

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería

Departamento de Ingeniería Electrónica

Megaproyecto INNOVA

Control no convencional e implementación de un prototipo  
de una silla de ruedas eléctrica a través de la electroencefalografía

Trabajo de graduación presentado por los siguiente estudiantes Carlos Fernando Castillo Calderón, César Augusto Cuevas Guerra para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Mecatrónica; Erick Giovanni González Meléndez, Álvaro Eleázar Martínez Aceituno para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Electrónica y Marya Izquierdo Bloemen para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Industrial

Guatemala

2011



## Megaproyecto INNOVA

Control no convencional e implementación de un prototipo  
de una silla de ruedas eléctrica a través de la electroencefalografía

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería

Departamento de Ingeniería Electrónica

Megaproyecto INNOVA


Control no convencional e implementación de un prototipo  
de una silla de ruedas eléctrica a través de la electroencefalografía

Trabajo de graduación presentado por los siguiente estudiantes Carlos Fernando Castillo Calderón, César Augusto Cuevas Guerra para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Mecatrónica; Erick Giovanni González Meléndez, Álvaro Eleázar Martínez Aceituno para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Electrónica y Marya Izquierdo Bloemen para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Industrial

Guatemala


2011

Vo. Bo.:

(f)   
MSc. Carlos Esquit

Tribunal:

(f)   
Ing. Luis Fernando Reina García-Salas

(f)   
MSc. Carlos Esquit

(f)   
Ing. Estuardo Sierra

Fecha de aprobación: 24 de noviembre de 2011

## CONTENIDO

LISTA DE TABLAS .....	viii
LISTA DE FIGURAS .....	xii
RESUMEN .....	xx
I. INTRODUCCIÓN .....	1
II. OBJETIVOS .....	3
A. Objetivo general.....	3
B. Objetivos específicos .....	3
III. MARCO TEÓRICO .....	5
A. Clasificación de sillas de ruedas.....	5
B. Dimensiones físicas de distintos tipos de silla de ruedas .....	6
C. Tipos de escaleras.....	7
D. Redes neurales.....	8
E. Mecanismos.....	11
F. Comunicación inalámbrica .....	11
IV. ANTECEDENTES.....	13
V. DELIMITACIÓN E IMPACTO DEL TEMA.....	15
VI. METODOLOGÍA.....	17
A. Integración de Módulo de mecánica y de potencia .....	18
B. Integración de Módulo de mecánica y de comunicación inalámbrica. ....	19
C. Integración de Módulo de potencia y de comunicación inalámbrica. ....	20
D. Integración de Módulo cerebro-máquina y de comunicación inalámbrica.	21
VII. RESULTADOS .....	22
A. Integración Módulo de mecánica con Módulo de potencia .....	22
B. Integración de Módulo de mecánica y de comunicación inalámbrica .....	24
C. Integración de Módulo de potencia y de comunicación inalámbrica. ....	27

D. Integración de Módulo cerebro-máquina y comunicación inalámbrica. ...	29
VIII. DISCUSIÓN.....	36
IX. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	41
X. BIBLIOGRAFÍA.....	43
XI. APÉNDICE A. MÓDULO DE PLANIFICACIÓN.....	50
XII. APÉNDICE B. MÓDULO DE POTENCIA.....	102
XIII. APÉNDICE C. MÓDULO DE MECÁNICA.....	167
XIV. APÉNDICE D. MÓDULO DE COMUNICACIÓN INALÁMBRICA.....	212
XV. APÉNDICE E. MÓDULO DE INTERFAZ CEREBRO-MÁQUINA.....	261

## LISTA DE TABLAS

1.	Trama de datos implementada para comandos del prototipo de la silla de ruedas	20
2.	Actividades Módulo de Cerebro-Máquina Primer Semestre	31
3.	Diagrama de Gantt del proyecto	33
4.	Cuantificación del mercado	34
5.	Sumario de oferta de sillas de ruedas eléctricas	34
6.	Análisis CVU	34
7.	Margen de utilidad	35
8.	Parámetros del análisis financiero	35
9.	Análisis de sensibilidad según ventas	35
10.	Herramientas empleadas para la Planificación	50
11.	Actividades Módulo de cerebro-máquina primer semestre	52
12.	Actividades Módulo de comunicación primer semestre	54
13.	Actividades Módulo de mecánica primer semestre	56
14.	Actividades Módulo de potencia primer semestre	58
15.	Diagrama de Gantt del proyecto	60
16.	Distribución de género de personas con Spinal Cord Injury (SCI)	61
17.	Distribución de edad de personas SCI	62
18.	Prevalencia de casos SCI por país	63
19.	Prevalencia de paraplejía y cuadriplejía por país	64
20.	Causas de SCI por país	64
21.	Prevalencia de casos SCI de Guatemala derivada	65
22.	Prevalencia de paraplejía y cuadriplejía derivadas	65
23.	Gastos y fuente de financiamiento de cuadripléjicos	67
24.	Sillas eléctricas controladas por la rueda trasera	69
25.	Sillas eléctricas controladas por la rueda media	70
26.	Sillas eléctricas controladas por la rueda delantera	71
27.	Sumario de oferta de sillas de ruedas eléctricas	74

28.	Tarifas de publicidad en revista Closing The Gap	75
29.	Tarifas de Exhibición en la Conferencia Anual de Closing The Gap	75
30.	Materiales directos	76
31.	Mano de obra directa	77
32.	Costos fijos mensuales	78
33.	Análisis CVU	79
34.	Margen de utilidad	79
35.	Punto de equilibrio mensual años 1-5	80
36.	Punto de equilibrio mensual años 6-10	80
37.	Periodo de recuperación de inversión	81
38.	Mes del año 8 de recuperación de inversión	82
39.	Inversión Inicial	83
40.	Préstamo bancario para el financiamiento de la inversión inicial	83
41.	Estado de Resultados con ventas esperadas de 19 sillas anuales	85
42.	Estado de Flujo de Efectivo / Caja con ventas esperadas de 19 sillas anuales	86
43.	Balance general con ventas esperadas de 19 sillas anuales	87
44.	VPN con ventas esperadas de 19 sillas anuales	88
45.	TIR con ventas esperadas de 19 sillas anuales	89
46.	Análisis de sensibilidad según ventas	90
47.	Síntesis entrevista Jennifer Fernández	91
48.	Contacto con cuadripléjicos	92
49.	Síntesis de realimentación	93
50.	Comparación de características de motores BLDC versus motores BDC	107
51.	Características de las baterías compradas para el prototipo	114
52.	Especificaciones de la señal de PWM para control de servo de giro continuo	125

53.	Especificaciones de señal de PWM para control de motor DC	131
54.	Características operacionales del Sabertooth dual 12A motor driver	133
55.	Listado de registros de control	146
56.	Dimensiones perfil triangular	170
57.	Fuerzas en los apoyos con peso máximo	172
58.	Propiedades de engranaje seleccionado	175
59.	Cojinete elegido con peso máximo	176
60.	Esfuerzo de Von Mises y Factor de seguridad	178
61.	Motores seleccionados	187
62.	Torque requerido para mover el prototipo	189
63.	Especificaciones Motor SPG7955A	189
64.	Análisis estático chasis principal	191
65.	Especificaciones Motor SPT400	193
66.	Características diseño final	195
67.	Valores de offset para los ejes del sensor MMA7455	199
68.	Constantes del Control PID	204
69.	Trama de datos implementada para comandos del prototipo de la silla de ruedas	228
70.	Trama para datos convertidos en su representación de unidades de millar, centenas, decenas y unidades	230
71.	Mediciones de tiempo en salida de sensores ultrasónicos y cálculo de la diferencia en conteo para cada medición	243
72.	Mediciones de tiempo de dos sensores ultrasónicos, sin utilizar una superficie plana entre ellos	250
73.	Mediciones de tiempo de dos sensores ultrasónicos, utilizando una superficie plana entre ellos	250
74.	Baterías a considerar para el megaproyecto	258
75.	Resultados al entrenar una red neural con 16 muestras y probada con 5 muestras de cada palabra.	264

76.	Resultados al entrenar una red neural con 14 muestras y probada con 7 muestras de cada palabra	265
77.	Porcentaje de éxito en el reconocimiento de vocales	277
78.	Resultado de reconocer secuencias de parpadeos con los ojos	288

## LISTA DE FIGURAS

1.	Diagrama de bloques del Megaproyecto	2
2.	Medidas de silla de ruedas de varios tipos	6
3.	Dimensiones de una silla manual	7
4.	Detalle huella y contra huella	7
5.	Prueba de ascenso de gradas, inicio de subida	22
6.	Prueba de descenso de gradas, mitad de la secuencia de subida	23
7.	Prueba de descenso de gradas, final de secuencia de subida	23
8.	PCB de comunicación entre Módulo mecánico y Módulo de comunicación inalámbrica	24
9.	PCB de comunicación entre Módulo mecánico y Módulo de comunicación inalámbrica	24
10.	PCB en placa de sensores ultrasónicos y acelerómetro	25
11.	Posición de leds indicadores para detección de gradas y obstáculos	25
12.	Detección de grada de subida (indicador color rojo)	26
13.	Detección de obstáculo (columna) en la parte delantera. (Indicador color blanco)	26
14.	Detección de grada de bajada (Indicador color azul)	27
15.	Prototipo de la silla de ruedas con Módulo inalámbrico XBee PRO incluido	27
16.	Prueba de comunicación inalámbrica utilizando un joystick	28
17.	PCB para comunicación inalámbrica con sistema de control	28
18.	PCB en placa para comunicación inalámbrica con sistema de control	29
19.	PCB de comunicación entre Módulo interfaz cerebro-máquina y Módulo de comunicación inalámbrica	29

20.	PCB en placa para comunicación entre Módulo interfaz cerebro- máquina y Módulo de comunicación inalámbrica	30
21.	CPM Módulo de cerebro-máquina	32
22.	Diagrama de bloques del Módulo de planificación	51
23.	CPM Módulo de cerebro-máquina	53
24.	CPM Módulo de comunicación	55
25.	CPM Módulo de mecánica	57
26.	CPM Módulo de potencia	59
27.	Organigrama de la empresa	78
28.	Diagrama de bloques del módulo de potencia	103
29.	Componentes del motor mount and wheel kit	109
30.	Características de servos HS-7955TG	110
31.	Servos HS-7955TG durante el proceso de pruebas	110
32.	Organización del sistema de distribución de potencial eléctrico	114
33.	Sistema de distribución preliminar para pruebas iniciales	115
34.	Detalle de conexión de motores	116
35.	Detalle de conexión de terminales hacia motores para facilitar mantenimiento al motor	117
36.	Configuración de conexión de lm 7805	118
37.	Configuración de conexión de LM317	118
38.	Prueba de consumo de corriente del módulo de potencia	119
39.	Características de una señal de PWM	124
40.	Ecuación para parido de PWM con modulo de output compare	126
41.	Especificaciones de señal de PWM con módulo de output compare	126
42.	HB-25 Motor Controller	130
43.	Detalle de par de puentes HB-25 instalados	131
44.	Cuatro puentes HB-25 instaladas en el prototipo de la silla realizando pruebas	132
45.	Sabertoht dual 12A motor driver	133

46.	Gráfica de corriente consumida por un puente H en una rutina de movimiento de una pareja de motores DC utilizando el Sabertooth dual 12A motor	134
47.	Respuesta del controlador para motores DC Sabertooth dual 12A motor	135
48.	Diagrama de flujo para generar múltiples señales de PWM con ciclo de trabajo y periodo dinámico	141
49.	Diagrama de bloques del circuito implementado para multiplexar señales de PWM	142
50.	Diagrama de bloques para leer sensores de efecto HALL	143
51.	Sensor de posición	149
52.	Pines de conexión del sensor	150
53.	Tabla de códigos de identificación de sensores	151
54.	Comandos para el sensor de posición	151
55.	Circuito construido para realizar un canal half-duplex con los SN75176AP	152
56.	Respuesta de los sensores en el canal half-duplex utilizando buffers tri-estado	153
57.	Respuesta de sensores en el canal half-duplex utilizando transceivers SN75176B	154
58.	Aplicación de interfaz PC versión 1.0	158
59.	Simulación de la comunicación de la aplicación de interfaz PC con el módulo de potencia	159
60.	Programa de interfaz PC versión 2.0	160
61.	Programa de interfaz PC versión 2.5	160
62.	Programa de interfaz PC versión 3.0	161
63.	Diagrama esquemático del módulo de potencia	164
64.	PCB del Módulo de potencia	165
65.	PCB del Módulo de potencia	166
66.	Geometría triángulo	170

67.	Revisión de interferencia perfil simple	171
68.	Análisis de fuerza sobre los apoyos posición 1	171
69.	Análisis de trayectoria de subida	172
70.	Ángulo de giro vs. Torque requerido mínimo	174
71.	Arreglo de engranajes planetarios	175
72.	Diseño 3d estructura triangular	177
73.	Vista lateral 3D estructura triangular	177
74.	Desplazamiento pieza triangular	178
75.	Vectores de fuerza con 8 ruedas mecanum en contacto con el suelo	181
76.	Análisis de fuerza para que un vehículo gire sobre su propio eje	182
77.	Curva de motor, motor DC Parallax	187
78.	Curva de potencia mecánica, motor DC Parallax	188
79.	Curva de fuerzas, motor DC Parallax	188
80.	Motor SPG7955A acoplado a la estructura triangular	189
81.	Detalle transmisión rotación triangulo	190
82.	Detalle transmisión del engranaje solar	190
83.	Acoplamiento del motor DC Parallax con el eje de transmisión del engranaje solar	191
84.	Diseño del chasis del prototipo	192
85.	Diseño del sistema de nivel del asiento	193
86.	Verificación de interferencia diseño final	194
87.	Detalle del ensamblaje final de los motores dentro del chasis	194
88.	Imagen 3D subiendo primer escalón	195
89.	Diagrama de conexión del sensor MMA7455 y el micro controlador PIC16F887 utilizando el protocolo de comunicación I2C	199
90.	Implementación del sensor MMA7455 sobre el servo-motor, para el inicio de pruebas	200
91.	Ángulo vs. Parámetro PWM	200

92.	Ángulo vs. Fuerza g en Eje X	201
93.	Ángulo vs. Fuerza g en Eje Y	201
94.	Ángulo vs. Fuerza g en Eje Z	202
95.	Ángulo vs. PWM, comparación del ángulo deseado y el medido por el sensor	203
96.	Filtro pasa bajas	203
97.	Control PID implementado en el código del micro controlador	203
98.	Chasis principal construido	207
99.	Motor DC parallax junto con encoder desarmado	208
100.	Separadores para bloque del motor	208
101.	Módulo lateral de motores acoplados	209
102.	Instalación completa de motores	209
103.	Triángulos instalados	210
104.	Vista lateral del prototipo finalizado	210
105.	Vista frontal del prototipo finalizado	211
106.	Diagrama de bloques Módulo de comunicación inalámbrica	212
107.	Diagrama de Flujo para microcontrolador operando como maestro para uso en Hyperterminal	214
108.	Diagrama de Flujo para microcontrolador operando como esclavo	215
109.	Datos recibidos en la computadora por medio de la Hyperterminal	216
110.	Señal obtenida en el pin SDO de un módulo <i>transceiver</i> , utilizando una frecuencia de reloj (SCK) de 7.75 KHz	218
111.	Señal obtenida en el pin SDO del módulo <i>transceiver</i> en el lado del receptor, utilizando una frecuencia de reloj (SCK) de 2 MHz	218
112.	Captura de error al compilar	221
113.	Diagrama de bloques del transmisor y receptor	225
114.	Diagrama de flujo del transmisor con PIC16F887	226
115.	Diagrama de flujo de la interrupción del receptor	227

116.	Mensajes transmitidos en Hyperterminal	229
117.	Simulación de datos referente a sensores (transmitidos y recibidos)	230
118.	Paquetes de datos recibidos y perdidos para pruebas en edificio A	234
119.	Datos en hyperterminal de comunicación inalámbrica a 30 m. en línea de vista	234
120.	Datos en hyperterminal de comunicación inalámbrica a 12 m	235
121.	Diagrama de Flujo del programa principal para la medición de distancia	238
122.	Diagrama de Flujo de la interrupción para la medición de distancia.	239
123.	Pulso de entrada de 3 $\mu$ s y pulso de salida de 475.9 $\mu$ s, medido en el osciloscopio	240
124.	Ventana de la Hyperterminal mostrando un valor de 7 cm. para la medición de un pulso de ancho de 475.9 $\mu$ s	240
125.	Diagrama de flujo para detección de una grada y obstáculos	243
126.	Señales de salida de dos sensores ultrasónicos para la detección de grada y obstáculos	245
127.	Medidas (en pulg.) de una posible ubicación horizontal de los sensores ultrasónicos en el prototipo	245
128.	Prototipo de la silla de ruedas con sensores ultrasónicos	246
129.	Diagrama de Flujo para la red de sensores mejorada	249
130.	Superficie plana entre dos sensores ultrasónicos	251
131.	PCB para comunicación con Módulo interfaz cerebro-máquina	253
132.	PCB de sensores ultrasónicos y acelerómetro	253
133.	PCB para comunicación inalámbrica con sistema de control	254
134.	PCB en placa para comunicación con Módulo interfaz a cerebro-máquina	254
135.	PCB en placa de sensores ultrasónicos y acelerómetro	255

136.	PCB en placa para comunicación inalámbrica con el sistema	255
137.	Batería seleccionada para el megaproyecto	259
138.	Diagrama de Bloques del Módulo de interfaz cerebro - máquina	261
139.	Ejemplo de las distintas transformaciones aplicadas a las señales	263
140.	Señal en tiempo del lóbulo parietal realizando un parpadeo.	269
141.	Señal en tiempo del lóbulo parietal realizando dos parpadeos.	269
142.	Señal en tiempo del lóbulo parietal realizando tres parpadeos.	270
143.	Señal en tiempo del lóbulo parietal realizando cuatro parpadeos.	270
144.	Señal en tiempo del lóbulo parietal realizando cinco parpadeos	271
145.	Señal en tiempo del lóbulo parietal realizando seis parpadeos	271
146.	Señal en tiempo del lóbulo parietal realizando un parpadeo, filtrando la señal con un filtro pasa bajas con frecuencia de corte de 60 Hz	272
147.	Señal en tiempo de la vocal "a"	275
148.	Ventana de 500 muestras de la vocal "a"	275
149.	Ventana de 500 muestras de la vocal "a", aplicándole una ventana de Hamming	276
150.	Envolvente Frecuencial de las 500 muestras con ventana de Hamming de la vocal "a"	276
151.	Envolvente espectral para las distintas palabras articuladas	277
152.	Envolvente espectral de la transformada Óndula para cada palabra.	278
153.	Señal en tiempo del lóbulo parietal realizando un parpadeo	281
154.	Señal en tiempo del lóbulo parietal realizando dos parpadeos aplicando filtrado digital	282
155.	Espectro de la señal mostrada en la figura 154	283
156.	Concatenación de la señal muestreada	283
157.	Tipo de señal con la que ya se trabajó en el desarrollo del	284

sistema de procesamiento de seña222456s

158.	Envolvente frecuencial y espectro de una señal	284
159.	Concatenación de la señal correspondiente a 3 parpadeos	285
160.	Señal de salida del método reductor de orden	285
161.	Señal correspondiente 1 parpadeo	286
161.	Señal correspondiente 2 parpadeos	286
162.	Señal correspondiente 3 parpadeos	287
163.	Señal correspondiente 4 parpadeos	287
164.	Imagen de la ventana de la aplicación desarrollada	291

## **RESUMEN**

Los avances alcanzados en el reconocimiento de patrones cerebrales en investigaciones a nivel nacional como ANIMA han fomentado hacer uso de las señales obtenidas a través de la Electroencefalografía (EEG) para el control de dispositivos de diferente naturaleza. Este proyecto busca darle continuidad a esta línea de investigación en Guatemala, dándole un enfoque aplicado y desarrollando una aplicación diseñada para ser controlada por señales cerebrales.

Este proyecto diseña e implementa, específicamente, un prototipo de una silla de ruedas eléctrica y autónoma a escala con la capacidad de superar objetos utilizando un método no convencional de control a través de la Electroencefalografía (EEG). Se utilizaron redes neurales para el procesamiento de las señales inalámbricas obtenidas por medio de la EEG.

