de lo contrario el esfuerzo en este punto es mínimo. En el escenario más adverso, el esfuerzo sufrido por esta pieza sería de 39.01 MPa. La varilla metálica central experimenta un esfuerzo equivalente de 0.71 MPa y los accesorios de los actuadores sobre la base rotativa reciben un esfuerzo máximo de 0.54 MPa. Estos valores pueden apreciarse detalladamente en la Figura 67. El desplazamiento más grande en este sistema se ubica en la conexión entre la biela y la manivela del servo-motor anclado a la base estacionaria con un valor de 0.1929mm mientras que los accesorios de los actuadores sobre la base rotativa se desplazan 0.05mm en operación normal; la Figura 66 explica este desplazamiento más profundamente.

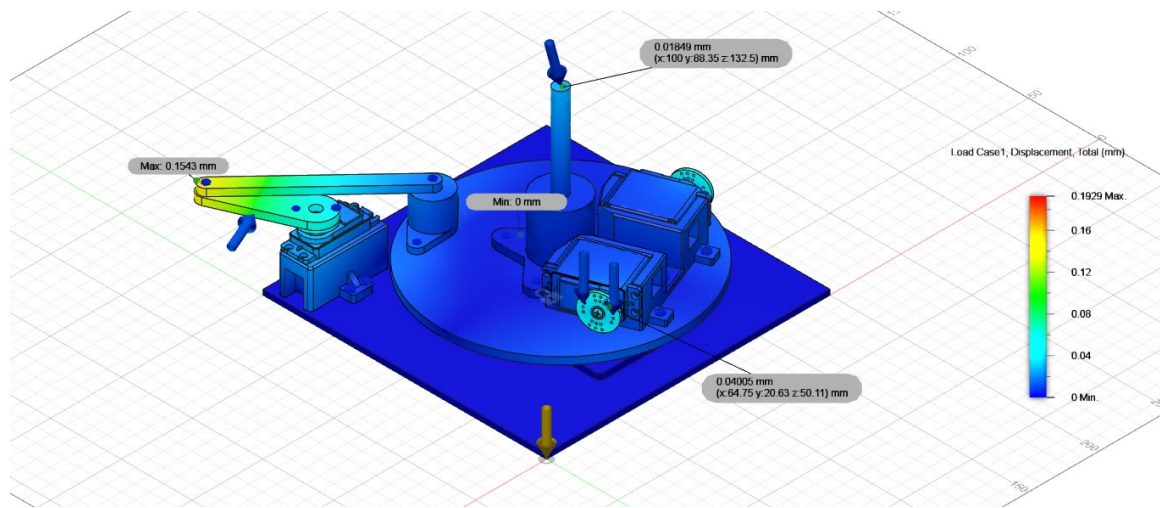


Figura 66: Diagrama de desplazamientos netos en bases rotativa y estacionaria del cuello

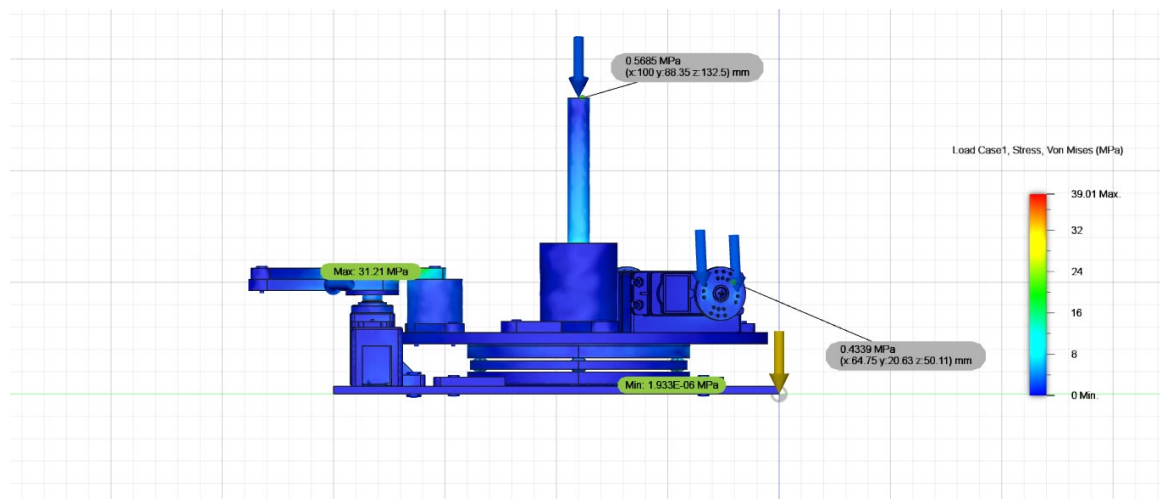


Figura 67: Diagrama de esfuerzos *von Mises* en bases rotativa y estacionaria del cuello

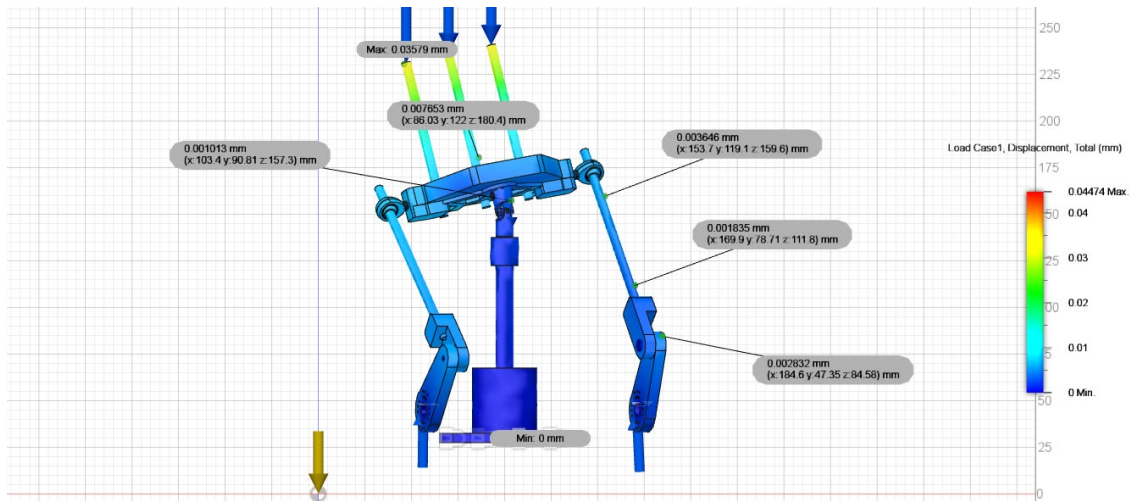


Figura 68: Diagrama de desplazamientos netos en parte superior del cuello

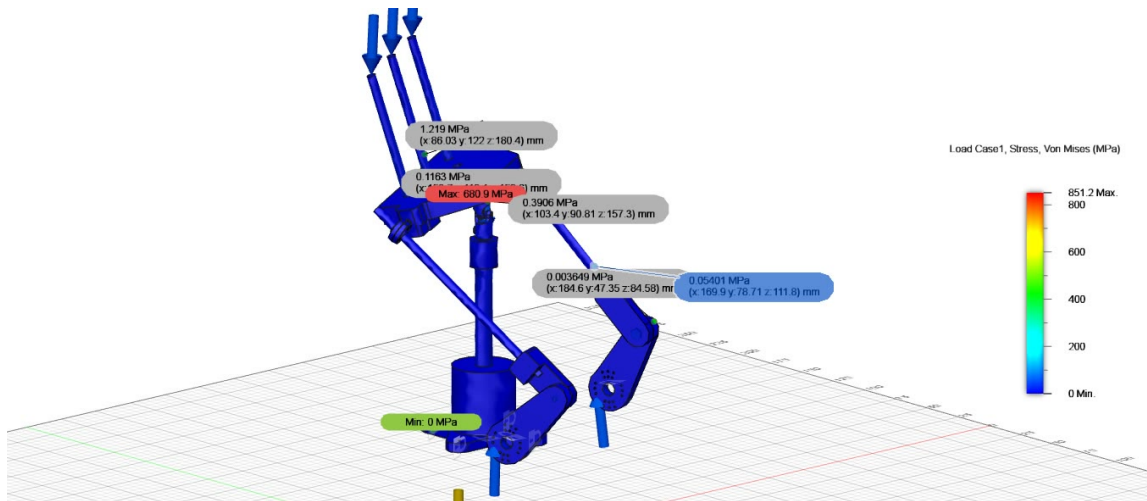


Figura 69: Diagrama de esfuerzos *von Mises* en la parte superior del cuello

7.2.4. Esfuerzos en cejas

A pesar de que las cejas derecha e izquierda cuentan con un diseño similar, se analizaron de forma independiente para descartar fallos en el diseño. En ambos casos el extremo de cada ceja sufre del mayor desplazamiento siendo este de aproximadamente 3mm; este aspecto puede ser contrarrestado desde la programación del actuador asociado con el movimiento vertical. El esfuerzo más elevado se ubica en la conexión de la varilla que dirige hacia cada ceja y el actuador lineal con un valor de 32.5 MPa. El algoritmo detecta una concentración de esfuerzos en el tornillo del engrane del segundo servo-motor; sin embargo, este punto es descartado de ser crítico al no estar asociado con un contacto problemático real sino una posible divergencia en el algoritmo *FEA*. Las gráficas 70 y 71 muestran los desplazamientos de la ceja derecha en dos perspectivas.