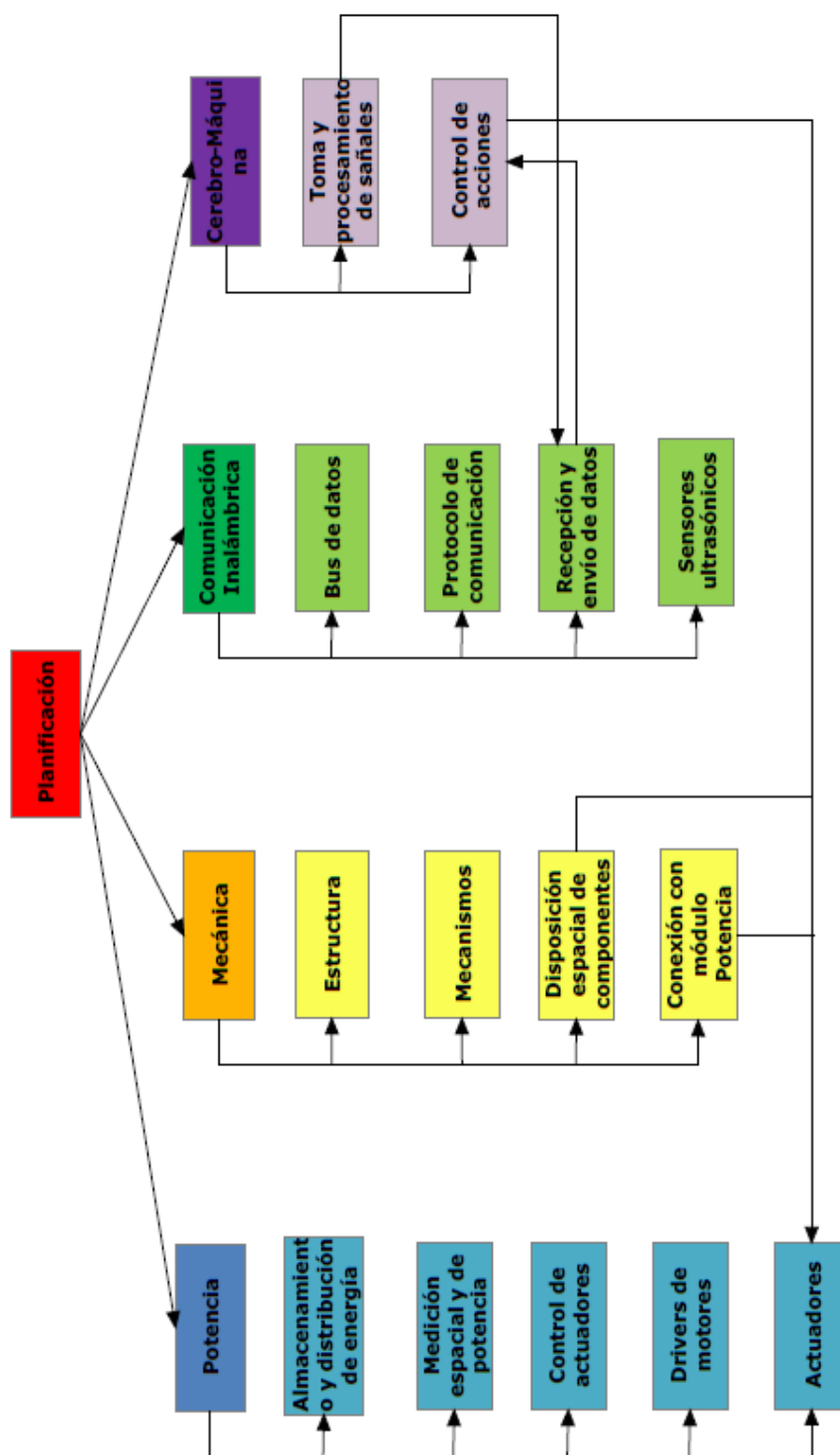
## I. INTRODUCCIÓN

El control de dispositivos con señales cerebrales utilizando electroencefalografía es un tema actual y de interés a nivel mundial para universidades y compañías relacionadas con biotecnología, aún cuando el interés por el tema no es reciente. En la última década se han obtenido resultados importantes en el reconocimiento de patrones cerebrales en investigaciones a nivel mundial y nacional. Los avances alcanzados en investigaciones a nivel mundial han permitido el uso de las señales obtenidas del EEG para el control de dispositivos de diferente naturaleza. En el ámbito nacional no se ha desarrollado una aplicación diseñada para ser controlada por señales obtenidas de EEG.

Por esta razón este proyecto espera darle continuidad a la investigación relacionada con EEG, dándole un enfoque aplicado y ampliando la cantidad de tópicos disponibles para realizar investigación en Guatemala.

Este proyecto buscó desarrollar un prototipo de silla de ruedas eléctrica y autónoma con la capacidad de sortear objetos utilizando una forma no convencional de control a través de la Electroencefalografía. El proyecto consta de cinco módulos para su eficiente implementación: Potencia, Mecánica, Comunicación, Cerebro-Máquina y Planificación (ver Figura No. 1). El módulo de Planificación se encargó de diseñar e implementar una metodología de trabajo para la gestión de los recursos humanos, materiales y financieros. Además de realizar un análisis de factibilidad del proyecto que incluye el Estudio de Mercado, el Análisis Técnico y el Análisis Financiero.

Figura 1. Diagrama de bloques del Megaproyecto



## II. OBJETIVOS

### A. Objetivo general

1. Diseñar e implementar el prototipo a escala de una silla de ruedas, que tenga capacidad de superar obstáculos y que posea un sistema de control no convencional basado en ondas cerebrales.

### B. Objetivos específicos

#### 1. Módulo de mecánica

- a. Diseñar e implementar un mecanismo y una estructura que permita que una silla pueda subir y bajar escalones de forma controlada y autónoma.

#### 2. Módulo de potencia

- a. Diseñar e implementar un controlador principal de actuadores y potencia el cual establezca, mediante un sistema de lazo cerrado, las condiciones de trabajo de los motores instalados en el prototipo de la silla de ruedas.

#### 3. Módulo de comunicación inalámbrica

- a. Diseñar e implementar un protocolo de comunicación inalámbrica que permita al usuario el envío de información al sistema de control del prototipo de la silla de ruedas a través de una computadora, así como también, realizar mediciones de sensores ultrasónicos de distancia para detectar distintos objetos.

#### 4. Módulo de interfaz cerebro-máquina

- a. Desarrollar un método de control no convencional basado en la adquisición de señales cerebrales y en el reconocimiento de los patrones que presenten las mismas.

#### 5. Módulo de planificación

- a. Diseñar e implementar una metodología de trabajo para llevar a cabo de una forma efectiva y eficiente, el manejo del tiempo y los recursos humanos, materiales y financieros.

### III. MARCO TEÓRICO

#### A. Clasificación de sillas de ruedas

- Tipo convencional: Este tipo de silla de ruedas es la más común en el mercado y económica, es la más conocida por la mayoría. Básicamente el usuario utiliza sus manos para impulsar las ruedas laterales de mayor diámetro. Existen varias variaciones de la misma, en donde en algunas se reduce el peso con materiales más livianos, otras son plegables para hacerlas más compactas en su transporte. Por último existen de distintos tamaños para ajustarse a las necesidades de cada usuario. [69]
- Triciclos: Este tipo de silla está compuesta por tres ruedas en donde por medio de una cadena se conecta una de las ruedas, comúnmente, la delantera a unos pedales para ser impulsados por las manos del usuario. La rueda delantera además controla la dirección de la silla y las dos restantes están libres en su rodamiento. Este tipo de sillas le permite al usuario una mayor libertad y existen variantes para carreras y para actividades de Cross country. Una de las ventajas de esta silla es que ayuda al usuario a desarrollar un excelente ejercicio para la parte superior del torso. [69]
- Motorizadas en dos ruedas: En situaciones en donde el usuario no puede utilizar sus brazos, posee problemas de peso, o simplemente desea mayor comodidad, existen varios tipos de sillas motorizadas. Este tipo de sillas normalmente poseen dos pares de ruedas motorizadas, el resto en rodamiento libre. Existen tres configuraciones, dependiendo que par de ruedas sean motorizadas, la primera en las ruedas traseras, la segunda en las ruedas frontales, y la tercera con las ruedas de centrales. Por otro lado el alcance de este tipo de sillas está










condicionado por la duración de sus baterías aunque en los últimos años las baterías han ido evolucionando dando tiempos de operación más largos. [69]

- Silla de ruedas con función de posición vertical del usuario: Este tipo de sillas es similar a las motorizadas, con la función extra que mediante un mecanismo automatizado el usuario puede posicionarse en posición vertical. [69]
- Silla de tipo todo terreno: En este caso particular el tipo de diseños varía considerablemente desde el tamaño hasta el sistema de movilización. Existen diseños con cuatro ruedas motorizadas cada una y con diámetros considerablemente grandes. En otros diseños se utilizan más de cuatro ruedas o inclusive orugas similares a las en que emplean los tanques o tractores de construcción. [69]

## B. Dimensiones físicas de distintos tipos de silla de ruedas

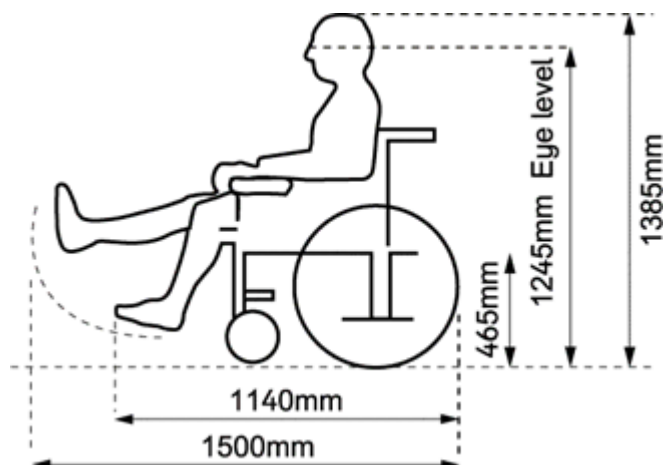
En la Figura 2 se muestran tres de los tipos más comunes de sillas utilizadas junto con sus dimensiones de ancho y largo. [68]

Figura 2. Medidas de silla de ruedas de varios tipos. [68]

Manual		Powered		Scooters	
					
750 mm	1200 mm	750 mm	1500 mm	750 mm	1750 mm
					

En la Figura 3 se muestra la altura y largo máximo que tiene una silla de ruedas manual con el usuario sentado en ella. Es importante notar que en la longitud se toma en consideración la distancia necesaria para que el usuario pueda estirar sus extremidades inferiores. [14]

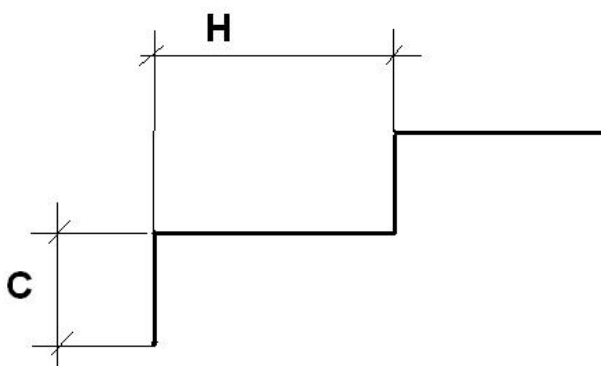
Figura 3. Dimensiones de una silla manual [14]



### C. Tipos de escaleras

Una escalera se compone de un número determinado de peldaños y descanso. Un peldaño está conformado por la huella y contra huella, comúnmente se da la dimensión de un peldaño en la forma (C) x (H). Ver Figura 4. [72]

Figura 4. Detalle huella y contra huella [72]



En la construcción de edificaciones existen muchos estilos arquitectónicos para cada tipo de grada, sin embargo existen tres tipos básicos de gradas, rectas, curvas y compensadas. [72]

- Escaleras rectas: Es un conjunto de tramos rectos y continuos. Existen de tipo sencillo, con un solo tramo y sin descanso, otras combinan varios tramos rectos con descanso para cambiar de dirección. [72]
- Escaleras curvas: Este tipo de escalera permite tener trayectorias circulares y elípticas. En esta categoría entran las de tipo caracol que su trayectoria sigue la de un círculo, y comúnmente son angostas y resultan incómodas, en el trayecto de descenso, para el usuario. [72]
- Escaleras compensadas: Este tipo de gradas combina la dos anteriores en donde el objetivo principal es evitar cambios bruscos en los giros combinando tramos rectos y curvos. [72]

#### D. Redes neurales

Después de una investigación previa, para el desarrollar el control no tradicional del proyecto, se han logrado determinar las siguientes aseveraciones, que justifican el aprendizaje del trabajo de una red neural para llevar a cabo la tarea de reconocimiento de patrones. [57]

Se ha logrado comprender que las redes neurales, más allá de una forma de procesamiento de señales, son un paradigma computacional que permite encontrar una solución viable a problemas que no necesariamente necesitan un mapeo lineal. Además, se entendió que su efectividad y desempeño no se

basan en la estructura que las compone, sino en el algoritmo utilizado para enseñarles. [57]

Las redes neurales se componen de elementos que procesan señales llamados neuronas, que simulan el comportamiento de las neuronas animales. Cada neurona posee varias entradas y una única salida que es “activada” (adquiere un valor en su salida) cuando se da la combinación correcta de valores en sus entradas. [57]

El valor de la salida depende de una función que usualmente es una combinación lineal de las entradas, que mapea las mismas a un valor real, y luego una función de esta combinación lineal, llamada la función de activación, que usualmente es una función hiperbólica. [57]

Se comprendió que dependiendo del tipo de reconocimiento de patrones que se desee realizar, variará la estrategia de enseñanza a la red neural, así como la topología de la misma, es decir, la forma en cómo se interconectan sus componentes. [57]

Las redes neurales se componen de elementos llamados neuronas, que tienen entradas, salidas, valores numéricos asociados a las entradas que permiten calcular una combinación lineal de las mismas, así como una función de activación que depende de la ya mencionada combinación lineal. Los coeficientes asociados a las entradas reciben el nombre de pesos. [57]

Los algoritmos de aprendizaje pueden ser supervisados y no supervisados. En ambos tipos de aprendizaje, los vectores de pesos se inicializan aleatoriamente. [57]

Los algoritmos supervisados, van comparando la salida experimental de la red neural, contra la salida esperada, y en base a una función error definida, se toma la decisión de si se cambia el vector de pesos o no. [57]

El aprendizaje no supervisado se utiliza cuando el usuario no sabe de que forma clasificará la información de entrada a la red, y desea que la misma genere las categorías. [57]

La separación lineal entre dos conjuntos se da cuando la combinación lineal de los elementos de un conjunto está por debajo de un valor predeterminado, y la combinación lineal de los elementos de otro conjunto se encuentra por encima del mismo valor determinado. Los coeficientes de ambas combinaciones lineales deben ser los mismos. En el caso del aprendizaje con perceptrones, estos valores son los pesos del perceptrón. [57]

El concepto de separación lineal es condición suficiente y necesaria para que un algoritmo de aprendizaje converja a una solución óptima cuando se utiliza el modelo del perceptrón. [57]

El aprendizaje competitivo no supervisado se utiliza cuando se sabe que las entradas están categorizadas, pero no se sabe cómo se deben categorizar. Para esto se utilizan varios perceptrones, y el que se vaya adaptando mejor a cada grupo de entradas, decidirá qué salida se obtiene, y le “ganará” a sus demás competidores. En otras palabras, el que se encuentre más apto con el tiempo, ganará la representación de un grupo de entradas. [57]

Según investigación encontrada en [57], una forma viable de obtener las señales de interés del cerebro es ir tomando ventanas de información, es decir, que el usuario de alguna forma indica cuando se empiezan a tomar datos, y esta adquisición se realiza en un período de tiempo determinado, en vez de estar haciendo adquisición de datos constantemente. En este trabajo de

graduación alemán, también se encontró como una conclusión que las áreas apropiadas del cerebro de donde se pueden obtener las señales del lenguaje son el homúnculo, y las áreas de Broca y Wernicke. [57]

#### E. Mecanismos

Para implementar la silla de ruedas, se trabajó con un mecanismo que está inspirado en diversos robots en donde utilizan el denominado “Three Wheel system” en donde tres llantas están separadas por un ángulo de 120 grados. Además cada una de la llantas posee tracción en las mismas. Lo interesante de este mecanismo es que reduce la complejidad en el sistema de control, ya que aprovecha la inercia de la silla. Al topar una llanta con un obstáculo más alto que el radio de la misma, esto hace que el mecanismo se fije y haga un movimiento de “brazo” colocando la siguiente rueda en el siguiente escalón. Esto hace que para subir utilice poco control electrónico haciéndolo mucho más costoso y de gran mantenimiento. El descenso es aún más fácil ya que el mecanismo se va adaptando a la forma de la grada y baja suavemente. [22]

#### F. Comunicación inalámbrica

Entre los tipos de comunicación inalámbrica más utilizados a nivel mundial se encuentran las tecnologías Wi-Fi y Bluetooth. Sin embargo, para aplicaciones en la rama de la domótica existen diversos protocolos de comunicación que son empleados, entre ellos el estándar IEEE 802.15.4. [52]

Éste constituye un protocolo que fue desarrollado para aplicaciones que requieren comunicaciones seguras de bajo consumo de energía, bajo costo y baja tasa de transmisión de datos. [52]

Normal 0 21 false false false ES-GT X-NONE X-NONE Este estándar se enfoca principalmente en el desarrollo de estándares para redes tipo PAN (Personal Area Network) o redes inalámbricas de corta distancia. De esta forma, permite que dispositivos inalámbricos como teléfonos, sensores, computadoras, entre otros, puedan comunicarse e interoperar uno con el otro.

[52]

#### IV. ANTECEDENTES

En el país, ya existe un precedente de un trabajo similar de lo que el módulo de adquisición y procesamiento de señales pretende lograr, y esto es lo desarrollado por el megaproyecto de 2009 la Universidad del Valle: ANIMA [43], específicamente el módulo desarrollado por Luis Fernando Reina. Este módulo identificó por medio de la frecuencia de las ondas cerebrales, si un individuo se encuentra en estado de reposo o no. Entonces, si se concentra durante un tiempo determinado, el paciente puede ejecutar un comando deseado.

Después de que en la Universidad del Valle de Guatemala se comenzó a incursionar en el área de investigación de ondas cerebrales. Donde el **“Métodos no convencionales de interfaz en el control de robots a través de la electroencefalografía y la electrooculografía. Megaproyecto ANIMA.”** deja un precedente en esta área, donde se crea una nueva línea de investigación en la Universidad del Valle de Guatemala.

Partiendo de la nueva línea de investigación propuesta, nace la idea de llevar este tipo de investigación y hacerlo funcionar sobre dispositivo. Con lo cual se busca implementar un sistema de control no tradicional, como lo planteaba originalmente ANIMA. Además, se planteó también utilizar este método para manejar una silla de ruedas.

El módulo de control no tradicional de la silla de ruedas, está respaldado por los resultados previos de **“Métodos no convencionales de interfaz en el control de robots a través de la electroencefalografía y la electrooculografía. Megaproyecto ANIMA.”** y el éxito de este proyecto. En cuanto a la silla de ruedas el desarrollo de tecnología de apoyo para discapacitados se tiene el proyecto de **“Prótesis Biónica de una Mano**

***Humana***” [5] donde se desarrolla de manera progresiva una prótesis para una persona.

El megaproyecto busca desarrollar el prototipo de un dispositivo de apoyo para discapacitados de otro tipo, donde se pretende establecer un proceso de desarrollo secuencial para este elemento.

## V. DELIMITACIÓN E IMPACTO DEL TEMA

Como megaproyecto se diseñó y construyó un prototipo de una silla de ruedas eléctrica capaz de subir y bajar gradas, y sortear obstáculos, controlada por señales cerebrales relacionadas al lenguaje.