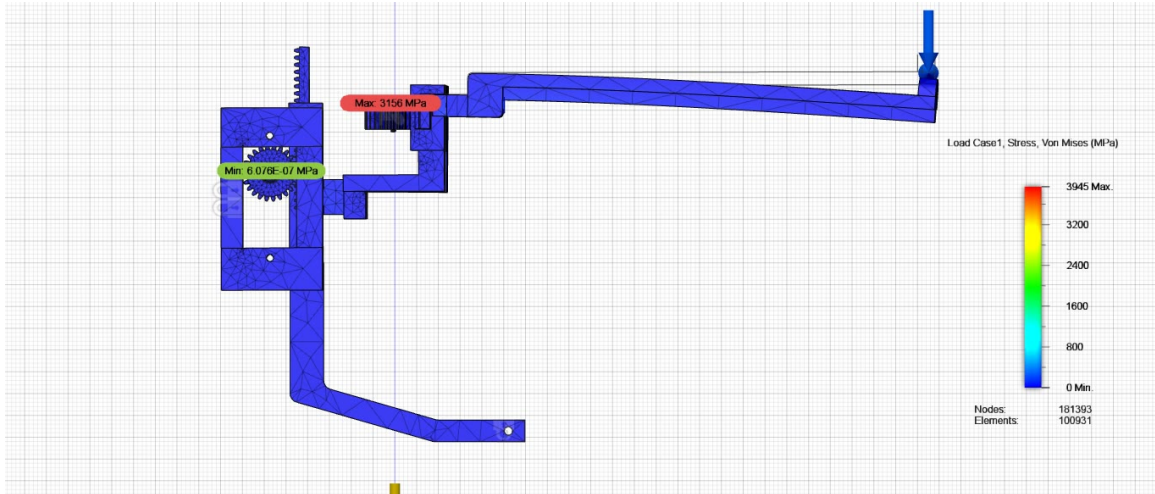


Figura 70: Diagrama de esfuerzos en la caja derecha en vista lateral

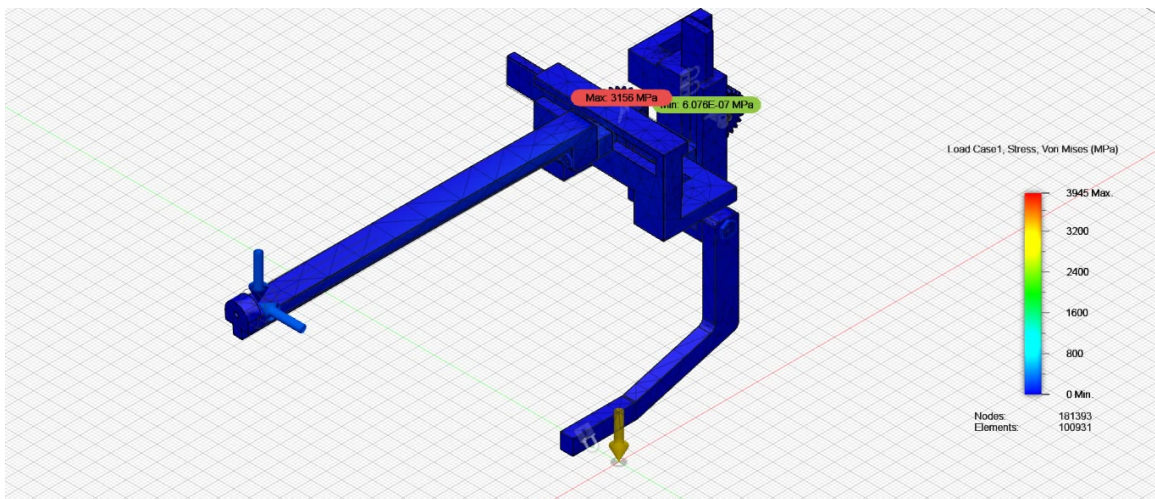


Figura 71: Diagrama de esfuerzos *von Mises* en la caja derecha en vista isométrica

De forma similar, la caja izquierda sufre de un esfuerzo en la base de la extensión hacia el efector final de la caja con un valor de 25.49 MPa y una deflexión máxima al extremo del efector de 3.07mm. El soporte de las cajas hacia el módulo de los ojos ayuda a que estos valores sean más controlables incluso con fuerzas sobredimensionadas o en operación demandante.

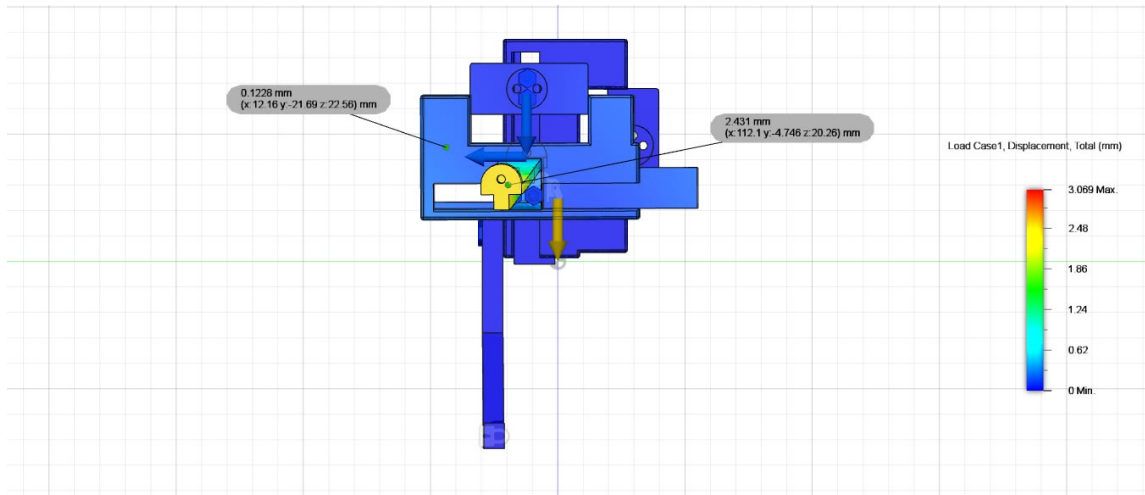


Figura 72: Diagrama de desplazamientos netos en la caja izquierda

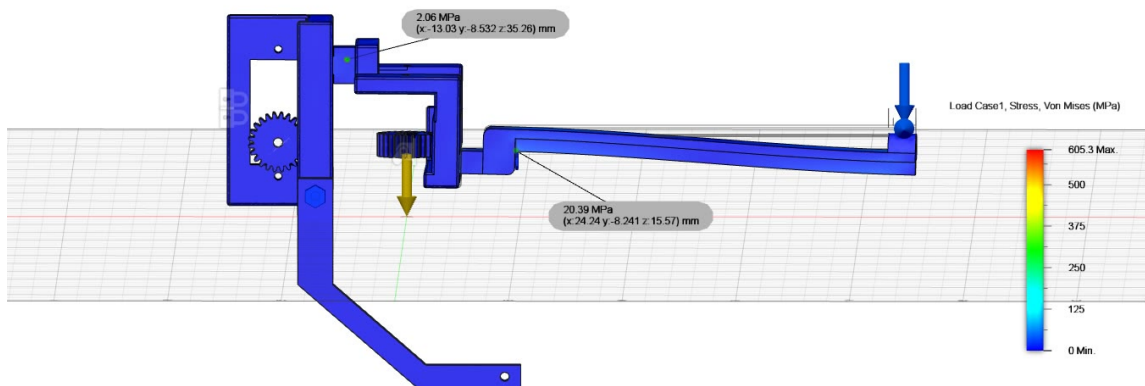


Figura 73: Diagrama de esfuerzos *von Mises* en la caja izquierda

7.3. Reducción de vibraciones

Las figuras animatrónicas han sufrido desde su surgimiento problemas con las vibraciones y oscilaciones indeseadas ya que resulta complicado trasladar un movimiento ideal computacional al mundo real. Los principales retos con los que se debe enfrentar el desarrollador son las características físicas como el peso, grados de libertad, limitaciones físicas y deformaciones de las piezas. El acercamiento clásico para resolver esta problemática consiste en construir estructuras mecánicas muy rígidas, colocar muchos soportes o bien limitar la figura a que realice únicamente movimientos lentos. Sin embargo, en el artículo *Vibration – Minimizing Motion Retargeting for Robotic Characters* del desarrollo de *Disney* y la Universidad de *British Columbia* se detalla una estrategia innovadora que permite crear robots más compactos y con un nivel de vibraciones mínimo [25].

La estrategia plasmada en este artículo consiste en el desarrollo de un algoritmo que optimiza la trayectoria de los motores del robot tomando en consideración la elastodinámica y dinámica de cuerpos rígidos sus piezas mecánicas. Su funcionamiento se basa en la reducción de las frecuencias modales de cada mecanismo en las curvas de movimiento del efector.