Este documento consolidado no pretende mostrar los detalles del diseño y la implementación de cada uno de los módulos. Únicamente se describe el diseño, implementación y resultados generales de los módulos unificados. Para conocer los detalles de cada uno de los módulos: mecánica, potencia, comunicación inalámbrica, interfaz cerebro-máquina y planificación, hacer referencia a las tesis individuales [22, 20, 6, 28, 47].

Se construye un diseño para una silla de ruedas (65 cm de largo, 37 cm de ancho y 75 cm de alto) y con un tamaño de gradas (9.50 cm de huella y 12 cm de contrahuella) teniendo un factor de escala de 2:1 por ser un prototipo. En relación al peso se determinó un peso máximo de 50 lb para el prototipo en general.

El Módulo de planificación desarrolló principalmente como tema de investigación el Estudio de Mercado, el Análisis Técnico y Análisis Financiero, consolidando el Análisis de Factibilidad que se presentó básicamente como un Análisis de Sensibilidad donde se definió en qué punto la producción y venta de sillas de ruedas eléctricas controladas por Electroencefalografía se convierte en una alternativa rentable para ser un negocio con valor económico.

El proyecto parte de la ambición de ser novedoso y busca dar un producto terminado que pueda llegar a tener una utilidad significativa, para un grupo de personas marginado. Se plantea como un proyecto de graduación, donde las propuestas busquen resolver problemas cotidianos para una persona que ve limitada su motricidad.

Dentro de los caminos que debe tomar una nación para desarrollarse económicamente, está el sendero de la investigación y desarrollo de nuevas tecnologías. Como estudiantes en el proceso para optar a un pregrado, nos vemos en la oportunidad de ayudar en el proceso de innovación tecnológica.

En el ámbito de ciencia e investigación, el proyecto es un aporte para la continuación de la investigación de la Electroencefalografía (EEG) aplicada en Guatemala, permitiendo la expansión del conocimiento en la aplicación de los métodos de control no convencionales en Guatemala. Esto propone mejorar la condición de los discapacitados que utilizan sillas de ruedas en Guatemala.

El desarrollo del diseño y construcción de esta silla impulsará el desarrollo de esta tecnología en Guatemala, atacando los prejuicios hacia la tecnología nacional y mejorando su perspectiva y financiamiento.

## VI. METODOLOGÍA

Los módulos del megaproyecto se desarrollaron inicialmente de manera independiente, y el diseño del mismo contempló la integración futura de los módulos. Cuando cada módulo se desarrolló al punto que permitiese su integración con otros módulos; se inició la etapa de integración de manera tal que la interacción de los sistemas se diera de manera progresiva. El orden en que esta secuencia se llevó a cabo se encuentra a continuación y se presentan en el siguiente orden:

- A. Integración Módulo de mecánica con Módulo de potencia
- B. Integración de Módulo de mecánica y de comunicación inalámbrica
- C. Integración de Módulo de potencia con Módulo comunicación inalámbrica
- D. Integración de Módulo de interfaz cerebro-máquina con Módulo de comunicación inalámbrica

Para mayor información sobre el desarrollo de cada módulo en específico consultar los reportes individuales [22, 20, 6, 28, 47].

## A. Integración de Módulo de mecánica y de potencia

Con la estructura finalizada, junto con la instalación completada de todos los actuadores a utilizar por el prototipo [22], se inició la implementación de los componentes de control de potencia diseñados, [20].

1. La primera etapa fue instalar todos los cables de alimentación separando los elementos de potencia y los de instrumentación. En lo referente a la conexión de los motores DC, se optó por mantener el concepto modular, y se tomó la decisión de utilizar terminales de conexión, y así facilitar su desmontaje para mantenimiento. Las conexiones se realizaron utilizando rieles de borneras, de donde se distribuye la potencia para todos los elementos que necesiten un potencial eléctrico.

2. La segunda etapa fue la implementación de una caja de registro para la distribución de potencial eléctrico, en donde se instalaron los rieles con borneras, así como fusibles de protección y un interruptor de encendido general del sistema de alimentación del prototipo.

3. La tercera etapa fue la adecuación de voltajes necesarios para los elementos que lo necesitaran, todos los elementos de control utilizaron reguladores de voltaje de 5V y la utilización de reguladores de 6V para alimentar los cuatro servomotores.

4. Con todo el sistema de alimentación ya instalado, la siguiente etapa fue realizar pruebas de movimiento de todos los actuadores sin carga, para verificar, que los comandos de control correspondían con el comportamiento de los actuadores; además se verifica que no existieran interferencias o agarrotamientos indeseados entre las distintas partes mecánicas.

5. Finalmente la última parte fue la prueba del movimiento de los actuadores en el ambiente de operación. Utilizando la interfaz de prueba PC del módulo de potencia [20], se le implementó el código necesario para utilizar un joystick. Esto permitió facilitar el manejo del prototipo y realizar las primeras pruebas de movimiento, incluidas las de ascenso y descenso de gradas.

#### B. Integración de Módulo de mecánica y de comunicación inalámbrica.

Entre las contribuciones del módulo mecánico, está el sistema de nivelación del asiento del usuario para garantizar su seguridad y comodidad durante la secuencia de ascenso y descenso. Obviamente en el prototipo diseñado el asiento no está destinado para soportar a un individuo, sino más bien como el concepto funcional del sistema de control.

1. La primera etapa consistió en diseñar la placa final, en donde se incorporaría el hardware necesario para el control del asiento, al sistema de instrumentación implementado por el módulo de comunicación.

2. La segunda etapa fue la adición del código utilizado para el control de nivelación del asiento dentro de la programación del microcontrolador, encargado de la instrumentación en el prototipo. Esto se realizó para optimizar recursos de hardware y evitar el uso innecesario de otro microcontrolador.

3. La tercera etapa fue la calibración del sistema de control del servo, encargado de la nivelación, considerando el cambio del oscilador interno y el ajuste correcto del PWM.

4. La cuarta parte consistió en la instalación adecuada de los sensores ultrasónicos dentro del chasis principal, considerando el tamaño de gradas a detectar [22].

5. La quinta y última etapa, consistió en realizar pruebas de detección de gradas de subida y de bajada, así como también de varios tipos de obstáculos, para garantizar un funcionamiento adecuado del sistema.

### C. Integración de Módulo de potencia y de comunicación inalámbrica.

1. Como primera fase de integración, se estableció una comunicación inalámbrica entre la computadora y el sistema de control, conectando uno de los módulos XBee PRO [11] a la misma, utilizando un programa de interfaz PC operado con joystick [referencia a Tesis Módulo de potencia]; el otro dispositivo inalámbrico se incluyó al Módulo de potencia, el cual hace trabajar a los actuadores para realizar el movimiento del prototipo de la silla de ruedas.

2. La segunda etapa consistió en añadir un microcontrolador dsPIC30F4011 entre ambos módulos, con el objetivo de utilizar el protocolo de comunicación inalámbrica para tener una comunicación más confiable, de tal forma que en el receptor se verifique la validez de la instrucción o comando, y de serlo, que se transmita al sistema de control para que sea interpretado.

3. Se implementó la utilización de una trama en el envío de datos desde la computadora, para asegurar que los comandos que se estén transmitiendo, sean recibidos de forma correcta. Dicha trama consta de un encabezado (3 bytes), los datos a transmitir (1 byte) y un fin de trama (1 byte). La trama se puede observar en la Tabla 1.

Tabla 1. Trama de datos implementada para comandos del prototipo de la silla de ruedas

<b>Encabezado</b>	<b>*#*</b>
<b>Datos</b>	<b>DATA</b>
<b>Fin de trama</b>	<b>\$</b>

4. En la tercera fase se utilizó el mismo microcontrolador descrito en la etapa anterior para enviar ciertos datos a la computadora, que representan información acerca del consumo de corriente de los circuitos incluidos en el prototipo, así como también datos proporcionados por un acelerómetro [20] para calcular el ángulo de inclinación de la silla.

#### D. Integración de Módulo cerebro-máquina y de comunicación inalámbrica.

1. La primera etapa de integración de ambos módulos consistió en realizar las conexiones necesarias para enviar datos provenientes de circuitos con etapas de filtración y amplificación hacia la computadora [43].

2. Debido a que los circuitos impresos del Open EEG Project utilizados en el Megaproyecto ANIMA poseen una salida en estándar RS-232, se utilizó un circuito con MAX232 para convertir los voltajes de las señales a niveles TTL (0V y 5V) y poder transmitir estas señales a través del dispositivo XBee PRO.

3. En la tercera etapa se diseñó y construyó el PCB del circuito descrito en el paso 2 para interfazar ambos módulos y de esta forma realizar pruebas de envío y recepción de datos.

4. Por último, se instalaron los controladores USB correspondientes a los módulos XBee PRO en la computadora, para poder utilizarlos como puertos seriales (COM) de la misma.

## VII. RESULTADOS

### A. Integración Módulo de mecánica con Módulo de potencia

Figura 5. Prueba de ascenso de gradas, inicio de subida



En la Figura 5 es posible observar el inicio de la secuencia de subida, en donde el mecanismo empieza a subir el primer escalón. También es visible observar como la rueda sobre el primer escalón está haciendo contacto, para así poder impulsar al prototipo hacia arriba, y lograr subir la grada.

Figura 6. Prueba de descenso de gradas, mitad de la secuencia de subida



En la Figura 6 se aprecia que no existe interferencia al momento de subir las gradas. En la Figura 7 se muestra como el prototipo logró ubicarse sobre el siguiente escalón.

Figura 7. Prueba de descenso de gradas, final de secuencia de subida



## B. Integración de Módulo de mecánica y de comunicación inalámbrica

Figura 8. PCB de comunicación entre Módulo mecánico y Módulo de comunicación inalámbrica

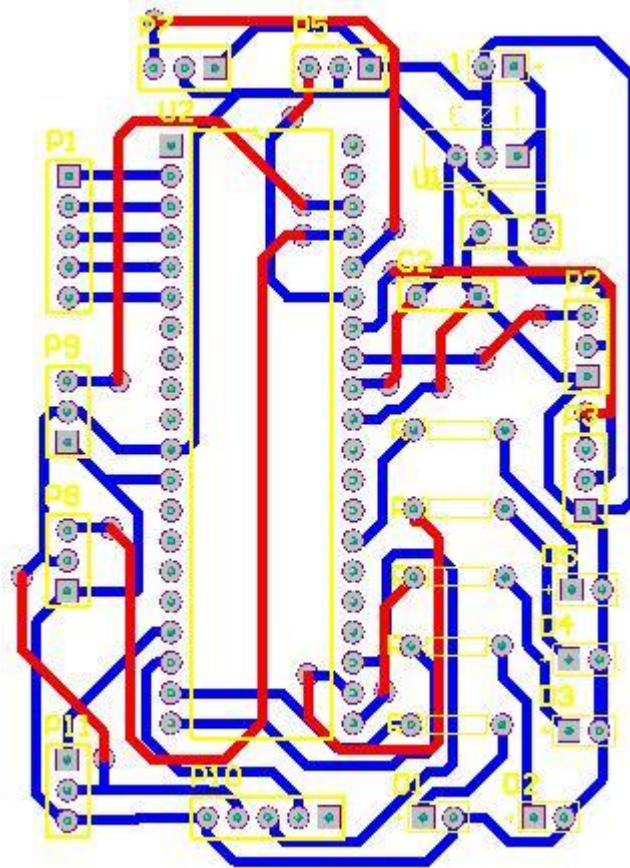


Figura 9. PCB de comunicación entre Módulo mecánico y Módulo de comunicación inalámbrica

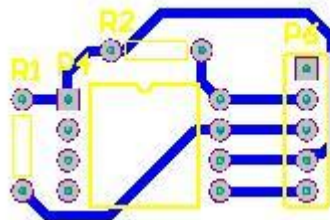
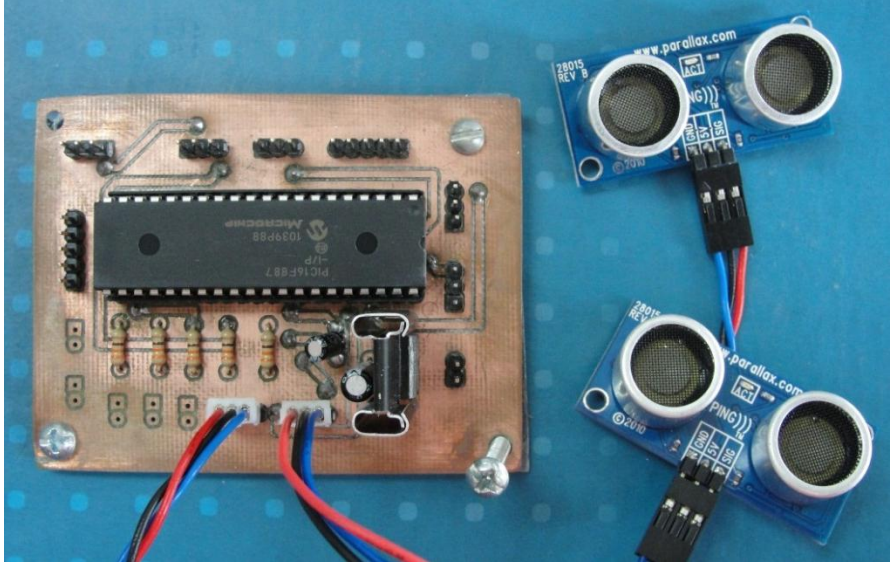
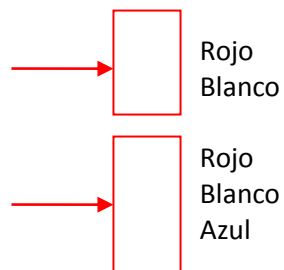


Figura 10. PCB en placa de sensores ultrasónicos y acelerómetro



En el prototipo de la silla de ruedas se colocaron 5 leds: dos de ellos (color rojo) indican la detección de una grada de subida, ya sea en la parte delantera o trasera. Otros dos leds (color blanco) indican la detección de un obstáculo, de igual forma, en la parte frontal o posterior; y por último, un led (color azul) indica la detección de una grada de bajada. En la Figura 11, se muestran los cinco leds y su correspondiente asignación de detección.

Figura 11. Posición de leds indicadores para detección de gradas y obstáculos



En las Figuras 12, 13 y 14 se muestran tres de los casos que pueden ocurrir para detección de gradas y obstáculos.

Figura 12. Detección de grada de subida (indicador color rojo)



Figura 13. Detección de obstáculo (columna) en la parte delantera. (Indicador color blanco)

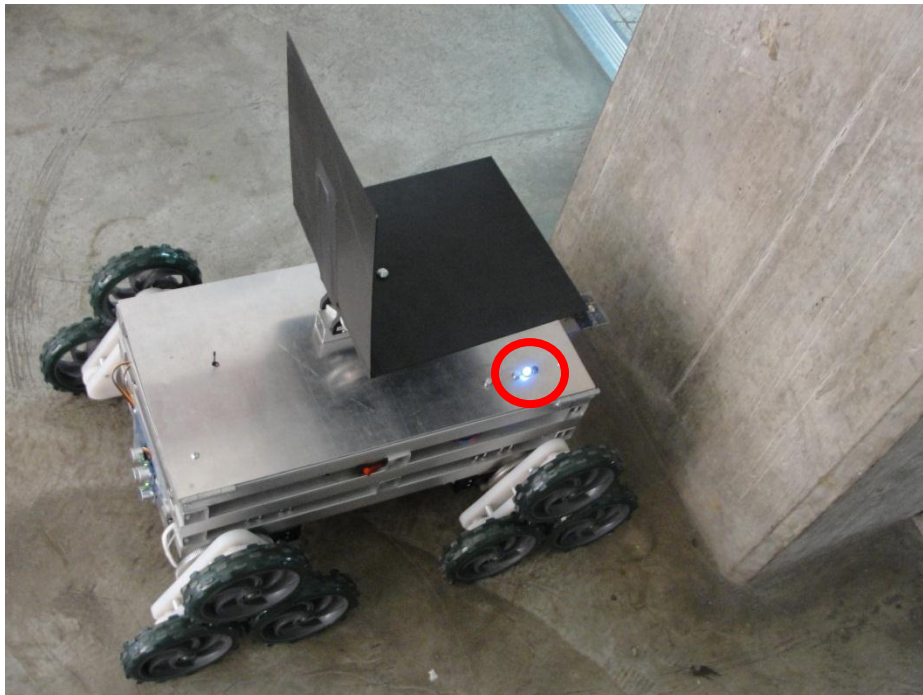
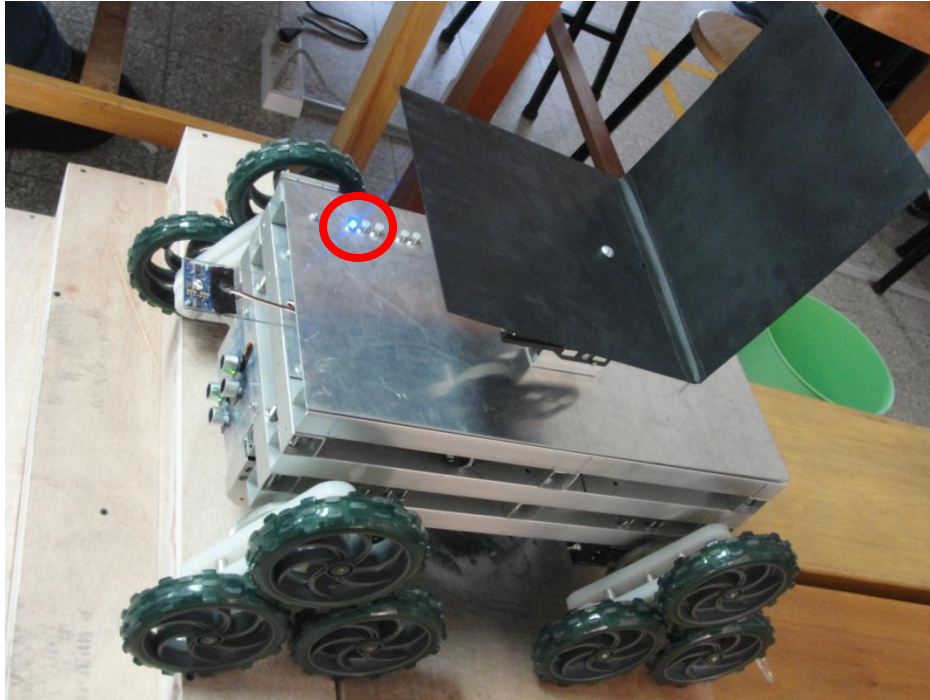


Figura 14. Detección de grada de bajada (Indicador color azul)



C. Integración de Módulo de potencia y de comunicación inalámbrica.

Figura 15. Prototipo de la silla de ruedas con Módulo inalámbrico XBee PRO incluido