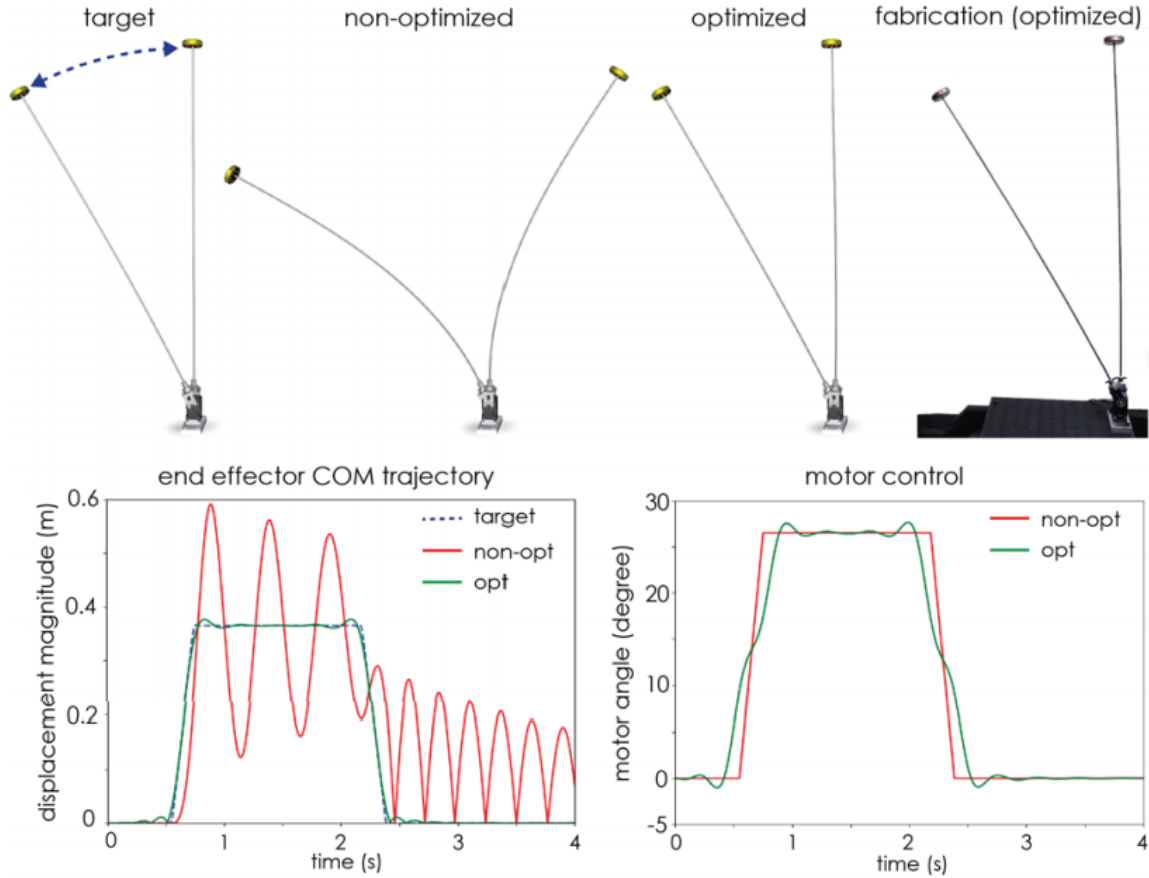


Figura 74: Trayectoria del efector sin optimizar y derecha optimizada [25]

En la cabeza animatrónica se utilizó el concepto básico de implementación de este artículo así como la estrategia clásica para minimizar vibraciones. Los aspectos que ayudaron a reducir este fenómeno indeseado se implementaron tanto en *Software* como en el diseño mecánico; estos se detallan a continuación:

- Utilización de materiales menos propensos a sufrir deflexiones en comparación a previas versiones de la cabeza animatrónica
- Colocación de refuerzos entre módulos para reducir la longitud de piezas en voladizo
- Extracción de frecuencias modales del diseño mecánico para excluirlas lo más posible de las trayectorias implementadas en *Software*
- Programación de controlador *PID* en servo-motores

En previas versiones de la cabeza animatrónica desarrollada en la Universidad del Valle de Guatemala ha predominado la utilización de *MDF* cortada mediante láser para formar su estructura; sin embargo, su alto módulo de *Young* comparado con *PLA* no logra controlar las vibraciones de una manera eficiente. Dichos valores se pueden comparar en los cuadros 9 y 10. Asimismo, las tecnologías de fabricación aditiva *FDM* y *DLP* logran crear geometrías más complejas para brindar más robustez a cada pieza. Algunos de estas piezas de refuerzos se ilustran en las figuras 75, 76 y 77.

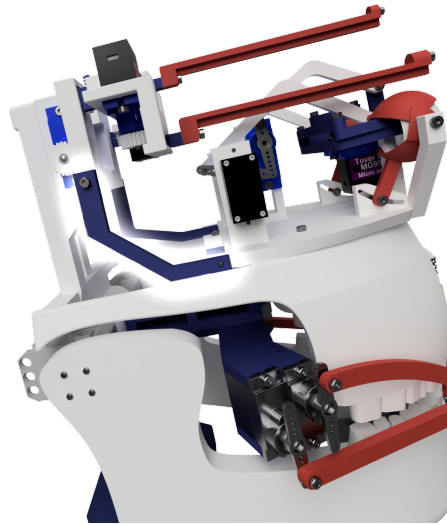


Figura 75: Refuerzo impreso mediante tecnología *FDM* que conecta la ceja derecha y el módulo de los ojos

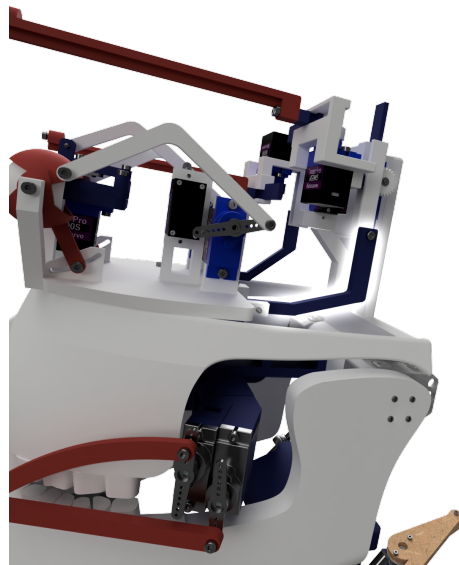


Figura 76: Refuerzo impreso mediante tecnología *FDM* que conecta la ceja izquierda y el módulo de los ojos

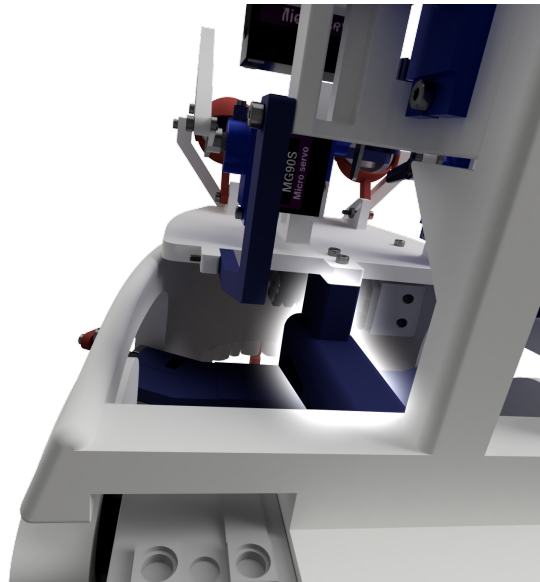


Figura 77: Refuerzo que conecta el soporte de los cuatro actuadores que controlan los extremos de los labios y el módulo de los ojos.

Por otro lado, gracias a que *Autodesk Fusion 360* ofrece dentro de su ambiente de simulación el análisis de frecuencias de resonancia, se introdujo el modelo de la cabeza animatrónica para obtener dichos valores. Para ejecutar este análisis se separaron los módulos obteniendo los primeros 8 modos de resonancia para cada uno; estas frecuencias se pueden observar en los cuadros [12](#) y [13](#).