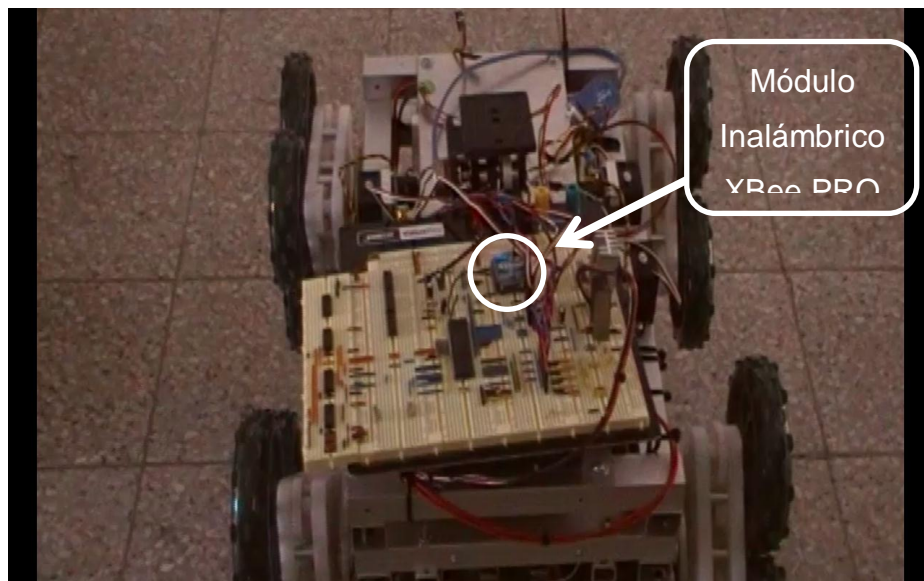


Figura 16. Prueba de comunicación inalámbrica utilizando un joystick



Figura 17. PCB para comunicación inalámbrica con sistema de control

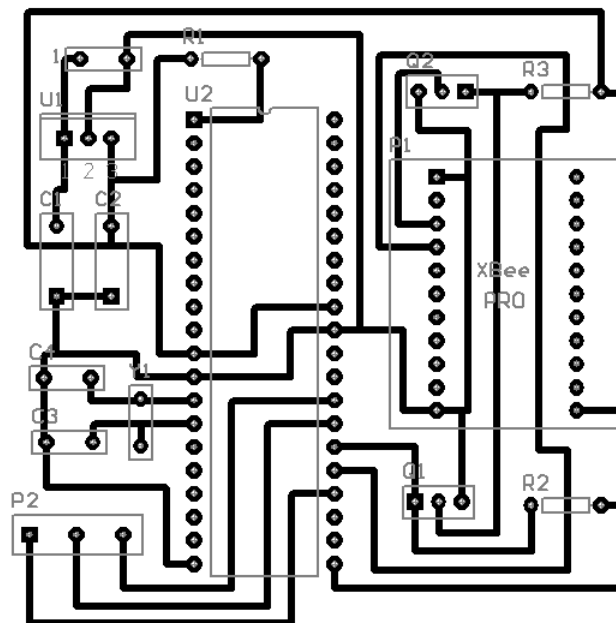
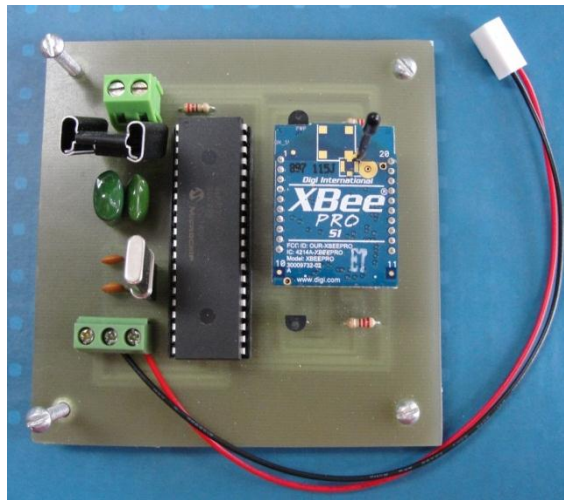


Figura 18. PCB en placa para comunicación inalámbrica con sistema de control



D. Integración de Módulo cerebro-máquina y comunicación inalámbrica.

Figura 19. PCB de comunicación entre Módulo interfaz cerebro-máquina y Módulo de comunicación inalámbrica

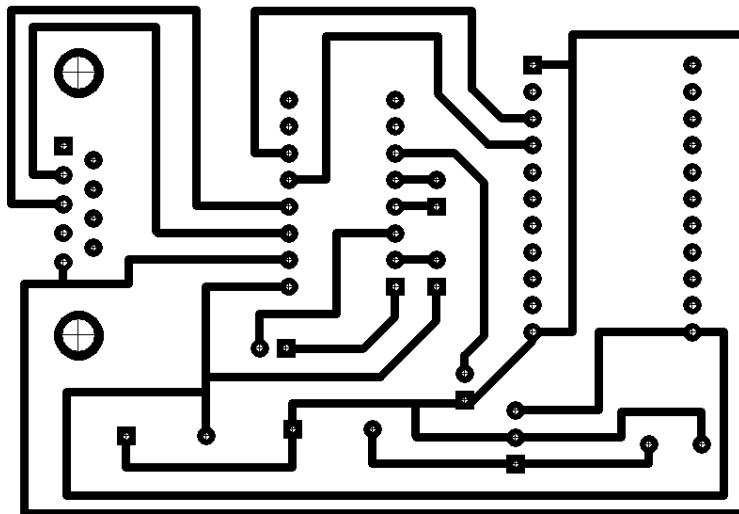
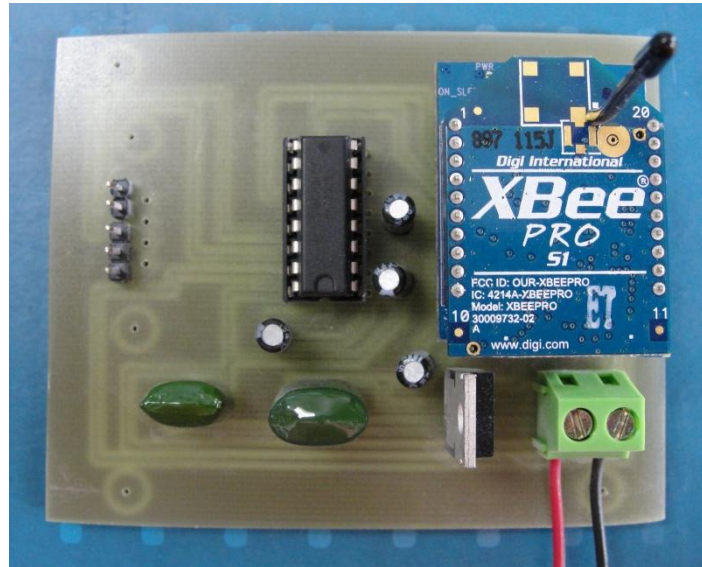


Figura 20. PCB en placa para comunicación entre Módulo interfaz cerebro-máquina y Módulo de comunicación inalámbrica



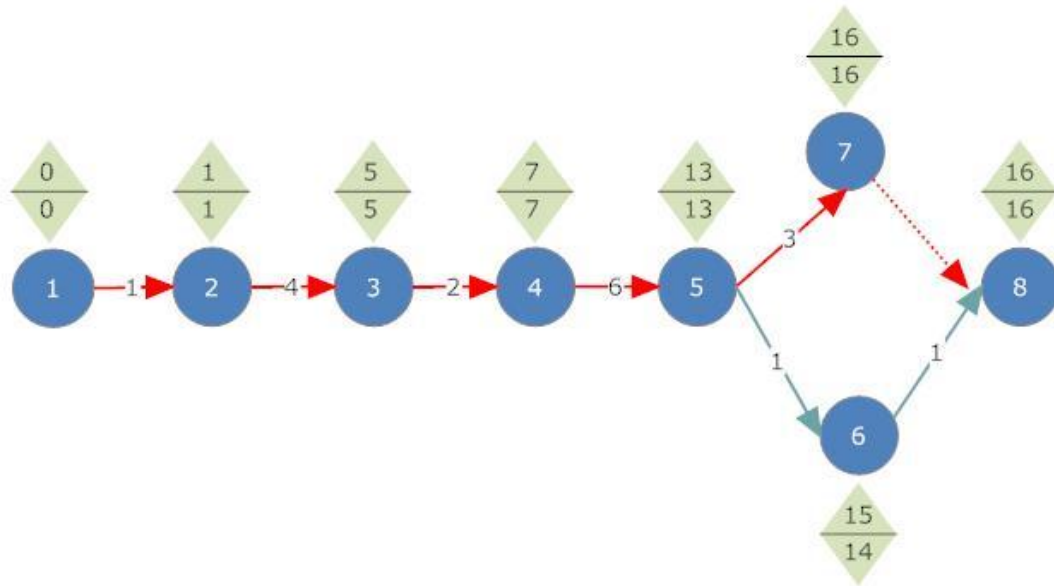
#### E. Módulo de planificación

1. Planificación y calendarización de actividades. A continuación se ejemplifica la Ruta Crítica del primer semestre que se construyó para el Módulo de interfaz Cerebro-Máquina. Esto se realizó para cada uno de los módulos.

Tabla 2. Actividades Módulo de cerebro-máquina primer semestre

ID Tarea	Tarea	Prerrequisitos	Duración (semanas)
A	Iniciar proyecto	-	1
B	Investigar sobre métodos de reconocimiento de patrones	A	4
C	Escoger tipo de procesamiento de señales a utilizar	B	2
D	Profundizar en el tipo de procesamiento de señales a utilizar	C	6
E	Determinar Método de adquisición de señales	D	1
F	Determinar Método de filtrado de señales	E	1
G	Programar ejemplo de reconocimiento de patrones sencillos	D	3
<b>ID Evento</b>	<b>Evento</b>		
1	Inicia A		
2	Termina A, inicia B		
3	Termina B, inicia C		
4	Termina C, inicia D		
5	Termina D, inicia E, inicia G		
6	Termina E, inicia F		
7	Termina G		
8	Termina F		

Figura 21. CPM Módulo de cerebro-máquina



Duración: 16 semanas

Actividades críticas: A, B, C, D, G

Actividades no críticas: E, F



## 2. Análisis de factibilidad

Tabla 4. Cuantificación del mercado

<b>País</b>	<b>Total</b>	<b>Parapléjicos</b>	<b>Cuadripléjicos</b>
Guatemala	5512	2756	2756
Mundo	2,500,000	1,250,000	1,250,000

Tabla 5. Sumario de oferta de sillas de ruedas eléctricas

<b>Silla</b>	<b>Precio</b>	<b>Peso de soporte (lb)</b>	<b>Velocidad (mph)</b>	<b>Alcance (mi)</b>	<b>Peso de la silla (lb)</b>
Rueda trasera	\$6,500	300	6	15	200
Rueda media	\$4,000	200	5	18	150
Rueda delantera	\$5,500	300	6	15	250

Tabla 6. Análisis CVU

Materiales directos	\$4,522.41	Q35,227.05
Mano de obra directa	\$2,847.30	Q22,178.90
<b>COSTO TOTAL</b>	<b>\$7,369.71</b>	<b>Q57,405.95</b>

**Tasa de cambio**      7.78945

Tabla 7. Margen de utilidad

	Precio de venta	\$10,000.00	Q77,894.50
Costo Variable	Costos bienes vendidos (-)	\$7,369.71	Q57,405.95
Unitario	Gastos de ventas (-)	\$200.00	Q1,557.89
	Utilidad unitaria	\$2,430.29	\$18,930.66
	Margen de utilidad	24.30%	24.30%

Tabla 8. Parámetros del análisis financiero

<b>Préstamo (Inversión inicial)</b>	\$14,052.47
<b>Periodo</b>	5 años
<b>Tasa de interés anual</b>	6.88%
<b>TMAR</b>	4.75%

Tabla 9. Análisis de sensibilidad según ventas

<b>Ventas</b>	<b>VPN</b>	<b>TIR</b>	<b>Decisión</b>
1 - 18			No rentable
19	\$8,295.09	12.87%	Rentable
19-adelante			Rentable

## VIII. DISCUSIÓN

En la integración Módulo de mecánica con Módulo de potencia, previo a la unión con el Módulo de mecánica, en el Módulo de potencia se tenían todas las señales necesarias para establecer en operación los actuadores y se habían realizado pruebas por separado con los actuadores. Cuando se da el proceso de integración es que se presenta la oportunidad de hacer pruebas generales con todos los actuadores ya instalados.

Se probaron todos los actuadores en vacíos, y se dio el proceso de calibración de los parámetros de operación de los actuadores. Donde se estableció los valores adecuados de las señales de control para que los actuadores, reflejaran un movimiento adecuado del prototipo cuando operaran.

Cabe mencionar que cuando se da este proceso de pruebas los primeros controladores HB-25 para los motores DC escogidos producidos por parallax [20] presentaron un funcionamiento incorrecto a causa del daño de los semiconductores de potencia que conformaban el dispositivo. Por lo cual se optó por cambiar dichos controladores, finalmente se utilizó **Sabertooth dual 12A motor driver** producidos por Dimension Engineering y el rendimiento de estos ya no presento ningún contratiempo.

Al realizar las pruebas del prototipo en su ambiente de operación se encontraron problemas al momento de girar. El primer problema era el hecho que los castigadores de los engranajes con las flechas acopladas las ruedas, se aflojaban conforme el uso o la vibración del prototipo. El segundo fue que esto al cruzar afectaba la tracción ya que no todas ruedas transmitían toda la fuerza y el cruce era poco preciso. Como solución a estos problemas se optó por ajustar con mayor fuerza los castigadores y aplicarles sellante de tornillos.

Con lo observado de las primeras pruebas se decidió programar dos tipos de cruce, el primero sobre su propio eje y el segundo con un giro abierto. Esto para otorgar movimientos acordes a la necesidad del usuario, ya que en curvas con giro abierto es impráctico que se utilice el cruce sobre su propio giro. Por último se observó lo planteado en las primeras etapas de diseño del prototipo, en donde la secuencia de descenso no requiere una la alimentación constante, si no con la misma inercia del prototipo se realiza el descenso de forma suave y controlada esto debido a la forma en que actúan los servos encargados de la tarea de mover el mecanismo de subido y bajado de gradas. Esto limita el uso de baterías simplemente para algún momento que se requiera algún ajuste, si la trayectoria de descenso sufrió algún desvío, cuando el prototipo se maneja utilizando la interfaz pc modificada para utilizar un joystick.

En ocasiones al ascender, en especial al utilizar escalones muy cerca del límite permisible para el prototipo [22], la trayectoria se veía desviada. Esto causaba que algunos triángulos giraran con algún desfase respecto al otro, en especial de subir varios escalones. Esto se solucionó implementando un acelerómetro para detectar el ángulo de giro respecto al eje Y y Z, con base a este ángulo se activan los servo motores que mueven los triángulos, y así reducir este ángulo lo más cercano a cero.

En la integración del Módulo de mecánica y de comunicación inalámbrica, al momento de implementar el código del control PID del nivel del asiento junto con el del sistema de comunicación e instrumentación, se encontraron errores en las interrupciones. Esto se debió en parte al hecho que el código de nivel del asiento utiliza un protocolo de comunicación I2C, el cual aplica ciertos “delays” haciendo que el programa se detuviera. Esto se logró solucionar retirando todo “delay” innecesario dentro del ciclo principal.

Respecto al pwm para el servomotor del sistema de inclinación, tuvo que ser re-calibrado debido a que el micro controlador utilizado por el módulo de

comunicación utilizaba un oscilador diferente. Finalmente se realizaron las placas de acrílico para evitar el contacto de las placas del módulo de comunicación con el aluminio, así como el espacio necesario para la antena de comunicación.

En la integración del Módulo de potencia y de comunicación inalámbrica, la conexión inalámbrica realizada fue para evitar el uso de extensiones de cables y mover el prototipo de la silla de ruedas libremente. Para la primera fase simplemente se colocaron ambos módulos inalámbricos XBee PRO utilizándolos como canal de comunicaciones.

Luego, se implementó la utilización de una trama en el envío de datos desde la computadora, para asegurar que los comandos que se estén transmitiendo, sean recibidos de forma correcta.

En el receptor colocado en el prototipo, se verifican los datos de las tramas transmitidas y en caso de una recepción exitosa, se verifica que el comando sea válido para poder ser enviado de forma serial RS-232 al sistema de control por otro de los puertos del microcontrolador.

Por parte del Módulo de potencia, se envía una trama de diferente forma, indicando un encabezado de dos bytes, que incluye el carácter en ASCII de '\*', seguido del número de bytes a transmitir; los próximos bytes representan los datos de interés, que corresponden a la lectura del sensor de corriente consumida y mediciones de los ejes Y y Z del acelerómetro. En el microcontrolador se procesan estos datos, para ser transmitidos luego en forma de unidades de millar, centenas, decenas y unidades para ser procesados por la aplicación de interfaz PC, y después se utilizan para llevar un control del comportamiento del prototipo. En este caso, los cuatro bytes correspondientes a cada medición son enviados anteponiendo los caracteres X, Y y Z, respectivamente.

La información que se manda desde el controlador del módulo de potencia hacia la PC que controla el dispositivo, sirvieron para tener un control sobre el consumo eléctrico del prototipo y con esto obtener parámetros de autonomía del mismo. Por otra parte la información que dan los acelerómetros, nos ayudan a determinar la inclinación del prototipo la cual es necesaria para implementar el algoritmo para subir y bajar gradas.

Esta información va a estar disponible para el proceso de pruebas, siempre y cuando el prototipo sea controlado mediante la aplicación de interfaz PC.

En la integración del Módulo interfaz cerebro-máquina y el de Comunicación inalámbrica, los datos enviados para la primera etapa fueron señales usando la gorra de electrodos. Se tomaron 1,000 muestras pertenecientes a un conjunto de seis valores posibles, que corresponden a niveles de intensidad específicos. Esta señal es el resultado de una conversión analógico/digital y la señal que fue muestreada es la diferencia de voltaje entre dos electrodos de la gorra que se encontraban al aire. Es por esto que la diferencia entre ellos se mantiene casi constante, lo que representa una variación mínima, ya que solamente son seis niveles de una conversión de diez bits.

El Módulo de planificación trabajó paralelamente con los demás módulos en la planificación de las actividades y metas de cada uno de los módulos, identificando la ruta crítica de las actividades del primer semestre de trabajo, y realizando un Diagrama de Gantt para el primer año de trabajo. Así también se trabajó con los demás módulos para la alimentación del Análisis de Factibilidad de la silla de ruedas como producto comercial. Alimentando al información al Análisis Técnico, específicamente en los estados de costos fijos y variables de la silla y la operación del proyecto como empresa, y en el Análisis Financiero, específicamente en la definición de la inversión inicial del proyecto. Con esta información y la recopilada en el Estudio de Mercado, donde se define como

mercado meta, a las personas cuadripléjicas, se realizó un Análisis de Factibilidad donde se identificó que el proyecto es rentable en la venta mínima de 19 sillas anuales con una Tasa Interna de Retorno del 12.87%, a un periodo de diez años y una Tasa Mínima Atractiva de Retorno del 4.75%.

A su vez se obtuvo realimentación de discapacitados en cuanto al diseño de la y ergonomía de la silla, y se presentaron estos resultados al grupo de estudiantes que trabajará en la continuación de este megaproyecto. Estos incluyen aspectos del peso, plegabilidad, independencia eléctrica de la silla, diseño de las llantas, resistencia y durabilidad de los materiales de la estructura.

## IX. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. Se diseñó e implementó el prototipo de una silla de ruedas, capaz de subir y bajar gradas, el cual tiene la capacidad de ser controlado mediante método de control no tradicional basado en ondas cerebrales.
2. El prototipo de la silla se mueve mediante cuatro motores DC, para el movimiento en el plano XY, por cuatro servomotores para el mecanismo de ascenso y descenso de gradas y todo es alimentado por una batería de 16.8 VDC, posee sensores ultrasónicos para la identificación de gradas y obstáculos e implementan la comunicación inalámbrica mediante módulos XBEE PRO.
3. La construcción de la silla es modular, con lo cual facilita el mantenimiento del prototipo y se busca que la misma esté lista para futuras modificaciones.
4. Las pruebas preliminares de campo al prototipo permitieron implementar los ajustes de manera progresiva para llegar a obtener un mejor resultado global.
5. Partiendo de las veinte pruebas, se establece que el prototipo de la silla está capacitado para ejecutar ascensos y descensos de conjuntos de gradas, siempre que las dimensiones de los obstáculos cumplan con las especificaciones para las cuales se diseñó el prototipo.
6. Las personas con discapacidad de las extremidades superiores pueden preferir utilizar sillas de ruedas manuales para ejercitar el resto de su cuerpo, la silla de ruedas eléctrica controlada por encefalografía debería estar orientada a cuadripléjicos y personas que no pueden movilizar su tórax.

7. En el Análisis de Factibilidad de la silla de ruedas como un producto comercial, se concluye que el proyecto es rentable en la venta mínima de 19 sillas anuales con una Tasa Interna de Retorno del 12.87%, a un periodo de diez años y una Tasa Mínima Atractiva de Retorno del 4.75%.
  
8. En la realimentación con discapacitados, se identificaron los factores de preferencia de un usuario de silla de ruedas como el peso, plegabilidad, independencia eléctrica de las funciones auxiliares de la silla, diseño de las llantas para todo terreno, resistencia y durabilidad de los materiales de la estructura.