Módulo	Modo 1	Modo 2	Modo 3	Modo 4
Base extremos labios	93.96 Hz	133.9 Hz	152 Hz	186.9 Hz
Cuello superior	203.6 Hz	280.5 Hz	541 Hz	564 Hz
Mandíbula superior	21.43 Hz	52.07 Hz	122.2 Hz	157.2 Hz
Ceja derecha	133.1 Hz	164 Hz	224.8 Hz	349.7 Hz
Ceja izquierda	73.8 Hz	87.13 Hz	234.2 Hz	279.2 Hz

Cuadro 12: Primeras 4 frecuencias modales de cada módulo

Módulo	Modo 5	Modo 6	Modo 7	Modo 8
Base extremos labios	253.1 Hz	304.1 Hz	355.9 Hz	496.8 Hz
Cuello superior	581.7 Hz	587.2 Hz	605.9 Hz	658.9 Hz
Mandíbula superior	186.2 Hz	317.5 Hz	355.2 Hz	369 Hz
Ceja derecha	349.7 Hz	445.6 Hz	559.8 Hz	757.5 Hz
Ceja izquierda	459.1 Hz	505.7 Hz	689.1 Hz	835.7 Hz

Cuadro 13: Sigüentes 4 frecuencias modales de cada módulo

Estas frecuencias naturales del sistema fueron tomadas en consideración en el diseño de

trayectorias controladas por un algoritmo PID. Dichos valores se calibraron empíricamente a partir del valor predefinido en los motores inteligentes de Robotis. En la Figura 78 se ejemplifica la trayectoria de suavizada mediante el control PID implementado en un actuador Dynamixel.

	k_p	k_i	k_d
Actuador 1 (Mandíbula inferior lado izquierdo)	128	120	90
Actuador 2 (Mandíbula inferior lado izquierdo)	134	110	88
Actuador 3 (Labio superior)	133	116	94
Actuador 4 (Labio inferior)	139	125	91
Actuador 5 (Labio derecho superior)	129	102	88
Actuador 6 (Labio derecho inferior)	132	122	90
Actuador 7 (Labio izquierdo superior)	141	128	91
Actuador 8 (Labio izquierdo inferior)	141	128	91

Cuadro 14: Ganancias del controlador PID de servos inteligentes

Los sistemas mecánicos involucrados en la cabeza animatrónica deben ser tomados en consideración para una buena calibración de cada controlador PID. Las características físicas que tienen influencia directa en dicho proceso son la inercia, masa, centro de gravedad y módulo de elasticidad del material. Sin embargo, las frecuencias de resonancia dependen exclusivamente de la geometría de la pieza. Por esta razón se diseñaron elementos que redujeran la cantidad de material en voladizo como se muestra en las figuras 75, 76 y 77, es decir, con apoyos en puntos estratégicos. Al reducir esta dimensión, los modos de resonancia se desplazan a frecuencias más altas y se amplía el rango de frecuencias admisibles por los mecanismos; esto se hace evidente en la siguiente ecuación:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{L}} \quad (14)$$

En donde g y L representan la aceleración gravitatoria y la longitud desde el punto de pivote hasta el centro de masa de la pieza, respectivamente. En esta ecuación se evidencia de que un decremento de L provoca un aumento de f , es decir, las frecuencias de resonancia se elevan y son menos problemáticas en el diseño de trayectorias. Esta secuencia de ángulos es principalmente problemática al iniciar y terminar su movimiento, ya que es en estos puntos en donde se induce una aceleración grande y provoca que la pieza mecánica oscile.

Además del refuerzo de la estructura, la estrategia empleada en este escenario fue configurar las ganancias del control PID con el parámetro de rendimiento *Overshoot* completamente ausente; de esta forma se produce una curva sobre-amortiguada que suaviza las transiciones de aceleración considerablemente. Los valores guardados en la memoria RAM dentro de los actuadores Dynamixel que produjeron el resultado deseado se muestra en el Cuadro 14.

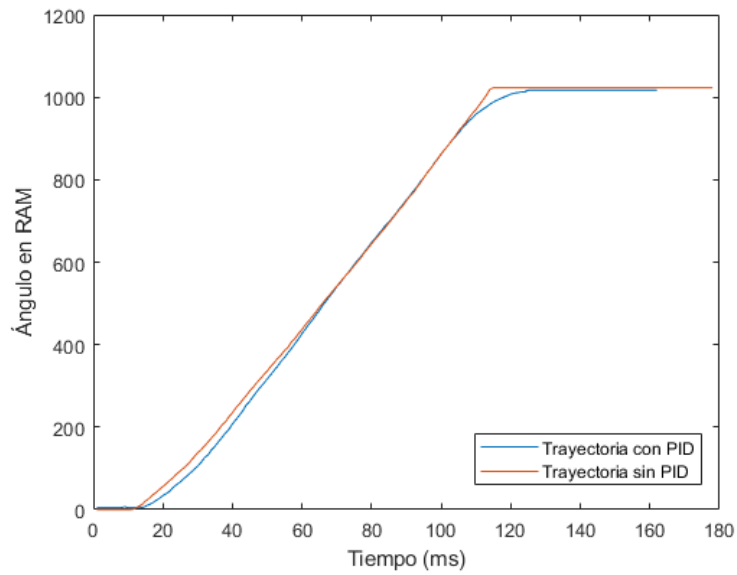


Figura 78: Comparativo entre trayectorias suavizada y no suavizada mediante control PID de actuadores Dynamixel

Mediante comunicación serial se extrajeron los ángulos de los actuadores en tiempo real y se graficaron en el programa *Matlab* para ensayar diversas combinaciones de valores de k_p , k_i y k_d que obtuvieran el comportamiento deseado; en la Figura 79 se ejemplifica la trayectoria de una ineficiente selección de parámetros para el control PID.

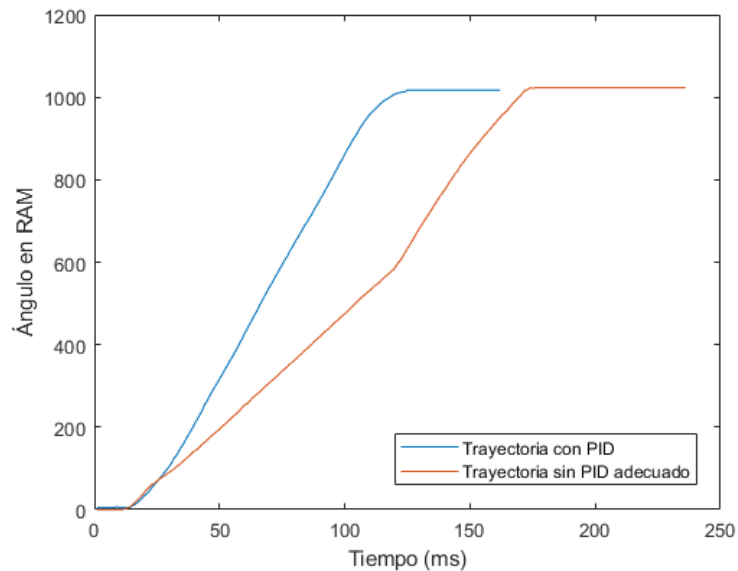


Figura 79: Comparativo entre trayectoria con una correcta y deficiente selección de ganancias PID

Diseño de circuito impreso

La cabeza animatrónica requiere de la interconexión de múltiples componentes electrónicos para su funcionamiento, por lo que se elaboró un circuito impreso (PCB, por sus siglas en inglés) en el programa *Altium Designer*. Esta herramienta computacional permite la creación de esquemáticos de circuitos para luego ser trasladados a un circuito impreso y eventualmente la exportación de archivos formato gerber para su fabricación.

Los componentes electrónicos que se unifican mediante la placa mencionada se detallan en el Cuadro 15. Estos principalmente se dividen en tres categorías: alimentación, control y los actuadores servo controlados. Se emplearon tres módulos *step down* para obtener tres voltaje distintos, ya que el controlador OpenCm9.04 al igual que los motores *TowerPro* utilizan 5V, los actuadores XL-320 7.4V y los Dynamixel AX-12A 10V. Para mantener la referencia entre dispositivos se han interconectado todos los nodos *GND*. El esquemático que explica las conexiones de todos los dispositivos se ubica en la Figura 80.

La comunicación entre el controlador de Robotis y el Driver de Adafruit se lleva a cabo mediante protocolo I2C, por lo que entre dichos dispositivos existe una conexión entre los pines *IO24* y *SCL* al igual que entre *IO25* y *SDA*, respectivamente. Por otro lado, la comunicación entre actuadores Dynamixel y el controlador se lleva a cabo mediante un conector Molex incorporado sobre la placa OpenCm9.04 mediante tecnología *TTL Level Multidrop Bus*; los demás motores se conectan en serie o bien en un arreglo tipo *Daisy Chain*.

	Componente	Cantidad
1	Headers hembra 1x6	1
2	Driver Adafruit de 16 canales de PWM	1
3	Conector hembra Molex 22-03-5035	1
4	Headers macho 1x1	12
5	Convertidor de voltaje LM2596	3
6	OpenCm9.04 Robotis	1
7	DC Power Jack 5.5mm x 2.1mm	1
8	Fuente de alimentación de 12V	1
9	XL-320 Dynamixel Servo	4
10	AX-12A Dynamixel Servo	3
11	TowerPro Microservo	12

Cuadro 15: Componentes electrónicos interconectados mediante la placa desarrollada en *Altium Designer*

Dentro de la base de datos de *Altium Designer* la mayoría de componentes utilizados en este proyecto no contaban con simbología en el esquemático, *footprint* ni modelo 3D por lo que procedió a elaborar cada uno manualmente mediante una librería propia. El *footprint* creado para el controlador OpenCm9.04 se puede apreciar en la Figura 81.