## X. BIBLIOGRAFÍA

- [1] United Spinal Association. (2011) [Online].  
<http://www.usatechguide.org/reviews.php>
- [2] United Nations enable. (2003-2004) Accessibility for the Disabled - A Design Manual for a Barrier Free Environment. [Online].  
<http://www.un.org/esa/socdev/enable/designm/AD5-02.htm>
- [3] Arqhys. (2010) Escaleras, pendiente y escala. [Online].  
<http://www.arqhntescala.html>
- [4] Visi. (2010) The special problems of stairways. [Online].  
<http://www.visi.com/~dc/tristar/ad35.jpg>
- [5] Raúl Rojas, *Neural Networks: A Systematic Introduction*, Springer Verlag., 1996. [Online]. [52. Raúl Rojas; Neural Networks: A Systematic Introduction, Springer Verlag 1996.](#)
- [6] César Augusto Cuevas Guerra, *INNOVA: Control no convencional e implementación de un prototipo de una silla de ruedas eléctrica a través de la electroencefalografía, Módulo Mecánico. Megaproyecto INNOVA*. Guatemala: Universidad Del Valle De Guatemala, 2011
- [7] Normal 0 21 false false false ES-GT X-NONE X-NONE [XX] Gascón, A. (2010). ZigBee y el Estándar IEEE 802.15.4 [Online].  
[http://www.dea.icaupco.es/sadot/Comunicaciones/avanzadas/Alberto\\_Gasc%C3%B3n\\_Zigbee%20y%20el%20Est%C3%A1ndar%20IEEE%20802.15.4.pdf](http://www.dea.icaupco.es/sadot/Comunicaciones/avanzadas/Alberto_Gasc%C3%B3n_Zigbee%20y%20el%20Est%C3%A1ndar%20IEEE%20802.15.4.pdf)
- [8] Mario Roberto Valdeavellano, Luis Fernando Reina, and et. al., *Métodos no convencionales de interfaz en el control de robots a través de la electroencefalografía y la electrooculografía. Megaproyecto ANIMA*. Guatemala: Universidad Del Valle De Guatemala, 2009.

- [9] Alejandro Berliner González, Ana Regina Chacón Cabrera, and et. al, *Prótesis biónica de una mano humana*. Guatemala: Universidad Del Valle de Guatemala, 2008.
- [10] Carlos Fernando Castillo Calderón, *INNOVA: Control no convencional e implementación de un prototipo de una silla de ruedas eléctrica a través de la electroencefalografía, Módulo de Potencia. Megaproyecto INNOVA*. Guatemala: Universidad Del Valle De Guatemala, 2011
- [11] Álvaro Eleázar Martínez Aceituno, *INNOVA: Control no convencional e implementación de un prototipo de una silla de ruedas eléctrica a través de la electroencefalografía, Módulo de Comunicación Inalámbrica. Megaproyecto INNOVA*. Guatemala: Universidad Del Valle De Guatemala, 2011
- [12] Marek Wester, *Unspoken Speech: Speech recognition Based on Electroencephalography*. Alemania: Institut für Theoretische Informatik Universität Karlsruhe, 2006. [Online]. [60. Wester, Marek, Unspoken Speech: Speech recognition Based on Electroencephalography, Diplomarbeit, Institut für Theoretische Informatik Universität Karlsruhe, Alemania 2006.](#)
- [13] Erick Giovanni González Meléndez, *INNOVA: Control no convencional e implementación de un prototipo de una silla de ruedas eléctrica a través de la electroencefalografía, Módulo de interfaz Cerebro-Máquina. Megaproyecto INNOVA*. Guatemala: Universidad Del Valle De Guatemala, 2011
- [14] Marya Izquierdo, *INNOVA: Control no convencional e implementación de un prototipo de una silla de ruedas eléctrica a través de la electroencefalografía, Módulo de Planificación. Megaproyecto INNOVA*. Guatemala: Universidad Del Valle De Guatemala, 2011
- [15] USAID. (2011) [Online].

[www.usaid.gov/gt/docs/situation\\_disabilities\\_guatemala.pdf](http://www.usaid.gov/gt/docs/situation_disabilities_guatemala.pdf)

- [16] INE. (2011) [Online]. <http://www.ine.gob.gt/>
- [17] CONADI. (2011) [Online]. [www.conadi.org.gt](http://www.conadi.org.gt)
- [18] Rafael Muñiz. (2011) [Online]. <http://www.marketing-xxi.com/proceso-de-la-investigacion-de-mercados-i-24.htm>
- [19] AIDIMA. (2011) [Online].  
<http://www.aidima.es/servicios/analisismercados/web/iniciomenu.asp?opcion=3.1.3.1.1.3&link=./web/nuevo/serempstudios/estudiocuantificacion.htm>
- [20] Mark McCracken. (2005) [Online].  
[http://www.teachmefinance.com/Financial\\_Terms/market\\_access.html](http://www.teachmefinance.com/Financial_Terms/market_access.html)
- [21] Mujeres de Empresa. (2002) [Online].  
<http://www.muñeresdeempresa.com/marketing/marketing020603.shtml>
- [22] Chospab. (2011) [Online].  
[www.chospab.es/calidad/archivos/Metodos/Muestreo.pdf](http://www.chospab.es/calidad/archivos/Metodos/Muestreo.pdf)
- [23] Universidad de Vigo. (2011) [Online].  
[webs.uvigo.es/aimtnez/transpasinvestigacion/TEMA%207.ppt](http://webs.uvigo.es/aimtnez/transpasinvestigacion/TEMA%207.ppt)
- [24] Ricoverimarketing. (2011) [Online].  
<http://ricoverimarketing.es.tripod.com/RicoveriMarketing/id15.html>
- [25] Robbins and Coulter, *Aministración*, 10th ed.: Prentice Hall. [Online]. [53. Robbins y Coulter. Aministración. 10ª edición. Prentice Hall.](#)
- [26] James Cashin and R. Polimen, *Contabilidad de Costos*. México: McGraw Hill, 1999.
- [27] Hnasen and Mowen, *Administración de Costos: Contabilidad y Control*, International Thomson Editores, Ed. México, 1996. [Online]. [23. HANSEN y Mowen. 1996. Administración de Costos. Contabilidad y Control. International Thomson Editores, S.A. México.](#)
- [28] Foster Horngren and Datar, *Contabilidad de Costos: Un enfoque gerencial*. México: Prentice Hal, 1996.

- [29] J. Neuner,,: UTEHA, 1996. [Online]. [42. NEUNER, J. 1996. Contabilidad de Costos. Principios y Práctica. UTEHA](#)
- [30] Leland Blank and Anthony Tarquin, *Ingeniería Económica*, 6th ed. India: McGraw Hill, 2006.
- [31] An-Najah, *Minimum Acceptable Rate of Return.*:  
<http://staff.najah.edu/sites/default/files/lecture15.pdf> , 2010.
- [32] Zamor Suárez and Victor Manuel. (2009) [Online].  
[http://catarina.udlap.mx/u\\_dl\\_a/tales/documentos/mgc/suarez\\_z\\_vm/capitulo7.pdf](http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/mgc/suarez_z_vm/capitulo7.pdf)
- [33] Apparelyzed. (2011) [Online].  
<http://www.apparelyzed.com/forums/topic/12751-spinal-cord-injury-statistics>
- [34] Paraquad. (2011) [Online].  
<http://www.paraquad.org.au/AboutParaQuad/Aboutspinalcordinjury.aspx>
- [35] SCI-INFO-PAGES. (2011) [Online].  
<http://www.sci-info-pages.com/facts.html>
- [36] Quadriplegic Association of South Africa. (2011) [Online].  
<http://quad.stormnet.co.za/info.htm>
- [37] FUNDABIEM. (2011) [Online].  
<https://www.teleton.com.gt/content/quienes-somos>
- [38] IGSS. (2011) [Online]. [www.igssgt.org/](http://www.igssgt.org/)
- [39] Ministerio de Salud. (2011) [Online]. [portal.mspas.gob.gt](http://portal.mspas.gob.gt)
- [40] Amazon. (2011) [Online].  
[http://www.amazon.com/s/ref=nb\\_sb\\_noss?url=search-alias%3Dhpc&field-keywords=Activecare+Medical+Wildcat&x=0&y=0](http://www.amazon.com/s/ref=nb_sb_noss?url=search-alias%3Dhpc&field-keywords=Activecare+Medical+Wildcat&x=0&y=0)
- [41] Disabilitynow. (2011) [Online].  
<http://www.disabilitynow.org.uk/living/classifieds/for-sale/wheelchairs-scooters-and-bicycles>

- [42] Sunrisemedical. (2011) [Online]. [www.sunrisemedical.com/UsedHoveround](http://www.sunrisemedical.com/UsedHoveround)
- [43] Nextag. (2011) [Online]. <http://www.nextag.com/Golden-Technologies-Golden-Alante-584240912/price-history-html>
- [44] Amazon. (2011) Amazon. [Online]. [http://www.amazon.com/s/ref=nb\\_sb\\_noss?url=search-alias%3Dhpc&field-keywords=Invacare+Pronto+M50&x=0&y=0](http://www.amazon.com/s/ref=nb_sb_noss?url=search-alias%3Dhpc&field-keywords=Invacare+Pronto+M50&x=0&y=0)
- [45] Amazon. (2011) [Online]. [http://www.amazon.com/s/ref=nb\\_sb\\_noss?url=search-alias%3Dhpc&field-keywords=Pride+Mobility+Jazzy+1100+wheelchair&rh=n%3A3760901%2Ck%3APride+Mobility+Jazzy+1100+wheelchair&ajr=6](http://www.amazon.com/s/ref=nb_sb_noss?url=search-alias%3Dhpc&field-keywords=Pride+Mobility+Jazzy+1100+wheelchair&rh=n%3A3760901%2Ck%3APride+Mobility+Jazzy+1100+wheelchair&ajr=6)
- [46] PHC-Online. (2011) [Online]. <http://www.phc-online.com/Guardian Power Wheelchair p/guardian aspire.htm>
- [47] Shermanoaks Medical. (2011) [Online]. <http://www.shermanoaksmedical.com/Quickie Aspire p/22-021.htm>
- [48] Marcs Mobility. (2011) [Online]. <http://www.marcsmobility.com/used-hoveround-power-wheelchair-hoveround-mpv-4-power-chair.html>
- [49] SImember. (2011) [Online]. <http://www.sImember.com/index.cfm/method/product.details/id/scout-m1-series/scout-m1-pbr-convertible-300-electric-power-wheelchair.htm>
- [50] Shermanoaks Medical. (2011) [Online]. <http://www.shermanoaksmedical.com/Permobil s/150.htm>
- [51] Budd Hagen and Dolores Hagen. (2011) Closing The Gap. [Online]. <http://www.closingthegap.com/>
- [52] Chain Sapan and Nassir, *PROYECTOS DE INVERSIÓN: Formulación y evaluación.*, Editorial Pearson Educación, Ed. México, 2007. [Online]. [54. Sapan Chain, Nassir. 2007. PROYECTOS DE INVERSIÓN: Formulación y evaluación. Editorial Pearson Educación, México. Primera Edición.](#)

- [53] Banco De Guatemala. (2011) [Online].  
<http://www.banguat.gob.gt/inc/ver.asp?id=vmc/vmc06&e=564>
- [54] 101mobility. (2011) [Online].  
[http://shop.101mobility.com/product/Compass\\_Sport\\_Captains\\_Chair](http://shop.101mobility.com/product/Compass_Sport_Captains_Chair)
- [55] A3BS. (2011) [Online]. <https://www.a3bs.com/cart.html>
- [56] Abledata. (2011) [Online]. <http://www.abledata.com/>
- [57] AMAT and Soldevila, *Contabilidad de Gestión y Reducción de Costes*, Ediciones Gestión 2.000, Ed. España, 1998.
- [58] An-Najah. (2010) [Online].  
<http://staff.najah.edu/sites/default/files/lecture15.pdf>
- [59] Bill Cawley. (2011) [Online]. [http://www.billcawleyspeaks.com/who\\_is.html](http://www.billcawleyspeaks.com/who_is.html)
- [60] CCEE. (2011) [Online].  
[www.ccee.edu.uy/ensenian/catpyep/exyrev/transestudiomer.pdf](http://www.ccee.edu.uy/ensenian/catpyep/exyrev/transestudiomer.pdf)
- [61] Marketing Directo. (2011) [Online].  
<http://www.marketingdirecto.com/diccionario-marketing-publicidad-comunicacion-nuevas-tecnologias/participacion-de-mercado/>
- [62] Richard Fabend. (2011) [Online]. <http://www.handihelp.net/>
- [63] Banco De Guatemala. (2011) [Online]. <http://www.banguat.gob.gt/cambio/>
- Yu Hen Hu and Hwang Jenq-Neng, *Handbook of Neural Network Signal Processing.*: CRC Press, 2001.
- [65] Brian Hucker. (2011) [Online]. <http://www.covers-plus.co.uk/>
- [66] Justmobility. (2011) [Online].  
<http://www.justmobility.co.uk/SmallAds/Details.asp?Id=SA001326&StartPoint=60>
- [67] Hilary Lister. (2011) [Online]. <http://www.hilarylister.com>
- [68] Madentec. (2011) [Online]. <http://www.madentec.com/>
- [69] Eleonora Mejía and María Cristina Arboleda. (2004) [Online].  
[www.icesi.edu.co/biblioteca/images/stories/ejemplo\\_de\\_portada.pdf](http://www.icesi.edu.co/biblioteca/images/stories/ejemplo_de_portada.pdf)

[70] HMS Mobility. (2011) [Online].

<http://www.hmsmobility.co.uk/Powerchairs.html>

[71] Miguel Nicolelis. (2001) Duke Medicine. [Online].

[http://www.dukemedicine.org/AboutUs/Facts\\_and\\_Statistics/historical\\_highlights/index/vie](http://www.dukemedicine.org/AboutUs/Facts_and_Statistics/historical_highlights/index/vie)

[72] Simon Roulstone. (2011) [Online]. <http://www.apparelyzed.com/>

[73] Mark E. Smith. (2011) [Online]. <http://www.wheelchairjunkie.com/>

[74] UN. (2011) [Online].

<http://www.un.org/spanish/esa/social/disabled/garesol.htm>

## XI. APÉNDICE A. MÓDULO DE PLANIFICACIÓN

Se presentará en los apéndices un fragmento de la tesis individual de cada uno de los módulos que contiene el metodología y diseño, resultados y discusión de cada uno. Se respeta la numeración de tablas, figuras y bibliografía a la correspondiente con las tesis individuales para permitir congruencia y facilitar la consulta del lector a las tesis individuales.

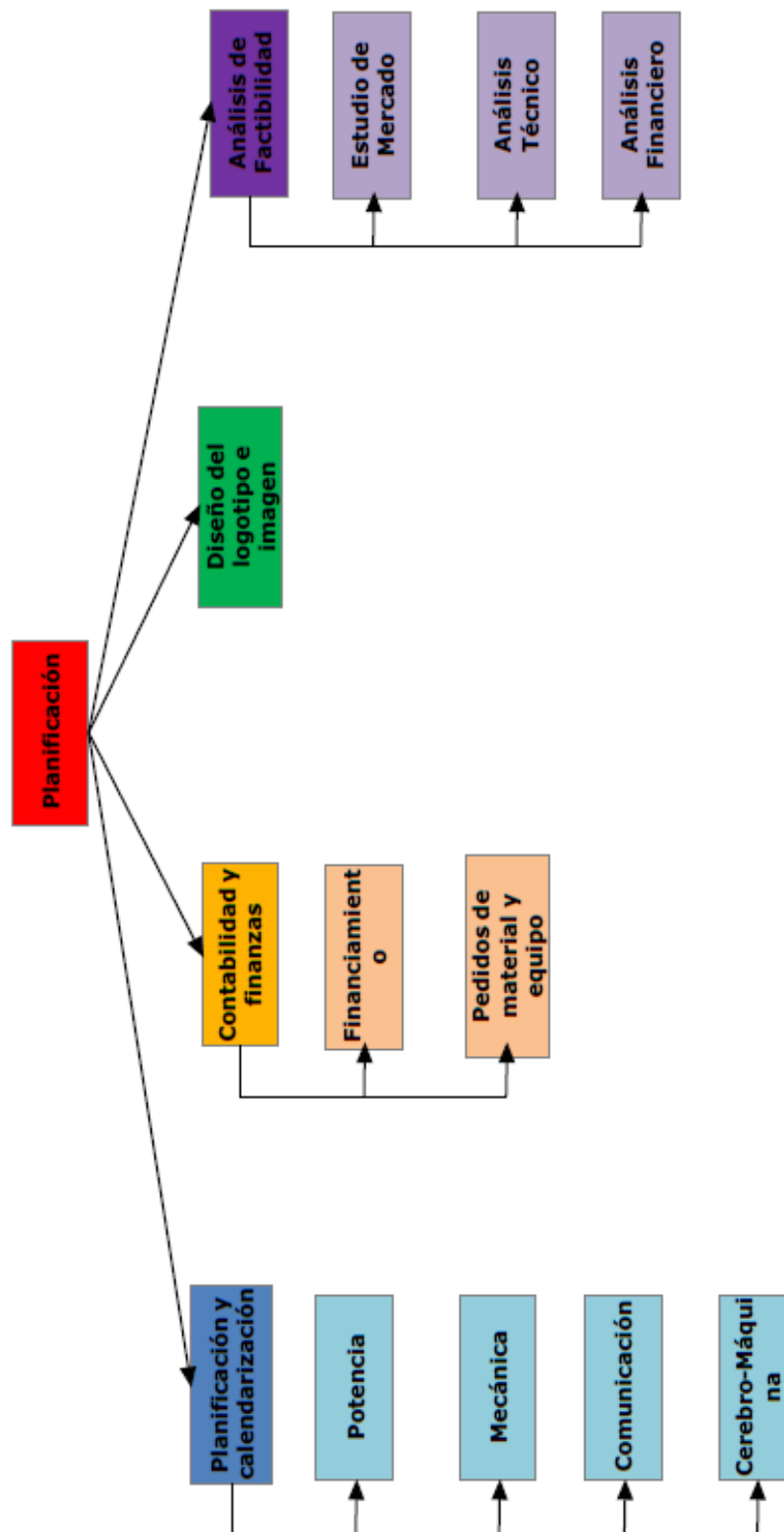
### METODOLOGÍA

El módulo de planificación comprende básicamente la planeación y calendarización del megaproyecto en conjunto, así como de cada uno de sus módulos. Así como también gestionar la contabilidad y finanzas, lo cual incluye adquirir el financiamiento del proyecto; diseñar el logotipo e imagen del producto; realización de un Análisis de Factibilidad que incluye un Estudio de Mercado, Análisis Técnico y el Análisis Financiero para el producto final; y la coordinación de la realimentación cuadrupléjicos y parapléjicos para la proposición de mejoras al diseño y desarrollo de la silla. Para la realización del Análisis de Factibilidad se utilizaron herramientas de mercadeo, contabilidad de costos y herramientas financieras (ver Tabla No. 5).