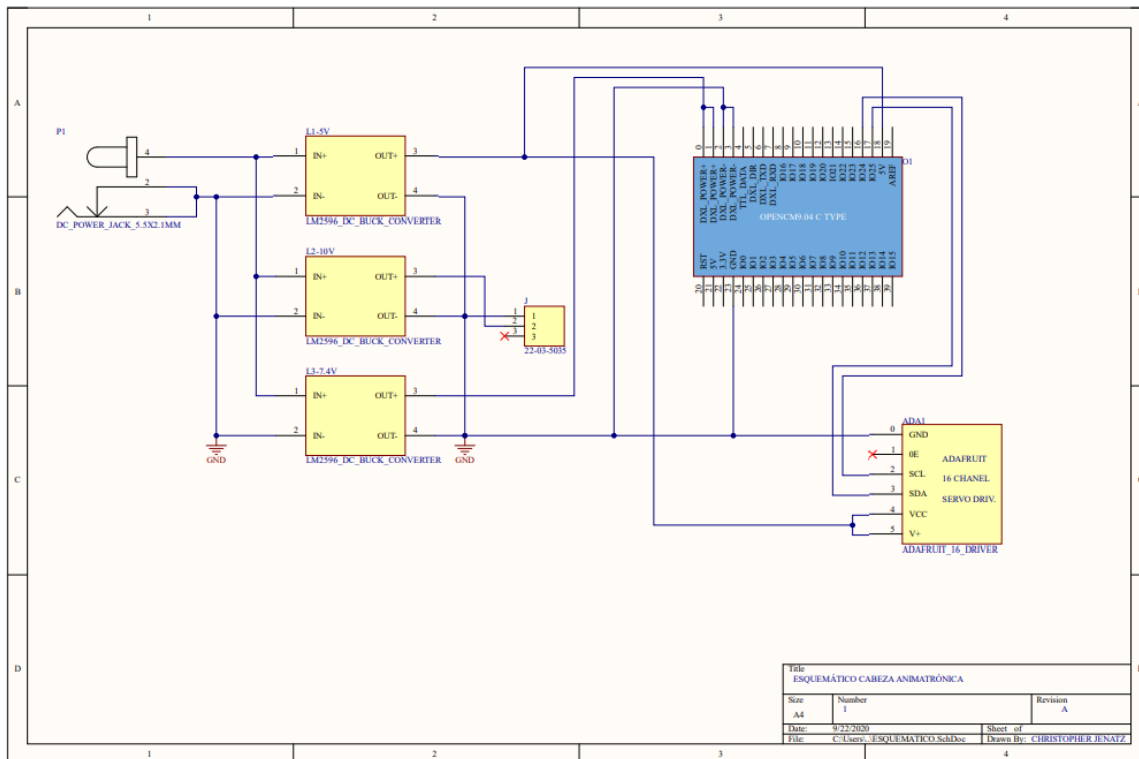


Figura 80: Esquemático del circuito implementado en el PCB en el programa *Altium Designer*

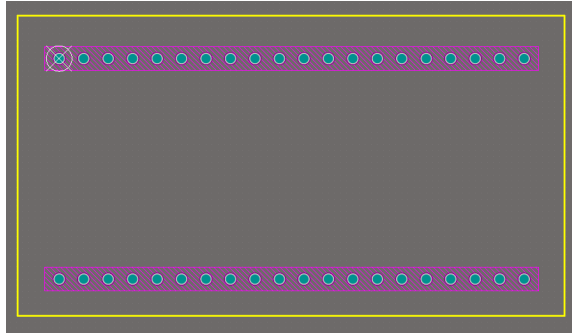


Figura 81: *Footprint* del controlador OpenCm9.04, es decir, dos hileras de headers hembra 1x20

Las pistas o *tracks* en el PCB fueron elaboradas manualmente aplicando una serie de reglas de diseño, expresadas en el Cuadro 16, para garantizar el buen funcionamiento de la placa. Asimismo, se colocaron 4 agujeros en los extremos del PCB para su montaje en una pieza estable y segura. El modelo 3D de este diseño se muestra en la Figura 82.

El ancho de los *tracks* fue calculado mediante la siguiente expresión, la cual es estándar en la industria:

$$I = 0.048 * dT^{0.44} * A^{0.725} \quad (15)$$

En donde I expresa la corriente máxima consumida por los dispositivos, siendo en este caso de 7.45A suponiendo un pico de corriente en el 50% de los dispositivos; dT el aumento en temperatura admisible y A el área de sección del *track*. Bajo condiciones manejables de operación se determinó que este ancho debía ser de 1.06mm.

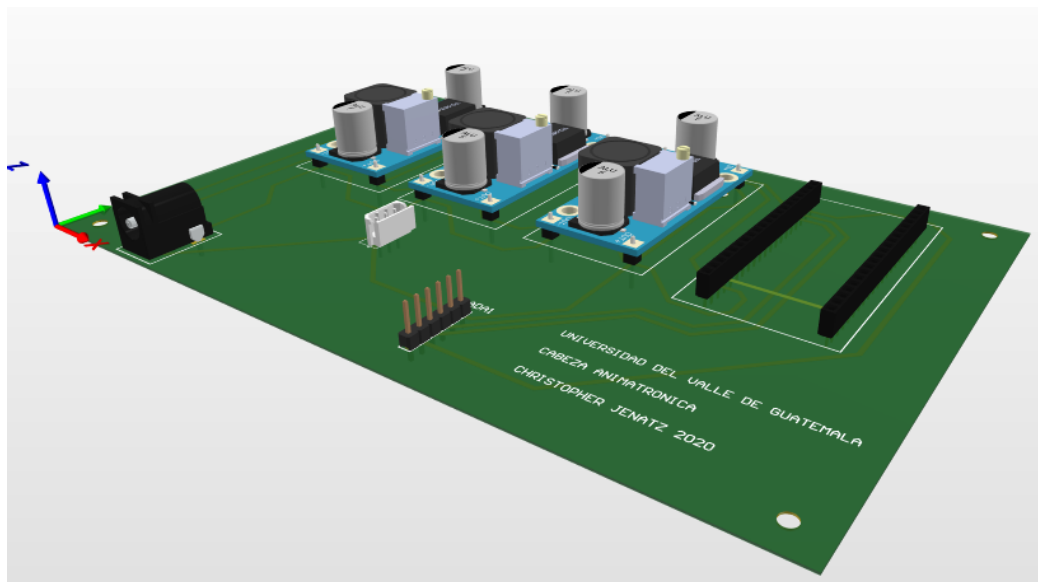


Figura 82: Modelo 3D del PCB en el programa *Altium Designer*

Las reglas para el ruteo, dimensionamiento y distanciamiento entre elementos implemen-

tadas en este diseño se detallan en el Cuadro 16. Asimismo, se utilizó geometría de lágrimas o *teardrops* para suavizar las pistas y evitar disminuciones de diámetro de ellas en el proceso de manufactura. La unificación de este proceso de diseño de ruteo se puede observar en la Figura 83.

	Regla	Detalles
1	Espaciado entre pistas	>0.5mm
2	Espaciado entre componentes	0.254 mm
3	Diámetro de agujeros	>0.025 mm & <5 mm
4	Espaciado entre agujeros	>0.254 mm
5	Longitud de nodos	>500mm
6	Espaciado entre Silks	>0.254 mm
7	Ancho de pistas	>1 mm & <3mm
8	Expansión de Solder Mask	>0.102 mm

Cuadro 16: Reglas implementadas en el ruteo de pistas en el PCB en *Altium Designer*

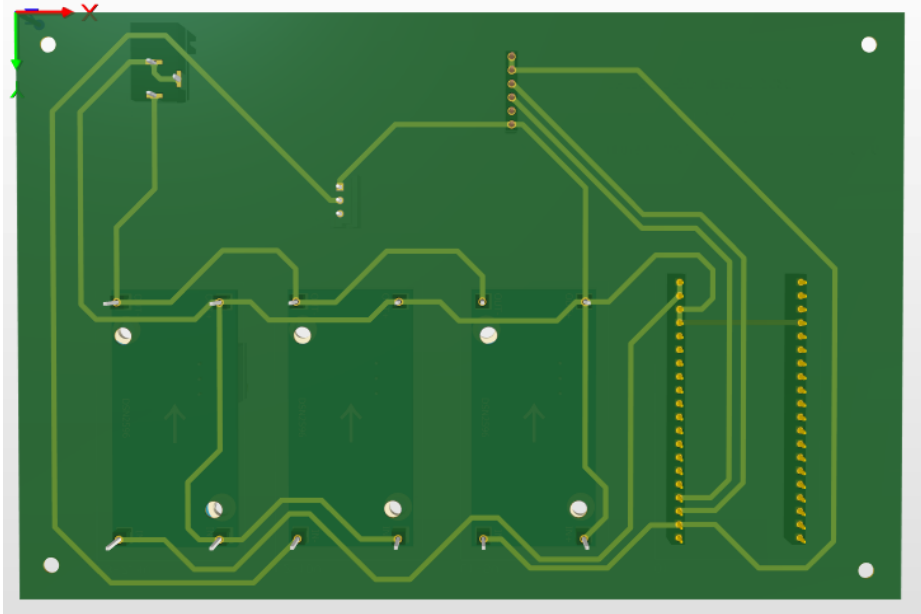


Figura 83: Lado inferior de la placa diseñada en el programa *Altium Designer*

Por último, se exportaron los archivos gerber tanto para agujeros como las pistas de la capa inferior de la placa para ser fabricada mediante una máquina de control numérico. El layout exportado para este proceso se evidencia en la Figura 84.

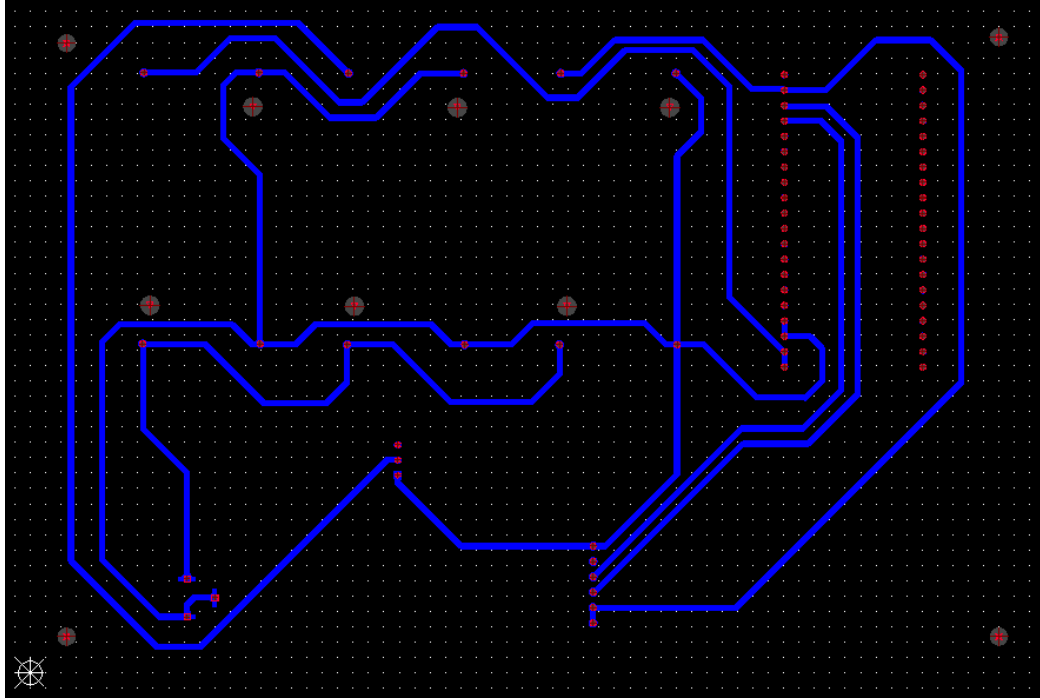


Figura 84: Layout para exportación de archivo gerber para fabricación de placa

9.1. Facciones faciales

Gracias al alto nivel de grados de libertad con el que cuenta la cabeza animatrónica es posible ubicar la posición angular de cada actuador de tal forma que reproduzca una facción o bien ejecute una serie de movimientos. Bajo este objetivo en el controlador *OpenCm9.04* se definieron matrices de configuración para posición y velocidad los cuales pueden ser establecidas a conveniencia del usuario para movilizar la cabeza y cuello de la manera deseada. Existen tres tipos de matrices, es decir, uno para cada clase de motor, ya que el protocolo con el cual se comunican difiere. Todos los paquetes de datos enviados hacia los actuadores Dynamixel requieren de la posición y velocidad de cada uno de sus dispositivos, mientras que los motores *TowerPro* únicamente necesitan de la posición angular para funcionar.

Para configurar los motores inteligentes Dynamixel es necesario modificar algunos registros dentro de su memoria RAM y EEPROM. En esta última memoria se escribieron valores para su número de identificador, es decir, un número entero desde 1 hasta 252; se definieron los baudios o bien la velocidad de comunicación; se indicaron los límites angulares; se estableció el modo de control, es decir, si debe funcionar como junta o rueda continua; y por último el torque máximo de operación.

La memoria RAM, al ser volátil o perder la información al perder tensión, almacena los valores para las ganancias del control PID, la posición deseada, velocidad de movimiento y el estado general de las variables del dispositivo. Por esta razón resulta indispensable asegurarse que el *setup* del programa se ejecute antes de que se intente correr un comando para que la cabeza animatrónica se desplace a una facción deseada.

Dada la conexión en serie tipo *Daisy Chain* que emplean los actuadores Dynamixel, se notó que es necesario darle tiempo a cada comando que se finalice sin ser interrumpido por

el siguiente; sin embargo, esto de hacerse así, resulta una problemática al poder mover los servo-motores únicamente de forma individual. Por esta razón es necesario utilizar el envío de comandos sincronizado o *syncWrite* en inglés. Esta herramienta permite enviar datos a todos los dispositivos consecutivamente sin interferir cada tarea. De forma similar, para leer la información de los actuadores es posible ejecutar un comando de lectura secuencial o bien *syncRead*. La secuencia de comandos que se deben enviar desde el controlador se detalla en los cuadros [17](#) y [18](#).

Paquete de instrucciones	Descripción
Parámetro 1	Byte de bajo orden de la dirección de inicio
Parámetro 2	Byte de alto orden de la dirección de inicio
Parámetro 3	Byte de bajo orden de la longitud del comando
Parámetro 4	Byte de alto orden de la longitud del comando
Parámetro 5	[1er dispositivo] ID
Parámetro 5 + 1	[1er dispositivo] 1er Byte
Parámetro 5 + 2	[1er dispositivo] 2do Byte
...	[1er dispositivo] ...
Parámetro 5 + X	[1er dispositivo] Byte X
Parámetro 6	[2do dispositivo] 1er Byte
...	[2do dispositivo] 2do Byte
Parámetro 6 + X	[2do dispositivo] Byte X

Cuadro 17: Secuencia de envío de datos *syncWrite*

Paquete de instrucciones	Descripción
Parámetro 1	[1er dispositivo] ID
Parámetro 2	Byte de bajo orden de la dirección de inicio
Parámetro 3	Byte de alto orden de la dirección de inicio
Parámetro 4	Byte de bajo orden de la longitud del comando
Parámetro 5	Byte de alto orden de la longitud del comando
Parámetro 6	[2do dispositivo] ID
Parámetro 7	Byte de bajo orden de la dirección de inicio
Parámetro 8	Byte de alto orden de la dirección de inicio
Parámetro 9	Byte de bajo orden de la longitud del comando
Parámetro 10	Byte de alto orden de la longitud del comando

Cuadro 18: Secuencia de lectura de datos *syncRead*

Para garantizar que en ningún momento los servos sean interrumpidos durante su trayecto y lleguen a su posición final se implementó una función que lee el estado de movimiento de cada actuador y permite seguir leyendo el programa solamente hasta que ninguno se esté moviendo. Esto ayuda de igual forma a garantizar que todos los movimientos sean controlados y no se presente una aceleración repentina al recibir un cambio de comando.

9.2. Comunicación serial

Los actuadores Dynamixel, tanto los *AX – 12A* así como los *XL – 320* cuentan con su propio lazo de conexión para comunicación serial asíncrona *Half Duplex*; sin embargo, emplean estructuras de paquete distinta, es decir, los protocolos 1.0 y 2.0. Este último cuenta con más opciones y facilidades para hacer más eficiente la comunicación. Dichas estructuras se pueden observar en los cuadros 19 y 20. Gracias a la librería incluida en el programa OpenCm9.04 se pueden utilizar comandos ya desarrollados lo cual simplifica el control de los mismos.

Por otro lado, para comunicarse con los micro-servos *TowerPro* se emplea protocolo I2C para asignar los ciclos de trabajo o *PWM* mediante el driver de Adafruit de 16 canales. Los fabricantes de esta placa de igual forma ofrecen documentación para sus comandos para facilitar el control de los actuadores.

La conexión desde el controlador OpenCm9.04 se lleva a cabo mediante comunicación UART en un puerto USB. Desde la computadora es posible enviar comandos para hacer que la cabeza se mueva a las posiciones deseadas; cada expresión fue codificada y es el valor que se debe enviar para que el controlador lo interprete y ejecute los cambios necesarios en las variables de los actuadores para llegar a la posición deseada exitosamente. Mientras los servo-motores se mueven de una posición a otras en el monitor serial se reportan sus ángulos en tiempo real. El valor decimal asignado a cada expresión se muestran en el Cuadro 21.