Tabla 10. Herramientas empleadas para la Planificación

<b>Tarea</b>	<b>Herramienta</b>
Definición de los factores atractivos de mercado	Análisis del consumidor
Análisis del entorno general	Análisis FODA
Análisis técnico	Estado de costos
Análisis financiero	Herramientas de ingeniería financiera: TMAR, TIR, Valor Presente Neto
Comunicación con cuadrupléjicos	Blogs Comunicación directa vía electrónica

Figura 22. Diagrama de bloques del Módulo de planificación



## RESULTADOS

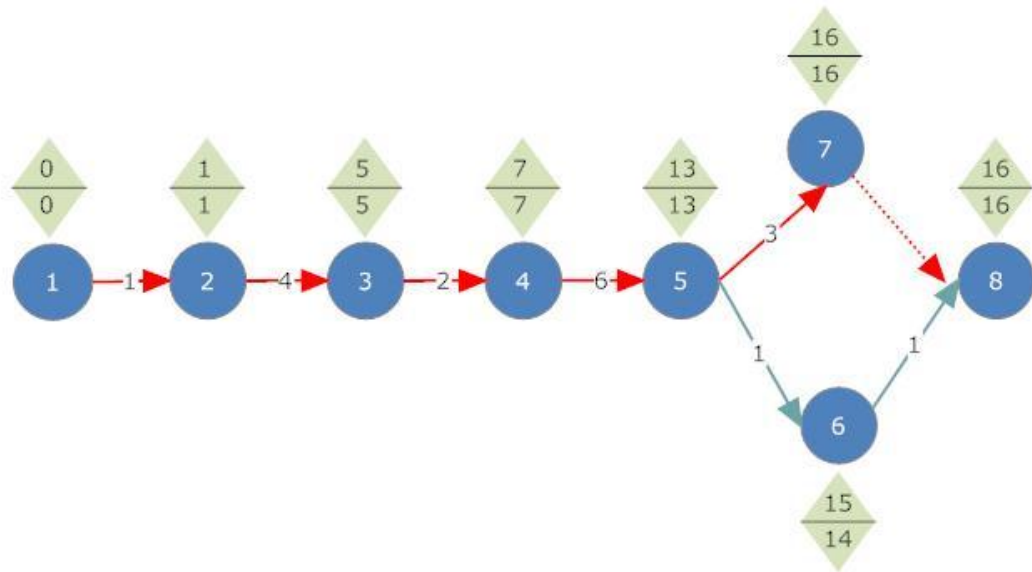
### A. Ruta Crítica del proyecto (CPM, *Critical Path Method*)

#### 1. Módulo de cerebro-máquina

Tabla 11. Actividades Módulo de cerebro-máquina primer semestre

ID Tarea	Tarea	Prerrequisitos	Duración (semanas)
A	Iniciar proyecto	-	1
B	Investigar sobre métodos de reconocimiento de patrones	A	4
C	Escoger tipo de procesamiento de señales a utilizar	B	2
D	Profundizar en el tipo de procesamiento de señales a utilizar	C	6
E	Determinar Método de Adquisición de señales	D	1
F	Determinar Método de filtrado de señales	E	1
G	Programar ejemplo de reconocimiento de patrones sencillos	D	3
ID Evento	Evento		
1	Inicia A		
2	Termina A, inicia B		
3	Termina B, inicia C		
4	Termina C, inicia D		
5	Termina D, inicia E, inicia G		
6	Termina E, inicia F		
7	Termina G		
8	Termina F		

Figura 23. CPM Módulo de cerebro-máquina



Duración: 16 semanas

Actividades críticas: A, B, C, D, G

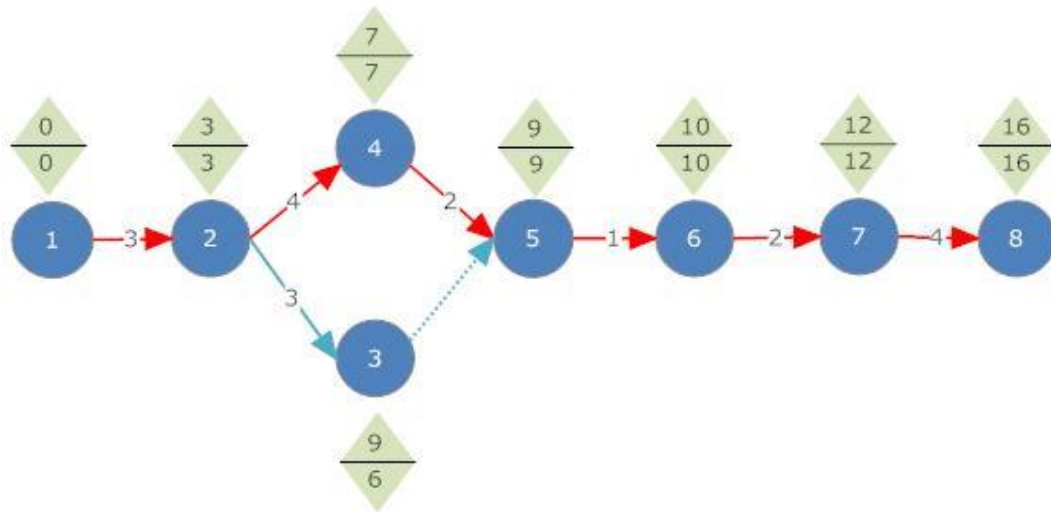
Actividades no críticas: E, F

## 2. Módulo de comunicación

Tabla 12. Actividades Módulo de comunicación primer semestre

<b>ID Tarea</b>	<b>Tarea</b>	<b>Prerrequisitos</b>	<b>Duración (semanas)</b>
<b>A</b>	Iniciar proyecto	-	0
<b>B</b>	Investigar tipos de comunicación inalámbrica	-	3
<b>C</b>	Buscar tipos de comunicación utilizados en aplicaciones similares	B	3
<b>D</b>	Investigar protocolos de comunicación	B	4
<b>E</b>	Identificar y evaluar características importantes	D	2
<b>F</b>	Definir tipo de comunicación a implementar	E	1
<b>G</b>	Investigación de equipo a implementar	F	2
<b>H</b>	Realizar pruebas	G	4
<b>ID Evento</b>	<b>Evento</b>		
1	Inicia B		
2	Termina B, inicia C, inicia D		
3	Termina C		
4	Termina D, inicia E		
5	Termina E, inicia F		
6	Termina F, inicia G		
7	Termina G, inicia H		
8	Termina H		

Figura 24. CPM Módulo de comunicación



Duración: 16 semanas

Actividades críticas: A, B, D, E, F, G, H

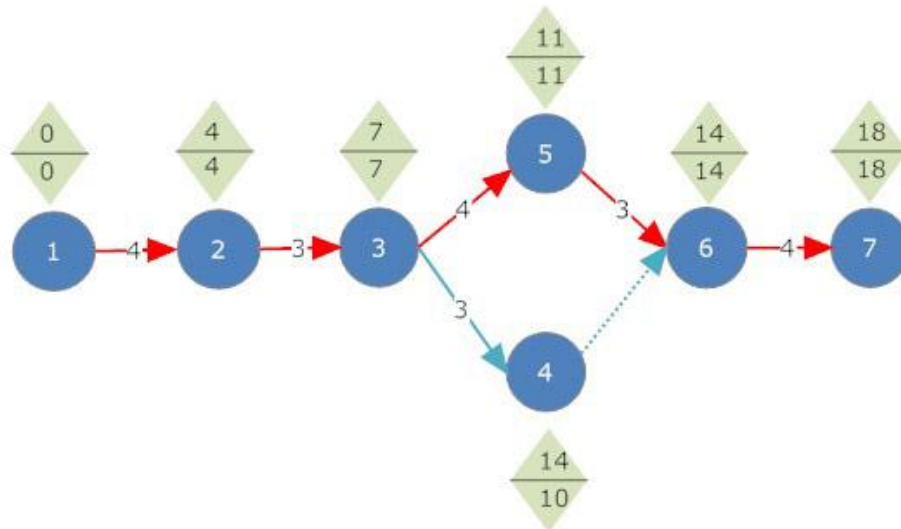
Actividades no críticas: C

## 3. Módulo de mecánica

Tabla 13. Actividades Módulo de mecánica primer semestre

<b>ID Tarea</b>	<b>Tarea</b>	<b>Prerrequisitos</b>	<b>Duración (semanas)</b>
<b>A</b>	Iniciar proyecto	-	0
<b>B</b>	Investigar sistemas de sillas	-	4
<b>C</b>	Diseñar en computadora posibles diseños	B	3
<b>D</b>	Realizar pruebas de diseños con distintos materiales	C	3
<b>E</b>	Realizar prototipos físicos de los mecanismos elegidos y determinar el final	C	4
<b>F</b>	Iniciar construcción de la estructura principal	E	3
<b>G</b>	Manufactura del mecanismos (engranajes) e instalación en la estructura	F	4
<b>ID Evento</b>	<b>Evento</b>		
1	Inicia B		
2	Termina B, inicia C		
3	Termina C, inicial D, inicia E		
4	Termina D		
5	Termina E, inicia F		
6	Termina F, inicia G		
7	Termina G		

Figura 25. CPM Módulo de mecánica



Duración: 18 semanas

Actividades críticas: A, B, C, E, F, G

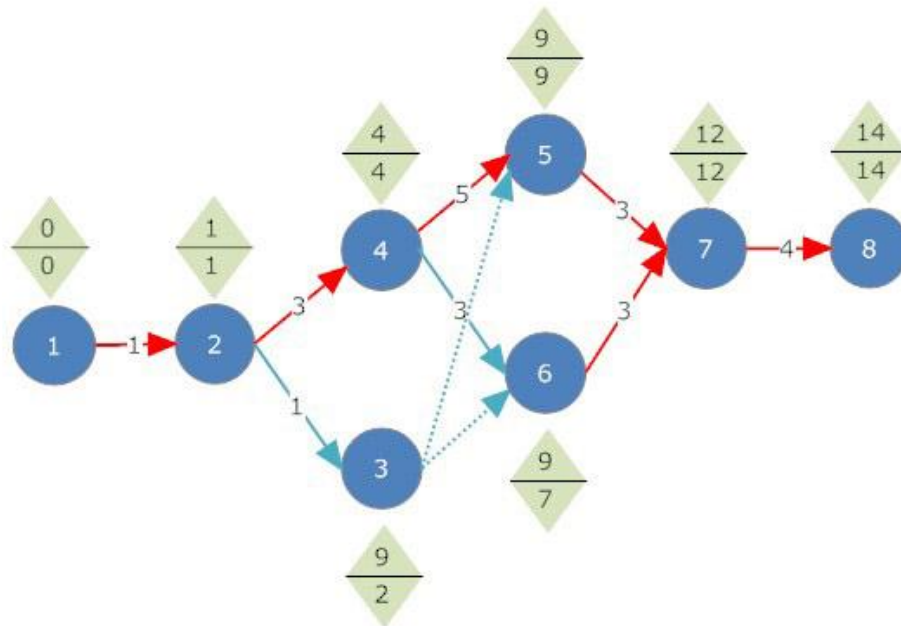
Actividades no críticas: D

## 4. Módulo de potencia

Tabla 14. Actividades Módulo de potencia primer semestre

<b>ID Tarea</b>	<b>Tarea</b>	<b>Prerrequisitos</b>	<b>Duración (semanas)</b>
<b>A</b>	Iniciar proyecto	-	0
<b>B</b>	Definir módulo	-	1
<b>C</b>	Planificar actividades	B	1
<b>D</b>	Investigar motores	B	3
<b>E</b>	Investigar motores DC sin escobillas	D	5
<b>F</b>	Investigar motores DC con escobillas	D	3
<b>G</b>	Determinar motor a utilizar en el proyecto	E, F	3
<b>H</b>	Cotizar motor en el mercado	G	4
<b>ID Evento</b>	<b>Evento</b>		
1	Inicia B		
2	Termina B, inicia C, inicia D		
3	Termina C		
4	Termina D, inicia E, inicia F		
5	Termina E, inicia G		
6	Termina F, inicia G		
7	Termina G, inicia H		
8	Termina H		

Figura 26. CPM Módulo de potencia



Duración: 14 semanas

Actividades críticas: A, B, D, E, F, G, H

Actividades no críticas: C



## C. Estudio de mercado

### 1. Definición del mercado meta

a. Características demográficas y estadísticas. Para obtener las características demográficas del potencial mercado meta se inició la investigación de estadísticas nacionales. Para esto se recurrió a organizaciones gubernamentales y no gubernamentales como Fundabiem, Conadi (Consejo Nacional para la Atención de las Personas con Discapacidad de Guatemala), INE (Instituto Nacional de Estadística, IGSS (Instituto de Seguridad Social), Programa de Discapacitados del Ministerio de Salud y Programa de Discapacitados de la Presidencia. Sin embargo no se encontraron estadísticas en algunas y en otras se encontraron estadísticas generales de discapacidad o de las causas que la provocaban. Por esta razón se recurrió a realizar una investigación de estadísticas a nivel internacional, encontrándolas principalmente en Estados Unidos. Estas se utilizaron como referencia y como una directriz para establecer el mercado meta y cuantificarlo. Los datos y características encontradas se presentan a continuación.

#### 1) Género: Indistinto

Tabla 16. Distribución de género de personas con Spinal Cord Injury (SCI)

<b>País</b>	<b>Total</b>	<b>Hombres</b>	<b>Mujeres</b>
Estados Unidos	250,000	82%	18%

(Información extraída de Apparelyzed [13], Paraquad [53] y SCI-INGO-PAGES [61])

## 2) Edad: &gt;12 años

Tabla 17. Distribución de edad de personas SCI

<b>País</b>	<b>Media</b>	<b>Mediana</b>	<b>Moda</b>	<b>16-30 años</b>
Estados Unidos	31	26	19	56%

(Información extraída de Apparelyzed [13], Paraquad [53] y SCI-INGO-PAGES [61])

3) Nivel Socioeconómico: Medio, medio-alto y alto (hacer referencia a la Tabla No. 12: Gastos de cuadripléjicos en la sección de hábitos de consumo). En Guatemala el nivel socioeconómico medio tiene un ingreso mensual (promedio) por persona de Q634.38, es decir, Q21.14 diarios (US \$2.64). El nivel medio-alto posee un ingreso mensual personal de Q1.558.81, equivalente a Q51.96 diarios (US \$6.50). Y el nivel alto tiene un ingreso mensual per cápita de Q4.658.67, equivalente a Q155.28 diarios (US \$19.48). [5]

b. Descripción general del mercado meta: *Perfil del cliente objetivo*

Personas con cuadriplejía (tetraplejía)\* mayores de 12 años de nivel medio a alto.

\*Lesión cervical medular ubicada entre la C4 y la C6 que provoca pérdida en la función de las extremidades inferiores y superiores.

## 2. Cuantificación del mercado

## a. Mercado internacional

Tabla 18. Prevalencia de casos SCI por país

País	Población	Prevalencia	Prevalencia como % de población	Incidencia	Incidencia como % de prevalencia
Noruega	4,835,000	5,000	0.10%	100	2.00%
Alemania	82,046,000	1,500	0.00%	19	1.27%
Australia	22,000,000	10,000	0.05%	300	3.00%
Brazil	191,820,000	8,750	0.00%	50	0.57%
Canada	33,772,000	37,000	0.11%	1,450	3.92%
China	1,332,840,000	420,000	0.03%	10,000	2.38%
Estados Unidos	307,340,000	250,000	0.08%	11,500	4.60%
EU	785,000,000	330,000	0.04%	11,000	3.33%
Francia	65,073,000	930	0.00%	32	3.44%
Holanda	16,535,000	12,000	0.07%	450	3.75%
Italia	60,088,000	700	0.00%	12	1.71%
Singapur	4,839,000	14	0.00%		
Suecia	9,292,000	150	0.00%	20	13.33%
Sur África	49,320,000	400	0.00%	8	2.00%
UK (inc. Ireland)	61,635,000	40,000	0.06%	800	2.00%
Mundo	6,782,700,000	2,500,000	0.04%	131,600	5.26%
		<b>Promedio</b>	0.04%	<b>Promedio</b>	3.15%

(Información extraída de Apparelyzed [13], Paraquad [53] y SCI-INGO-PAGES [61] y Quadriplegic Association of South Africa [55])

Tabla 19. Prevalencia de paraplejía y cuadriplejía por país

<b>País</b>	<b>Total</b>	<b>Paraplégicos</b>	<b>Cuadriplégicos</b>
Estados Unidos	250,000	130,000 (52%)	120,000 (48%)
Australia	10,000	4,800 (48%)	5,200 (52%)
<b>Promedio</b>		50%	50%

(Información extraída de Apparelyzed [13], Paraquad [53] y SCI-INGO-PAGES [61] y Quadriplegic Association of South Africa [55])

Tabla 20. Causas de SCI por país

<b>País</b>	<b>Accidentes Automovilísticos</b>	<b>Violencia</b>	<b>Caídas</b>	<b>Deporte</b>	<b>Otros</b>
Estados Unidos	37%	28%	21%	6%	8%
Sudáfrica	56%	3%	20%	17%	4%
Australia	52%	-	28%	16%	21%

(Información extraída de Apparelyzed [13], Paraquad [53] y SCI-INGO-PAGES [61] y Quadriplegic Association of South Africa [55])

b. Mercado nacional. A continuación se presentan las distintas instituciones u organizaciones donde se investigó estadísticas de paraplejía:

- Fundabiem: Redirección al Conadi. [30]
- Conadi (Consejo Nacional para la Atención de las Personas con Discapacidad de Guatemala): No se encontraron estadísticas.[25]
- INE (Instituto Nacional de Estadística): Se encontraron estadísticas de discapacidad y personas en silla de ruedas. [35]
- IGSS: El 80% de las personas que ingresan al IGSS con invalidez adquirida, como paraplejía, cuadriplejía o secuelas de un trauma de cráneo son causadas por heridas de proyectil de arma de fuego.[34]
- Ministerio de Salud: No se encontraron estadísticas. [49]

- Programa de Discapacitados del Ministerio de Salud y Programa de Discapacitados de la Presidencia: No se encontraron estadísticas. [49]

Como se puede observar y se mencionó con anterioridad no se encontraron estadísticas nacionales relevantes. Por esta razón se derivaron las estadísticas nacionales de los promedios de las internacionales. En la Tabla No. 18 se puede observar que el promedio del porcentaje de personas con SCI por país de los países encontrados es el 0.04%. Y el porcentaje de la incidencia en relación a la prevalencia de SCI en promedio es de 3.15% por país. En la Tabla No. 21 se presentan las estadísticas nacionales calculadas con base en estos promedios. En relación a la proporción de cuadripléjicos y parapléjicos en las personas con SCI se encontró que en promedio la proporción es 50%-50% para los países de Estados Unidos y Australia, por lo que se supuso que esta es la proporción a nivel nacional y el cálculo se muestra en la Tabla No. 22.

Tabla 21. Prevalencia de casos SCI de Guatemala derivada

<b>País</b>	<b>Población</b>	<b>Prevalencia como % de población</b>	<b>Prevalencia</b>	<b>Incidencia como % de prevalencia</b>	<b>Incidencia</b>
Guatemala	14,700,000	0.04%	5512	3.15%	174

(Información extraída de INE [35])

Tabla 22. Prevalencia de paraplejía y cuadriplejía derivadas

<b>País</b>	<b>Total</b>	<b>Parapléjicos</b>	<b>Cuadripléjicos</b>
Guatemala	5512	2756	2756
Mundo	2,500,000	1,250,000	1,250,000

### 3. Factores atractivos de mercado

a. Accesibilidad. La accesibilidad para introducir una silla de ruedas controlada por encefalografía en Guatemala se ve limitada debido a que el nivel de vida es bajo. El 51% de la población nacional es pobre [35], del cual el 15.20% vive en pobreza extrema y el 35.80% en pobreza no extrema. La mayoría de personas que representan el 49% de la población no pobre, no tiene la capacidad de pago suficiente para cubrir gastos médicos, ni mucho menos el de una silla de ruedas eléctrica. Introducir el producto en Guatemala tendría que estar enfocado en inversión de terceros para personas cuadripléjicas de escasos recursos.

La accesibilidad en mercados extranjeros como el de Estados Unidos es mayor debido a que el nivel de vida es más alto. Este mercado es más atractivo debido a que las personas tienen mayor capacidad de pago, y a su vez, existe una mayor cobertura de seguros médicos en la población.

b. Hábitos de consumo. A continuación se presentan los gastos que tiene un cuadripléjico en el primer año de lesión, el total de gastos que tendrá de por vida si adquiriese la lesión a los veinticinco años de edad y el porcentaje ocupacional de estas personas antes y después de la lesión en Estados Unidos. Así también se presenta cómo se financian estos gastos. Esta información es útil para tener referencia para el establecimiento del precio de la silla y contribuye al análisis de rentabilidad.

Tabla 23. Gastos y fuente de financiamiento de cuadripléjicos

País	Primer año		Gastos de por vida, edad de trauma 25 ã		Empleados al momento de adquirirla		Empleados 8 años post trauma	
	Fuente de pago	Seguro Privado	Cuidado médico	Pago personal	Medicaid	Compensación laboral	Rehabilitación vocacional	Otro
Estados Unidos	\$417,000		\$1.35 millones		58.8%		24.3%	
Cuidado profundo	53%	5%	1%	25%	12%	14%	2%	
Cuidado médico post trauma	43%	25%	2%	31%	11%	16%		

(Información extraída de Apparelyzed [13], Paraquad [53] y SCI-INGO-PAGES [61])

c. Etapa del ciclo de vida. La silla de ruedas controlada por encefalografía es un producto existente en el mercado. Debido a que se han modelado muy pocas de ellas y el producto sigue en constante desarrollo, y por esto se puede identificar entre la etapa de nacimiento y crecimiento. [57]

4. Determinación de la muestra para la estimación de la participación potencial del mercado

a. Tamaño de la muestra. Debido a que se supone que la población es menor a 100,000 se considera un muestreo para una población finita. Se ha definido un nivel de confianza del 95.5%, para el cual  $Z = 1.96$ , y un margen de error del 4%. Se supone, entonces, que la población es de 2756 personas con cuadriplejía en Guatemala, con lo que se consigue el siguiente tamaño muestral:

$$n = \frac{Z^2 PQN}{E^2(N-1) + Z^2 PQ} = \frac{1.96^2(50)(50)(2756)}{4^2(2756-1) + 2(50)(50)} = 540.4$$






Se puede notar que el tamaño muestral es relativamente grande y no sería factible ni en tiempo ni en costos. Es por esto que se dispondrá el tamaño de una muestra de  $n = 30$ , que es una muestra aleatoria simple suficientemente grande estadísticamente para ser representativa.

b. Elección de la muestra. Luego de analizar las ventajas y desventajas de cada tipo de muestreo (ver sección C en el Marco Teórico inciso 4 sub-inciso b) en el y la factibilidad en tiempo y recursos del proyecto, se selecciona el muestreo no probabilístico de conveniencia, debido a que no se conoce la población completa ni su distribución, como para aplicar las técnicas probabilísticas. Además el tipo de elementos muestrales, PERSONAS con estados críticos de salud resultan poco accesibles y dispersos, por lo que un muestreo de conveniencia es el que más se ajusta.

5. Investigación de la oferta de sillas de ruedas eléctricas. En la Tabla No. 24, No. 25 y No. 26 se presenta un sumario de la oferta de silla de ruedas eléctricas en el mercado internacional con cinco productos relevantes en cada tipo de silla: controladas por la rueda trasera, rueda media y rueda trasera.

## a. Controladas por rueda trasera

Tabla 24. Sillas eléctricas controladas por la rueda trasera






	<b>21st Century Scientific, Inc. Bounder</b>	<b>Activecar e Medical Wildcat</b>	<b>Adaptachair Limited Adaptachair</b>	<b>Balder Liberty</b>	<b>Sunrise Medical Quickie S525</b>
Peso usuario (lb)	250	300			250-350
Velocidad (mph)	9	4	3. 6. Control de velocidad y aceleración programable.5 velocidades.	6.2	4.5, 6.5
Alcance (mi)		20	10		
Max. grado de inclinación		12	Gradiente 1 en 6	Asiento hacia adelante: 15°. Asiento hacia atrás: 45°.	Respaldo: -4 a 12°
Tubos	Acero con soldadura TIG				Ovalized Tri-cell
Motor	Super Torque 1 Motors & Brakes	Dos 24V x 200W x 3900rpm			
Batería	Caja con 27 baterías (Gel-Cell o lead acid). Cargador 8A Dual Mode.	Dos DC12V x 36AH. Cargador 5 Amp.	Enclosed sealed.	2 x 12V 55 Ah.	U1, 22NF
Freno	Switch inteligente para soltar el freno. Control eléctrico del freno.		Frenos electro-magnéticos.		
Llantas	Frontales: 8"x2" de plástico. Traseras: 16"x2.125" o 20"x2.125" de aluminio con reflectores se seguridad. Anti-tipping wheelie wheels.	12.5" x 2.25"	Anti-tip	Frontales: 280/250 x 3". Traseras: 3,50 x 8".	12 in. X 2 in
Peso sin baterías (lb)		92			105
Peso con baterías (lb)		140		280	
Precio		\$1610.00	\$7430.00	\$11,900.00	\$5274.00
Imagen					
Durabilidad	★ ★ ★ ★ ★				★ ★ ★
Facilidad de uso	★ ★ ★ ★ ★				★ ★ ★ ★ ★
Alcanza expectativas	★ ★ ★ ★ ★				★ ★ ★
Rating	★ ★ ★ ★ ★				★ ★ ★

(Información extraída de Amazon [8], Disabilitynow [26], Sunrisemedical

[66])

## b. Controladas por rueda media






Tabla 25. Sillas eléctricas controladas por la rueda media

	<b>Golden Technologies Compass Sport</b>	<b>Invacare Pronto M51 with SureStep</b>	<b>Pride Mobility Jazzy 600</b>	<b>Sunrise Medical Guardian Aspire</b>	<b>Sunrise Medical Quickie Aspire</b>
Peso usuario (lb)	300	300		300	300
Velocidad (mph)	4	3		6	6
Alcance (mi)	11.25		25		
Max. grado de inclinación	Respaldo para pies: 35°	9°			
Tubos					
Motor					
Batería	Dos U-1	Cargador 3 amp		Group 22 o Group 24	Group 22 o Group 24
Freno			Freno inteligente		
Llantas	10" flat-free		14" sólidas o neumáticas	14" x 3" Flat Free	14" x 3" Flat Free
Peso sin baterías (lb)					
Peso con baterías (lb)			154	147	160
Precio	\$3399.00	\$3550.00	\$3499.0	\$4895.00	\$4895.00
Imagen					
Durabilidad	★	★★★★★	★★★★★	★★★★★	★★★★
Facilidad de uso	★★★★★	★★★★★	★★★★★	★★★★★	★★★★★
Alcanza expectativas	★	★★★★	★★★★	★★★★★	★★
Rating	★	★★★★	★★★★	★★★★★	★★

(Información extraída de Nextag [51], Amazon [8], Phc-online [54], Shermanoaks Medical [62])

## c. Controladas por rueda delantera

Tabla 26. Sillas eléctricas controladas por la rueda delantera

	Golden Technologies Alante	Hoveround MPV 4	Otto Bock C1000	Pacesaver Scout M1 Convertible	Permobil C300 Corpus
Características especiales			Controles especiales con barbilla, respiración, tablet o de asistencia. Control satelital de área.		
Peso usuario (lb)	300	300			250
Velocidad (mph)	5	5	6.2 – 8.7	4.3	5
Alcance (mi)		15			16
Max. grado de inclinación					Asiento: 45°
Tubos					
Motor					
Batería	U-1, 22NF	Sistema 24-volt	Baterías de gel.		Dos GR34
Freno					
Llantas					
Peso sin baterías (lb)					
Peso con baterías (lb)		188			304
Precio	\$3399.00	\$7200.00	\$4950.00	\$5050.00	\$6595.00
Imagen					
Durabilidad	★★★★	★★★★	★★★★★	★★★★	★★★★
Facilidad de uso	★★★★★	★★★★★	★★★★★	★★★★★	★★★★★
Alcanza expectativas	★★★★	★★★★	★★★★★	★★★★	★★★★
Rating	★★★★	★★★★	★★★★★	★★★★	★★★★

(Información extraída de Marc's Mobility [41], SImember [65] y

Shermanoaks Medical [63])

6. Análisis FODA. Para desarrollar estrategias administrativas efectivas se debe tener en cuenta las competencias distintivas en el producto. Se debe determinar qué está haciendo la competencia o qué se está desarrollando en tecnología. Se deben examinar los factores críticos que pueden tener efectos positivos o negativos en el producto. Para hacer este análisis el FODA es un buen acercamiento.

a. FORTALEZAS

- Existen suficientes recursos financieros asignados al desarrollo y operación de la silla de ruedas.
- El producto es atractivo a la población que sufre de SCI y que envejece.
- Creación de un producto innovador y altamente diferenciado.
- Buenas habilidades competitivas.
- Proyectos de desarrollo anteriores de la Universidad Del Valle de Guatemala tienen buena reputación.
- Tecnología avanzada.
- Habilidades de innovación.

b. OPORTUNIDADES

- Oportunidad de capitalizarse financieramente.
- Desarrollar una admirable y excepcional reputación que puede tener valor monetario en el futuro.
- Oportunidad de crecimiento en el mercado internacional.
- Tendencia de crecimiento del mercado.
- Entrada de nuevas tecnologías y competidores al mercado.

#### c. DEBILIDADES

- El producto tiene una línea de producto limitada o nula y por esto no puede expandirse a otros mercados.
- Precios altos pueden alejar clientes potenciales.
- Estrategia promocional pobre.

#### d. AMENAZAS

- Riesgo a no estimar y llegar al mercado objetivo.
- Productos sustitutos.
- Vulnerable a un ciclo de negocio.

### 7. Plan de ventas

a. Precio de venta. Con los resultados obtenidos en la investigación de la oferta de sillas de eléctricas, específicamente de las controladas por la rueda trasera (ver Tabla No. 20), fue posible obtener una guía para establecer el precio de venta tomando como referencia el precio promedio de éstas (ver Tabla No. 22), e incluyendo el valor agregado del control electroencefalográfico. Se determinó un precio de venta de \$10,000.

Tabla 27. Sumario de oferta de sillas de ruedas eléctricas

<b>Silla</b>	<b>Precio</b>	<b>Peso de soporte (lb)</b>	<b>Velocidad (mph)</b>	<b>Alcance (mi)</b>	<b>Peso de la silla (lb)</b>
Rueda trasera	\$6,500	300	6	15	200
Rueda media	\$4,000	200	5	18	150
Rueda delantera	\$5,500	300	6	15	250

b. Promoción y publicidad. El mercadeo indirecto consiste en la exposición del producto en medios de comunicación masiva como prensa, revistas e Internet enfocado básicamente para llegar a los parientes y amigos de los pacientes. Los costos de este ascienden a \$1200.00 aproximadamente. El desglose de estos se puede observar en la sección de costos fijos del Análisis Técnico.

El mercadeo directo consistirá en el contacto directo con pacientes vía correo electrónico. Así como la exposición del producto en revistas médicas exclusivas para discapacitados y conferencias anuales. Se cotizó específicamente con Closing The Gap, una organización de Estados Unidos que brinda información de asistencia médica con una revista bimensual y una conferencia anual en el mismo país. Se eligió, para el Análisis Técnico, publicidad en la revista una vez al año en página completa y una tarifa de un expositor regular en la conferencia (ver Tabla No. 28 y No. 29).

Tabla 28. Tarifas de publicidad en revista Closing The Gap

<b>Print Ad Size</b>	<b>1x</b>	<b>2x</b>	<b>4x</b>	<b>6x</b>	<b>6x 2011 Exhibitor</b>
Center Spread	\$4,868	\$4,430	\$3,942	\$3,894	\$2,921
2-Page Spread	\$3,843	\$3,509	\$3,112	\$3,074	\$2,306
Back Cover	\$2,846	\$2,604	\$2,306	\$2,277	\$1,822
Inside Front Cover	\$2,505	\$2,298	\$2,029	\$2,004	\$1,603
Full Page	\$2,250	\$2,070	\$1,823	\$1,800	\$1,530
2/3 Page	\$1,978	\$1,825	\$1,602	\$1,581	\$1,377
½ Page	\$1,277	\$1,181	\$1,035	\$1,022	\$920
1/3 Page	\$728	\$674	\$589	\$582	
¼ Page	\$553	\$513	\$480	\$464	

(Tabla adaptada de la revista Closing de Gap [19])

Tabla 29. Tarifas de exhibición en la conferencia anual de Closing The Gap

<b>Description</b>	<b>On or before december 1, 2010</b>	<b>After december 1, 2010</b>
2010 Return-Exhibitor Rate	\$1695	\$1895
Standard Exhibitor Rate		\$1895
first-Time Exhibitor Rate		\$1695
Non-Profit Rate		\$1595

(Tabla adaptada de la revista Closing de Gap [19])

## D. Análisis técnico

## 1. Costos

Tabla 30. Materiales directos

Material	Cantidad	Costo unitario	Costo total	
Motor	1	\$279.99	\$279.99	Q2,180.97
Servo	4	\$203.98	\$815.92	Q6,355.57
Servo	1	\$162.94	\$162.94	Q1,269.21
Engranajes	30	\$4.30	\$129.00	Q1,004.84
Cables	4	\$4.25	\$17.00	Q132.42
Llantas	4	\$19.99	\$79.96	Q622.84
Ejes	6	\$6.88	\$41.28	Q321.55
Controladores	4	\$29.99	\$119.96	Q934.42
Controladores	4	\$49.99	\$199.96	Q1,557.58
Conjinetes	56	\$7.99	\$447.44	Q3,485.31
Sensor	6	\$29.99	\$179.94	Q1,401.63
Módulos inalámbricos	2	\$32.00	\$64.00	Q498.52
Módulos inalámbricos	2	\$12.99	\$25.98	Q202.37
Baterías	2	\$342.45	\$684.90	Q5,334.99
Cargador de batería	1	\$36.95	\$36.95	Q287.82
Gorra de electrodos	1	\$245.00	\$245.00	Q1,908.42
Electrodo	1	\$20.00	\$20.00	Q155.79
Perfiles de aluminio	6		Q135.00	\$103.99
Polímeros	4		Q600.00	\$308.11
PCB	4	\$36.61	\$146.44	Q1,140.69
Modulo Open EEG	1	\$413.65	\$413.65	Q3,222.11
<b>TOTAL</b>			<b>\$3,962.32</b>	<b>Q30,864.26</b>

Tabla 31. Mano de obra directa

Operación	Costo			
	Escala		Real	
Máquinado de 8 triángulos	\$359.46	Q2,800.00	\$718.92	Q5,600.00
Maquinado de ejes e instalación de ruedas	\$64.19	Q500.00	\$128.38	Q1,000.00
Ingeniero Módulo potencia			\$500.00	Q3,894.73
Ingeniero Módulo mecánica			\$500.00	Q3,894.73
Ingeniero Módulo comunicación			\$500.00	Q3,894.73
Ingeniero Módulo conciencia			\$500.00	Q3,894.73
<b>TOTAL</b>	<b>\$423.65</b>	<b>Q3,300.00</b>	<b>\$2,847.30</b>	<b>Q22,178.90</b>

2. Gastos fijos. Los gastos fijos de la operación se consideran todos aquellos que no dependen de la cantidad de sillas vendidas al mes. Entre ellos se incluye el alquiler de una ofibodega. Ésta se elige como la opción de instalación de la potencial empresa debido a que construir una planta propia implicaría una inversión inicial alta que podría arriesgar la rentabilidad del proyecto. Además se incluyen los sueldos y salarios del personal administrativo que incluye el Gerente General encargado de la planificación, organización, dirección y control de la operación; del Gerente de Mercadeo y Ventas encargado de la planificación y ejecución de las ventas; y del Gerente de Contabilidad y Finanzas encargado del control contable y financiero de la operación. En la Figura No. 27 se puede observar el organigrama de la empresa.

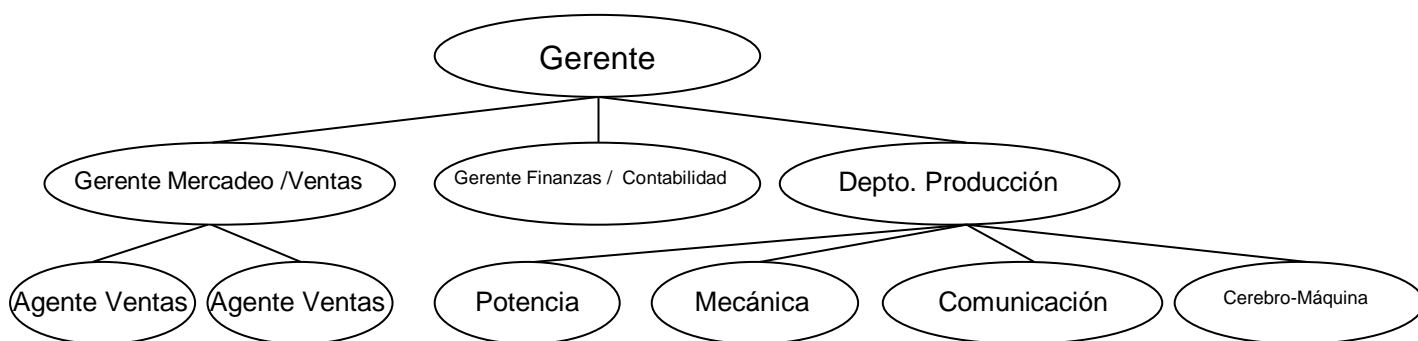
A su vez se incluyen los gastos de mercadeo directo que incluye el contacto directo con clientes potenciales y sus familias a través de la

plataforma de Internet y el mercadeo indirecto que incluye la publicidad en los medios de comunicación de prensa, revistas e Internet, y la promoción en convenciones.

Tabla 32. Costos fijos mensuales

Descripción	Costo			
	Desgloce		Totales	
<b>Alquiler ofibodega</b>			Q8,000.00	\$1,027.03
<b>Sueldos y salaries</b>			Q8,500.00	\$1,091.22
Gerente General	Q3,000.00	\$385.14		
Gerente de Mercadeo / Ventas	Q2,500.00	\$320.95		
Gerente de Finanzas / Contabilidad	Q3,000.00	\$385.14		
<b>Mercadeo</b>			Q9,357.27	\$1,201.28
Preaso	Q1,666.67	\$213.96		
Revistas Internacionales	Q1,460.52	\$187.50		
Internet	Q5,000.00	\$641.89		
Convenciones	Q1,230.08	\$157.92		
<b>TOTAL</b>			Q25,857.27	\$3,319.52

Figura 27. Organigrama de la empresa



## 3. Análisis del Costo Volumen Utilidad (CVU)

Tabla 33. Análisis CVU

<b>Análisis CVU</b>		
Materiales Directos	\$4,522.41	Q35,227.05
Mano de Obra Directa	\$2,847.30	Q22,178.90
<b>COSTO PRIMARIOS</b>	\$7,369.71	Q57,405.95
Costos Indirectos de Fabricación		
<b>TOTAL CARGAS A LA PRODUCCIÓN</b>	\$7,369.71	Q57,405.95
Variación de productos en proceso		
<b>COSTO DE PRODUCTO MANUFACTURADO</b>	\$7,369.71	Q57,405.95
Variación de productos terminados		
<b>COSTO TOTAL</b>	\$7,369.71	Q57,405.95
	<b>Tasa de cambio</b>	7.78945

4. Margen de utilidad. El margen de utilidad unitario se calcula a partir del precio de venta y los costos variables que incluye el costo total de manufactura calculado (Ver Tabla No. 33) y el gasto de ventas que es la comisión unitaria que recibe el vendedor por venta.

Tabla 34. Margen de utilidad

	Precio de venta	\$10,000.00	Q77,894.50
Costo variable	Costos bienes vendidos (-)	\$7,369.71	Q57,405.95
unitario	Gastos de ventas (-)	\$200.00	Q1,557.89
	Utilidad unitaria	\$2,430.29	\$18,930.66
	Margen de utilidad	24.30%	24.30%

5. Punto de equilibrio. De acuerdo a la ecuación presentada en el Marco Teórico se calculó el punto de equilibrio mensual (Q) a partir de cada uno de los parámetros: costos fijos (CF), precio de venta (r), costo variable (v). Se calculó el punto de equilibrio de los primeros cinco años de operación donde mensualmente debe pagarse, como parte del costo fijo, el principal y los intereses (ver Tabla No. 40) del préstamo adquirido a cinco años para la inversión inicial. Y se calculó el punto de equilibrio de los siguientes cinco años sin tomar en cuenta éste pago de principal debido a que ya ha sido cancelado al finalizar el quinto año. Los costos variables se suponen como los calculados en el margen de utilidad (ver tabla No. 34) y el precio de venta como \$10,000.