H1	H2	H3	Res.	ID	L1	L2	Inst.	Param.	Param.	CRC1	CRC2
0xFF	0xFF	0xFD	0x00	ID	L	H	Instr.	Param1	ParamN	L	H

Cuadro 19: Paquete de datos en Protocolo 1.0

H1	H2	Packet ID	L1	Inst.	Param.	Param.	CHKSUM
0xFF	0xFF	ID	L	Instr.	Param1	Param N	Checksum

Cuadro 20: Paquete de datos en Protocolo 2.0

Facción	Codificación
Neutral o <i>Home</i>	0
Enojo	1
Miedo	2
Felicidad	3
Tristeza	4
Sorpresa	5
Disgusto	6

Cuadro 21: Codificación de facciones en comunicación serial UART

9.3. Interfaz gráfica

Para controlar la cabeza y cuello animatrónicos desde una computadora se diseñó una interfaz gráfica mediante el Software *Processing*. Esta plataforma cuenta con un seleccionador de facciones para determinar que expresión es la que se desea enviar a la cabeza. Luego de haber seleccionado la opción deseada se debe presionar el botón *enviar* para ejecutar el comando o bien detener la comunicación entre dispositivos si se presiona el botón *stop*. En la esquina inferior derecha existe un indicador de *status* en el cual una flecha verde expresa que todo se encuentra en orden y un símbolo restrictivo rojo de que la cabeza se encuentra no disponible u ocupada. La distribución de estas opciones se puede observar en la Figura [85](#).

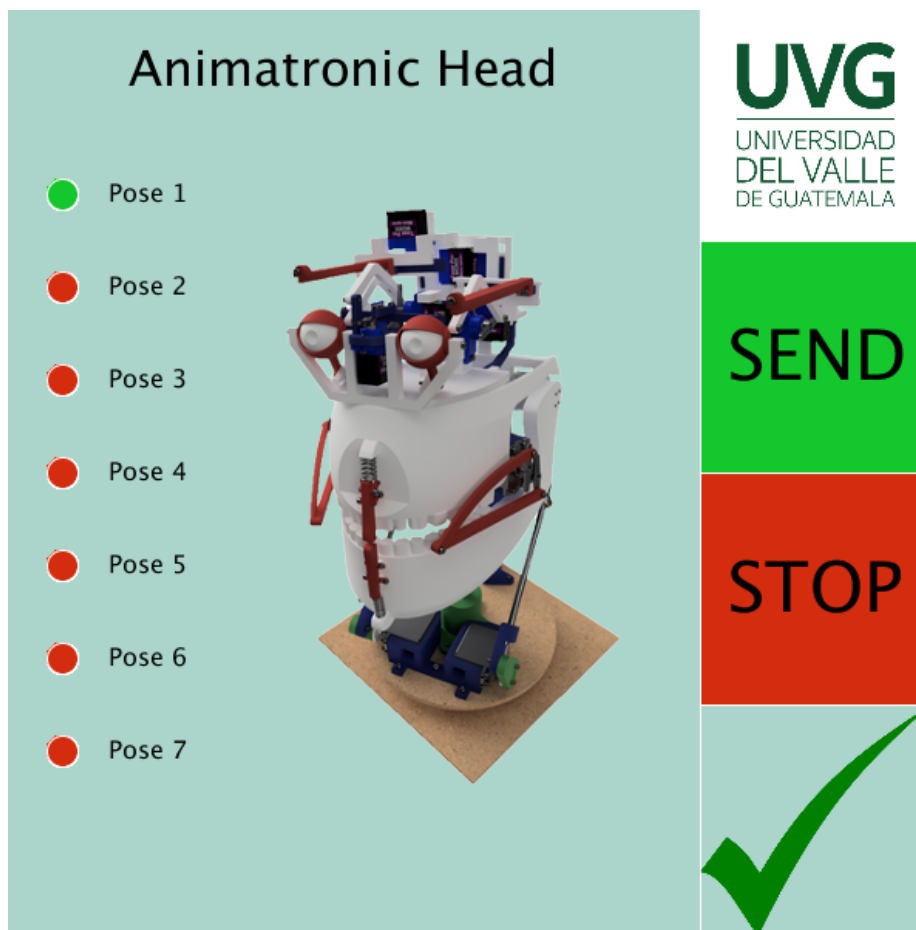


Figura 85: Interfaz gráfica elaborada en Processing

- Basándose en la anatomía humana del cuello y cabeza se crearon 18 mecanismos con 19 actuadores.
- Un análisis de frecuencias modales brindó información de utilidad para suavizar los movimientos y reducir las vibraciones en los sistemas mecánicos. La frecuencia de resonancia más baja y crítica es la de mandíbula superior con un valor de 21.43Hz.
- La colocación de refuerzos en puntos estratégicos le dieron a las piezas mecánicas mayor robustez ante oscilaciones al haber menos distancia entre pivote y centro de masa, por lo que el esfuerzo máximo se ubica en la biela de la base rotativa del cuello con 39.01 MPa.
- El control PID implementado en los actuadores *Dynamixel* es capaz de reducir considerablemente las aceleraciones al iniciar y finalizar el movimiento de cada mecanismo, brindando un parámetro de desempeño de *Overshoot* igual a cero.
- Al haber utilizado materiales con una alta resistencia a la fluencia y mayor módulo de Young en comparación a los materiales empleados en previas versiones de este proyecto, se contribuyó a que la deflexión de las piezas de la cabeza animatrónica fuera despreciables en todos los mecanismos; la deflexión máxima se ubica en el módulo de la ceja izquierda con 9.251mm.
- El *underskull* desarrollado en los módulos de los ojos, cejas y boca facilitan la posibilidad de la colocación de un cobertor látex.
- Mediante la codificación de las siete facciones de la cabeza animatrónica se logra enviar comandos desde una computadora para controlar sus movimientos. Programación de protección garantiza de que los movimientos ejecutados no serán interrumpidos provocando vibraciones, aceleraciones y oscilaciones indeseadas.
- La comunicación con los servo-motores *AX – 12A*, *XL – 320* y *TowerPro*, se realizó mediante protocolos Dynamixel 1.0, Dynamixel 2.0 e I2C, respectivamente, de forma síncrona para permitir movimientos simultáneos entre actuadores.

- El mecanismo del cuello cuenta con tres grados de libertad con tres actuadores inteligentes de alto torque, el cual permite crear movimientos similares al cuello humano.
- A través del *Software Autodesk Fusion 360* se realizó un análisis de esfuerzos *von Mises* para garantizar que, bajo el escenario menos favorecedor, las piezas no se fracturaran o que su flexión fuera despreciable y no afectará el resultado.
- Se diseñó una placa PCB de una cara en *Altium Designer* para interconectar los reductores de voltaje, controlador, actuadores y driver de servo-motores.

- Extraer la información física del robot animatrónico con captura de movimiento e implementar el controlador plasmado en el artículo *Vibration – Minimizing Motion Retargeting for Robotic Characters* [25]
- Generar curvas de movimiento predefinidas, las cuales pueden agregarse al menú elaborado en Processing.
- Desarrollar un sistema de reconocimiento facial enlazable con el robot animatrónico para replicar facciones o bien responder ante ellas
- Aprovechar el *underskull* y colocar más puntos de referencia para la colocación de una cubierta de látex
- Utilizar un algoritmo de reconocimiento facial para que este sea replicado por la cabeza animatrónica
- Introducir sensores al sistema para que el robot pueda interactuar con otras personas
- Emplear servo-motores de mayor gama como la línea *MX* de *ROBOTIS*, dado que brindan otras configuraciones útiles para el trazo de trayectorias más suaves
- Verificar el beneficio de la utilización de actuadores lineales de proveedor especializado en sustitución a los propuestos en este trabajo de graduación
- Utilizar las estrategias de fabricación de máscaras látex planteadas en *Stan Winston School* para colocárselas a la cabeza animatrónica

-
- [1] M. L. Earnest, “U.S. Patent No. 7,439,699. Washington, DC”, 2008.
 - [2] W. Schneider, “Zur Entstehungsgeschichte der Kuckucksuhr”, págs. 12-21, 1985.
 - [3] B. Földesi, “The History Of Animatronics”, 2015.
 - [4] G. Singh, “CGI: a future history of assimilation in mainstream science fiction film”, 2007.
 - [5] M. P. Head, “Walt Disney Audio-Animatronics Timeline”, 2019.
 - [6] M. E. B. Villeda, *Diseño Mecánico de Cabeza Humana Robótica Animatrónica*. 2018.
 - [7] S. Sosa, “Músculos de la Cabeza y sus Características”, 2019.
 - [8] P. G. M. Villamor, *Sistema Nervioso*. Masson-Salvat, 1994.
 - [9] J. W. Rohen, Y. Chihiro y E. Lütjen-Drecoll, *Atlas de anatomia humana*. Elsevier España, 2003.
 - [10] Y. Rubin L. R. Mishriki y G. Lee, *Anatomy of the nasolabial fold: the keystone of the smiling mechanism*. Plastic y reconstructive surgery, 1989.
 - [11] S. Tixa, *Atlas de anatomia palpatoria: Tomo 1, Cuello, tronco y extremidad superior*. Elsevier Masson, 2014.
 - [12] R. L. Norton y R. N. Salas, *Diseño de maquinaria: síntesis y análisis de máquinas y mecanismos*, TJ230. N67 2009. McGraw-Hill Interamericana, 2009.
 - [13] “Catálogo de Actuadores Lineales Eléctricos”, 2020.
 - [14] F. J. C. Nistal, *Automatismos eléctricos, neumáticos e hidráulicos*. Editorial Paraninfo, 2008.
 - [15] J. F. Veneman, R. Ekkelenkamp, R. Kruidhof, F. C. van der Helm y H. van der Kooij, “A series elastic-and bowden-cable-based actuation system for use as torque actuator in exoskeleton-type robots”, *The international journal of robotics research*, vol. 25, n.º 3, págs. 261-281, 2006.
 - [16] N. S. Nise y J. H. Romo, *Sistemas de control para ingenieria*. Patria Cultural, 2002.

- [17] K. H. Ang, G. Chong e Y. Li, “PID control system analysis, design, and technology”, *IEEE transactions on control systems technology*, vol. 13, n.º 4, págs. 559-576, 2005.
- [18] J. Murphy, F. McMullin, M. Egan y M. Brosnan, *Servomotor control systems*, US Patent 4,661,756, abr. de 1987.
- [19] ROBOTIS, *E-manual XL-320*, http://support.robotis.com/en/product/actuator/dynamixel/ax_series/dxl_ax.
- [20] N. Pinckney, “Pulse-width modulation for microcontroller servo control”, *IEEE potentials*, vol. 25, n.º 1, págs. 27-29, 2006.
- [21] P. Dudek, “FDM 3D printing technology in manufacturing composite elements”, *Archives of metallurgy and materials*, vol. 58, n.º 4, págs. 1415-1418, 2013.
- [22] E. Tyge, J. J. Pallisgaard, M. Lillethorup, N. G. Hjaltalin, M. K. Thompson y L. H. Clemmensen, “Characterizing digital light processing (DLP) 3D printed primitives”, en *Scandinavian Conference on Image Analysis*, Springer, 2015, págs. 302-313.
- [23] G. Verma, *Autodesk Fusion 360 Black Book*. BPB Publications, 2018.
- [24] R. R.-V. J.A. Rayas y A. Martínez, “Medición del módulo de Young en el hule látex usando ESPI”, *Revista Mexicana de Física*, 2003.
- [25] C. H. Lee, A. Singla e Y. Lee, “Vibration-Minimizing Motion Retargeting for Robotic Characters”, *ACM Trans. Graph*, 2019.

13.1. Planos de construcción

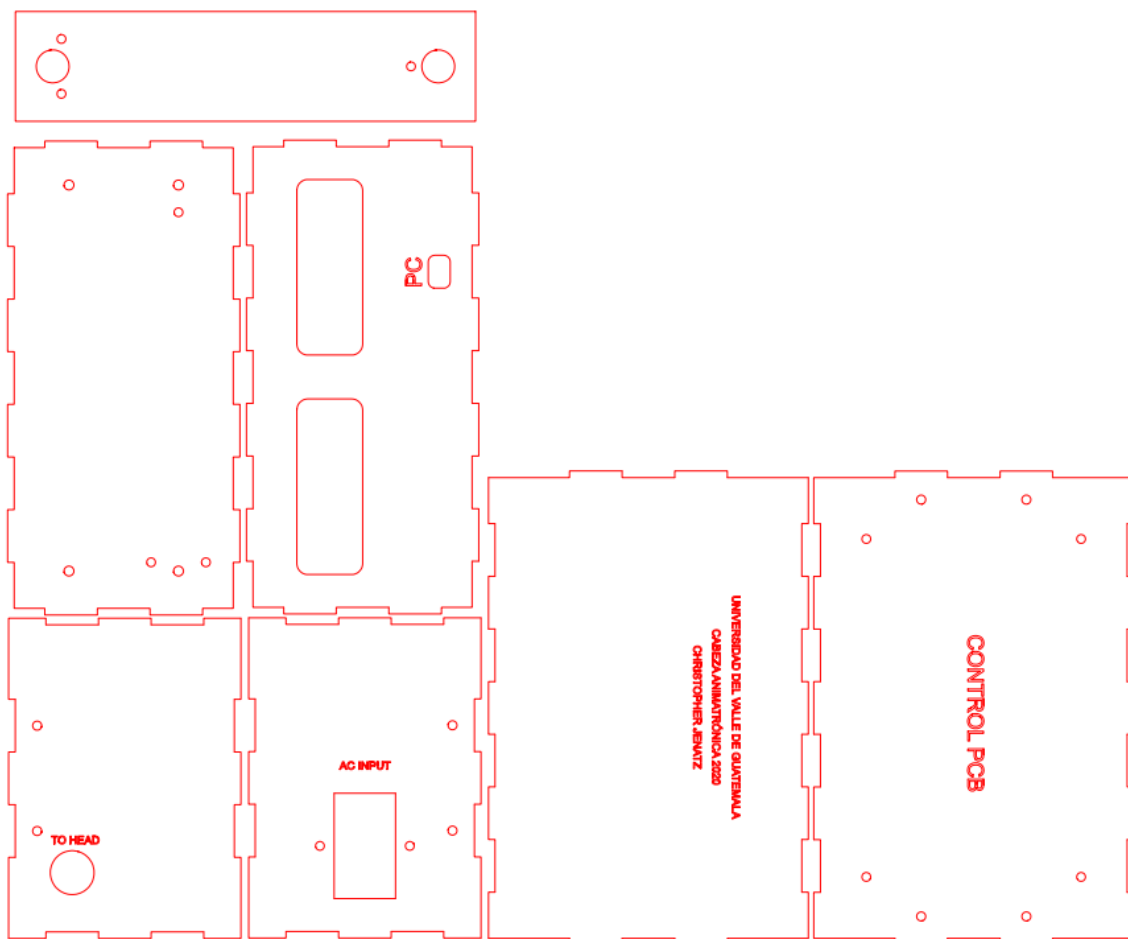


Figura 86: Plano de fabricación para corte láser de la carcasa del controlador y fuente de poder

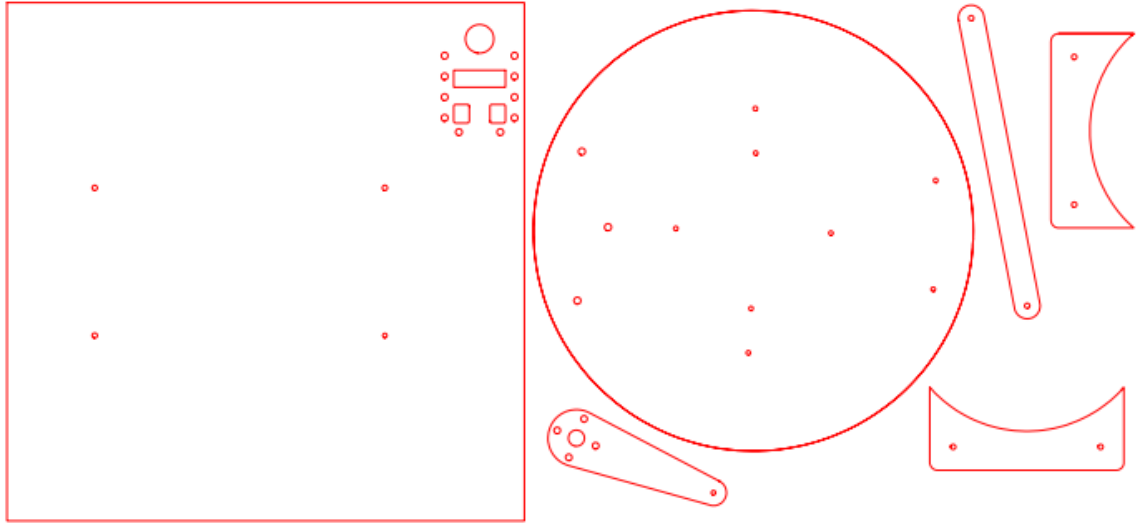


Figura 87: Plano de fabricación para corte láser de las bases rotativas y estática del cuello

13.2. Códigos de relevancia

```
// ARRAY PARA MANDAR COMANDOS SIMULTANEOS A SERVOS XL-320
word SyncPage_HOME[12]=
{
  ID_NUM_1,512,500, // ID, ANGULO, VELOCIDAD
  ID_NUM_2,512,500,
  ID_NUM_3,512,500,
  ID_NUM_4,512,500};

// CARGAR CONSTANTES PARA CONTROL PID
Dxl.writeByte(ID_NUM_1, P_GAIN, p1);
Dxl.writeByte(ID_NUM_1, I_GAIN, i1);
Dxl.writeByte(ID_NUM_1, D_GAIN, d1);

//UBICARSE EN POSICION HOME
Dxl.syncWrite(30,2,SyncPage_HOME, 12);

//ESPERAR A QUE SE ALCANCE LA POSICION FINAL DE TODOS LOS SERVOS
while (servosActivos(cantServos) != 0);

// FUNCION QUE VERIFICA EL MOVIMIENTO DE LOS SERVOS
byte servosActivos(int cantServos) {
  isMoving = 0;
  for (n = 1; n < cantServos + 1; n++){
    isMoving = isMoving + Dxl.readByte(n, MOVING);
  }
}
```

```
while (isMoving > 0){
  desplegar_valores();
  isMoving = 0;
  for (n = 1; n < cantServos + 1; n++){
    isMoving = isMoving + Dxl.readByte(n, MOVING);
  }
}
return 0;
}
```