Tabla 35. Punto de equilibrio mensual años 1-5

<b>CF</b>	\$3,604.21	Q28,074.84
<b>R</b>	\$10,000.00	\$77,894.50
<b>V</b>	\$7,569.71	\$58,963.84
<b>Q</b>	1.48	1.48

Tabla 36. Punto de equilibrio mensual años 6-10

<b>CF</b>	\$3,319.52	Q25,857.27
<b>R</b>	\$10,000.00	Q77,894.50
<b>V</b>	\$7,569.71	Q58,963.84
<b>Q</b>	1.37	1.37

## E. Análisis financiero

### 1. Horizonte de planeación

a. Análisis del periodo de recuperación. Se tomó el periodo de recuperación como una referencia del horizonte de planeación mínimo a considerar en el proyecto. Después de determinar la inversión inicial y la TMAR (ver incisos 2 y 3 de esta sección), se obtuvo un periodo de recuperación de 7 años y 4 meses. Puede observarse en la tabla No. 37 que la fila resaltada señala que a los 7 años y 4 meses se recupera la inversión con un VPN positivo. El detalle del mes del octavo año donde se recupera exactamente la inversión se observa en la tabla No. 38 donde la fila resaltada muestra que el cuarto mes se acumula lo necesario para alcanzar un VPN positivo.

Tabla 37. Periodo de recuperación de inversión

<b>Año</b>	<b>Flujo</b>	<b>VP</b>	<b>VPN</b>	<b>VF</b>
0	-\$14,052.47	-\$14,052.47	-\$14,052.47	
1	\$1,539.72	\$1,469.94	-\$12,582.53	
2	\$1,487.48	\$1,355.71	-\$11,226.82	
3	\$1,431.64	\$1,245.68	-\$9,981.14	
4	\$1,371.97	\$1,139.66	-\$8,841.48	
5	\$1,308.18	\$1,037.42	-\$7,804.06	
6	\$4,656.27	\$3,525.20	-\$4,278.85	
7	\$4,656.27	\$3,365.44	-\$913.42	
<b>7 años y 4 meses</b>	<b>\$1,592.29</b>	<b>\$1,087.93</b>	<b>\$174.51</b>	<b>\$1,576.67</b>
8	\$4,656.27			
9	\$4,656.27			
10	\$4,656.27			

Tabla 38. Mes del año 8 de recuperación de inversión

<b>Mes en año 8</b>	<b>Anualidad</b>	<b>VP año 8</b>	<b>VPN año 8</b>
1	\$398.07	\$396.50	\$396.50
2	\$398.07	\$394.94	\$791.45
3	\$398.07	\$393.39	\$1,184.83
<b>4</b>	<b>\$398.07</b>	<b>\$391.84</b>	<b>\$1,576.67</b>
5	\$398.07	\$390.29	\$1,966.96
6	\$398.07	\$388.75	\$2,355.71
7	\$398.07	\$387.22	\$2,742.93
8	\$398.07	\$385.70	\$3,128.63
9	\$398.07	\$384.18	\$3,512.81
10	\$398.07	\$382.66	\$3,895.47
11	\$398.07	\$381.15	\$4,276.62
12	\$398.07	\$379.65	\$4,656.27

b. Criterios en literatura. Luego de tomar el periodo de recuperación como una referencia del horizonte de planeación mínimo se optó por elegir el criterio que recomendaba la literatura de diez años. [23]

2. Inversión inicial. La inversión inicial se calculó a partir de los requerimientos mínimos de equipo necesario para iniciar la operación de la empresa. Ésta se muestra en la Tabla No. 39. Se supone que se adquiere un préstamo bancario con esta cantidad para poder cubrir esta inversión a un plazo de cinco años y a la tasa de interés activa en moneda internacional del Banco de Guatemala del 6.88%. [16]

Tabla 39. Inversión Inicial

Equipo	Costo	Flete interno	Flete externo	Seguro	Impuestos	Total
Soldador 90 Amp Flux Wire Welder	\$141.20	\$29.49	\$165.00	\$1.71	\$82.48	\$419.87
Licencia Altium Designer	\$4,995.00	-	-	-	-	\$4,995.00
Equipo de computación Dell Vostro 360	\$4,800.00	-	-	-	-	\$4,800.00
Multímetro Equus 3340 Automotive Digital	\$69.95	\$6.26	\$7.26	\$0.76	\$23.85	\$108.08
Fuente de voltaje DC Power Supply 0 - 300 V (230 V, 50/60 Hz)	\$1,054.00	\$0.00	\$26.73	\$10.54	\$315.45	\$1,406.72
Generador de funciones B+K Precision 4040A 20 MHz with Frequency Counter	\$650.00	\$28.00	\$33.00	\$6.78	\$206.01	\$923.79
Osciloscopio Tektronix Digital 40 MHz, 2 Ch., B&W, TDS1001B	\$1,000.00	\$0.00	\$79.20	\$10.00	\$309.81	\$1,399.01
<b>TOTAL</b>						\$14,052.47

Tabla 40. Préstamo bancario para el financiamiento de la inversión inicial

<b>Préstamo</b>	\$14,052.47
<b>Periodo</b>	5
<b>Tasa de interés</b>	0.06880
<b>Anualidad</b>	\$3,416.26

Año	Saldo inicial	Pago	Pago intereses	Pago principal	Saldo final
0					\$14,052.47
1	\$14,052.47	\$3,416.26	\$966.81	\$2,449.45	\$11,603.02
2	\$11,603.02	\$3,416.26	\$798.29	\$2,617.97	\$8,985.05
3	\$8,985.05	\$3,416.26	\$618.17	\$2,798.09	\$6,186.95
4	\$6,186.95	\$3,416.26	\$425.66	\$2,990.60	\$3,196.35
5	\$3,196.35	\$3,416.26	\$219.91	\$3,196.35	\$0.00

3. Determinación de TMAR. INNOVA se financiaría completamente con un préstamo bancario para cubrir su inversión inicial. La tasa activa de préstamos bancarios (promedio ponderado) en moneda nacional del Banco de Guatemala [16] al 1 de septiembre del 2011 es del 13.54%. Mientras que la tasa activa préstamos bancarios (promedio ponderado) en moneda extranjera del Banco de Guatemala [16] al 1 de septiembre del 2011 es del 6.88%. Tomando como referencia un préstamo en quetzales y la tasa de impuestos del 31% del ISR, la TMAR de INNOVA es:

$$TMAR_{después\ de\ impuestos} = (\% \text{ deuda})(\text{costo de capital deuda})(1 - \% \text{ impuestos})$$

$$TMAR_{después\ de\ impuestos} = (1)(0.1354)(1 - 0.31) = 0.0934 = 9.34\%$$

$$TMAR_{después\ de\ impuestos} = (1)(0.0688)(1 - 0.31) = 0.0475 = 4.75\%$$

4. Estados financieros. Se calculó el Estado de Resultados de los diez años del horizonte de planeación con ventas esperadas de 19 sillas anuales. Se puede observar que con esta cantidad de ventas se obtiene una utilidad neta positiva en todos los años y e idealmente no existen pérdidas.

Tabla 41. Estado de Resultados con ventas esperadas de 19 sillas anuales

Rubro / Año	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ventas	\$190,000.00	\$190,000.00	\$190,000.00	\$190,000.00	\$190,000.00	\$190,000.00	\$190,000.00	\$190,000.00	\$190,000.00	\$190,000.00
Compras (-)	\$85,925.71	\$85,925.71	\$85,925.71	\$85,925.71	\$85,925.71	\$85,925.71	\$85,925.71	\$85,925.71	\$85,925.71	\$85,925.71
Mano de obra directa (-)	\$54,098.70	\$54,098.70	\$54,098.70	\$54,098.70	\$54,098.70	\$54,098.70	\$54,098.70	\$54,098.70	\$54,098.70	\$54,098.70
Utilidad bruta	\$49,975.59	\$49,975.59	\$49,975.59	\$49,975.59	\$49,975.59	\$49,975.59	\$49,975.59	\$49,975.59	\$49,975.59	\$49,975.59
Gastos de ventas (-)	\$3,800.00	\$3,800.00	\$3,800.00	\$3,800.00	\$3,800.00	\$3,800.00	\$3,800.00	\$3,800.00	\$3,800.00	\$3,800.00
Gastos administrativos (-)	\$39,834.30	\$39,834.30	\$39,834.30	\$39,834.30	\$39,834.30	\$39,834.30	\$39,834.30	\$39,834.30	\$39,834.30	\$39,834.30
EBITDA	\$6,341.29	\$6,341.29	\$6,341.29	\$6,341.29	\$6,341.29	\$6,341.29	\$6,341.29	\$6,341.29	\$6,341.29	\$6,341.29
Depreciación	\$905.75	\$905.75	\$905.75	\$905.75	\$905.75	\$905.75	\$905.75	\$905.75	\$905.75	\$905.75
Utilidad operativa	\$5,435.55	\$5,435.55	\$5,435.55	\$5,435.55	\$5,435.55	\$5,435.55	\$5,435.55	\$5,435.55	\$5,435.55	\$5,435.55
Gastos financieros	\$966.81	\$798.29	\$618.17	\$425.66	\$219.91					
Utilidad antes del ISR	\$4,468.74	\$4,637.26	\$4,817.38	\$5,009.88	\$5,215.64	\$5,435.55	\$5,435.55	\$5,435.55	\$5,435.55	\$5,435.55
ISR (31%)	\$1,385.31	\$1,437.55	\$1,493.39	\$1,553.06	\$1,616.85	\$1,685.02	\$1,685.02	\$1,685.02	\$1,685.02	\$1,685.02
Utilidad Neta	\$3,083.43	\$3,199.71	\$3,323.99	\$3,456.82	\$3,598.79	\$3,750.53	\$3,750.53	\$3,750.53	\$3,750.53	\$3,750.53

Se calculó el Flujo de Caja o Efectivo de los diez años del horizonte de planeación con ventas esperadas de 19 sillas anuales. Se puede observar que con esta cantidad de ventas se obtienen flujos positivos en todos los años y e idealmente no existen pérdidas.

Tabla 42. Estado de Flujo de Efectivo / Caja con ventas esperadas de 19 sillas anuales

Rubro / Año	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>Inicial</b>	\$14,052.47	\$0.00	\$1,539.72	\$3,027.20	\$4,458.85	\$5,830.81	\$7,139.00	\$11,795.27	\$16,451.55	\$21,107.82	\$25,764.10
<b>Ventas</b>		\$190,000.00	\$190,000.00	\$190,000.00	\$190,000.00	\$190,000.00	\$190,000.00	\$190,000.00	\$190,000.00	\$190,000.00	\$190,000.00
<b>Total ingresos</b>	\$14,052.47	\$190,000.00	\$191,539.72	\$193,027.20	\$194,458.85	\$195,830.81	\$197,139.00	\$201,795.27	\$206,451.55	\$211,107.82	\$215,764.10
<b>Inversión inicial</b>	\$14,052.47										
<b>Compras</b>		\$85,925.71	\$85,925.71	\$85,925.71	\$85,925.71	\$85,925.71	\$85,925.71	\$85,925.71	\$85,925.71	\$85,925.71	\$85,925.71
<b>Mano de obra directa</b>		\$54,098.70	\$54,098.70	\$54,098.70	\$54,098.70	\$54,098.70	\$54,098.70	\$54,098.70	\$54,098.70	\$54,098.70	\$54,098.70
<b>Gastos de ventas</b>		\$3,800.00	\$3,800.00	\$3,800.00	\$3,800.00	\$3,800.00	\$3,800.00	\$3,800.00	\$3,800.00	\$3,800.00	\$3,800.00
<b>Gastos administrativos</b>		\$39,834.30	\$39,834.30	\$39,834.30	\$39,834.30	\$39,834.30	\$39,834.30	\$39,834.30	\$39,834.30	\$39,834.30	\$39,834.30
<b>Gastos financieros</b>		\$966.81	\$798.29	\$618.17	\$425.66	\$219.91	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00
<b>ISR</b>		\$1,385.31	\$1,437.55	\$1,493.39	\$1,553.06	\$1,616.85	\$1,685.02	\$1,685.02	\$1,685.02	\$1,685.02	\$1,685.02
<b>Préstamo por pagar</b>		\$2,449.45	\$2,617.97	\$2,798.09	\$2,990.60	\$3,196.35	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00
<b>Total egresos</b>	\$14,052.47	\$188,460.28	\$188,512.52	\$188,568.36	\$188,628.03	\$188,691.82	\$185,343.73	\$185,343.73	\$185,343.73	\$185,343.73	\$185,343.73
<b>Cash flow</b>	\$0.00	\$1,539.72	\$3,027.20	\$4,458.85	\$5,830.81	\$7,139.00	\$11,795.27	\$16,451.55	\$21,107.82	\$25,764.10	\$30,420.37

Se calculó el Estado de Resultados de los diez años del horizonte de planeación con ventas esperadas de 19 sillas anuales. Se puede observar que con esta cantidad de ventas las utilidades retenidas aumentan año con año. A su vez se observa la depreciación lineal de los activos en la cuenta de maquinaria y equipos. Por último se observa que en el quinto año se cancela totalmente el préstamo influyendo que en los siguientes años las utilidades sean mayores.

Tabla 43. Balance general con ventas esperadas de 19 sillas anuales

<b>ACTIVOS</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>
Caja	\$1,539.72	\$3,027.20	\$4,458.85	\$5,830.81	\$7,139.00	\$11,795.27	\$16,451.55	\$21,107.82	\$25,764.10	\$30,420.37
Maquinaria y equipo	\$13,146.73	\$12,240.98	\$11,335.23	\$10,429.48	\$9,523.74	\$8,617.99	\$7,712.24	\$6,806.49	\$5,900.75	\$4,995.00
<b>Total activo</b>	\$14,686.45	\$15,268.18	\$15,794.08	\$16,260.30	\$16,662.73	\$20,413.26	\$24,163.79	\$27,914.32	\$31,664.84	\$35,415.37
<b>PASIVOS</b>										
Préstamo por pagar	\$11,603.02	\$8,985.05	\$6,186.95	\$3,196.35	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00
Total pasivo	\$11,603.02	\$8,985.05	\$6,186.95	\$3,196.35	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00
<b>CAPITAL</b>										
Utilidades retenidas	\$3,083.43	\$6,283.14	\$9,607.13	\$13,063.95	\$16,662.73	\$20,413.26	\$24,163.79	\$27,914.32	\$31,664.84	\$35,415.37
<b>Total capital</b>	\$3,083.43	\$6,283.14	\$9,607.13	\$13,063.95	\$16,662.73	\$20,413.26	\$24,163.79	\$27,914.32	\$31,664.84	\$35,415.37
<b>Total pasivo y capital</b>	\$14,686.45	\$15,268.18	\$15,794.08	\$16,260.30	\$16,662.73	\$20,413.26	\$24,163.79	\$27,914.32	\$31,664.84	\$35,415.37

5. Valor Presente Neto. Las suposiciones para la aplicación del análisis VPN son la venta de 19 sillas anuales como ingreso y como egreso el total de egresos anuales reportados en el Flujo de Efectivo (Tabla No. 42). El VPN se obtiene de la siguiente ecuación:

$$VPN = \sum_{t=1}^n \frac{V_t}{(1+k)^t} - I_0$$

Tabla 44. VPN con ventas esperadas de 19 sillas anuales

AÑO	INGRESOS	EGRESOS	FLUJO DE EFECTIVO
0		\$14,052.47	-\$14,052.47
1	\$190,000.00	\$188,460.28	\$1,539.72
2	\$190,000.00	\$188,512.52	\$1,487.48
3	\$190,000.00	\$188,568.36	\$1,431.64
4	\$190,000.00	\$188,628.03	\$1,371.97
5	\$190,000.00	\$188,691.82	\$1,308.18
6	\$190,000.00	\$185,343.73	\$4,656.27
7	\$190,000.00	\$185,343.73	\$4,656.27
8	\$190,000.00	\$185,343.73	\$4,656.27
9	\$190,000.00	\$185,343.73	\$4,656.27
10	\$190,000.00	\$185,343.73	\$4,656.27
<b>VALOR PRESENTE NETO</b>	<b>\$8,295.09</b>		

6. Determinación de TIR. Las suposiciones para la aplicación del análisis TIR son la venta de 19 sillas anuales como ingreso y como egreso el total de egresos anuales reportados en el Flujo de Efectivo (Tabla No. 42). La TIR se obtiene de la siguiente ecuación:

$$VPN = \sum_{t=1}^n \frac{V_t}{(1+TIR)^t} - I_0 = 0$$

Tabla 45. TIR con ventas esperadas de 19 sillas anuales

<b>AÑO</b>	<b>INGRESOS</b>	<b>EGRESOS</b>	<b>FLUJO DE EFECTIVO</b>
0		\$14,052.47	-\$14,052.47
1	\$190,000.00	\$188,460.28	\$1,539.72
2	\$190,000.00	\$188,512.52	\$1,487.48
3	\$190,000.00	\$188,568.36	\$1,431.64
4	\$190,000.00	\$188,628.03	\$1,371.97
5	\$190,000.00	\$188,691.82	\$1,308.18
6	\$190,000.00	\$185,343.73	\$4,656.27
7	\$190,000.00	\$185,343.73	\$4,656.27
8	\$190,000.00	\$185,343.73	\$4,656.27
9	\$190,000.00	\$185,343.73	\$4,656.27
10	\$190,000.00	\$185,343.73	\$4,656.27
<b>TIR</b>	12.87%		

7. Análisis de sensibilidad. Se realizó el análisis VPN y TIR con ventas anuales desde una silla hasta veinticuatro sillas anuales para observar el efecto de estas ventas en la rentabilidad del proyecto. Se puede observar que hasta la venta de 19 sillas anuales se obtiene una rentabilidad positiva.

Tabla 46. Análisis de sensibilidad según ventas

<b>Ventas</b>	<b>VPN</b>	<b>TIR</b>	<b>Decisión</b>
1	-\$227,667.82	-	No rentable
2	-\$214,558.77	-	No rentable
3	-\$201,449.72	-	No rentable
4	-\$188,340.67	-	No rentable
5	-\$175,231.62	-	No rentable
6	-\$162,122.57	-	No rentable
7	-\$149,013.52	-	No rentable
8	-\$135,904.47	-	No rentable
9	-\$122,795.42	-	No rentable
10	-\$109,686.36	-	No rentable
11	-\$96,577.31	-	No rentable
12	-\$83,468.26	-	No rentable
13	-\$70,359.21	-	No rentable
14	-\$57,250.16	-	No rentable
15	-\$44,141.11	-	No rentable
16	-\$31,032.06	-	No rentable
17	-\$17,923.01	-	No rentable
18	-\$4,813.96	-0.34%	No rentable
19	\$8,295.09	12.87%	Rentable
20	\$21,404.14	24.89%	Rentable
21	\$34,513.19	36.53%	Rentable
22	\$47,622.25	48.09%	Rentable
23	\$60,731.30	59.67%	Rentable
24	\$73,840.35	71.32%	Rentable

## F. Comunicación y realimentación con cuadripléjicos

### 1. Realización de la entrevista a Jennifer Fernández

Tabla 47. Síntesis entrevista Jennifer Fernández

<b>Característica</b>	<b>Realimentación</b>
<b>Preferencias</b>	Las personas con discapacidad de las extremidades superiores pueden preferir utilizar sillas de ruedas manuales para ejercitar el resto de su cuerpo, la silla de ruedas eléctrica controlada por encefalografía debería estar orientada a cuadripléjicos y personas que no pueden movilizar su tórax.
<b>Peso</b>	Es un factor determinante en la comodidad de la persona, por lo que se debe tratar de hacer lo más liviana posible sin sacrificar la resistencia.
<b>Diseño</b>	Es de mucha utilidad que la silla sea plegable y pueda doblarse y guardarse con facilidad.
<b>Precio</b>	El precio de una buena silla de ruedas está alrededor de US\$3,000.00.

2. Realimentación con cuadripléjicos. Se contactó a cinco personas particulares con cuadriplejía y paraplejía y las cinco instituciones y empresas administradas para o por cuadripléjicos.

Tabla 48. Contacto con cuadripléjicos

<b>Persona / Fundación</b>	<b>Descripción</b>	<b>Contacto</b>
Simon Roulstone	Cuadripléjico C5/6 que quedó paralizado en 1992 tras un accidente automovilístico, dirige el sitio Apparelyzed para proporcionar apoyo.	contact@apparelyzed.com
Bill Cawley	Quedó cuadripléjico a los 24 años tras un accidente de caída. Ahora es un orador motivacional para cuadripléjicos y un orientador de negocios y vida.	bill@billcawleyspeaks.com
Brian Hucker	Vive en Inglaterra y es un parapléjico T4 tras un accidente deportivo 20 años atrás. Actualmente lleva un negocio que hace tapicería y cubiertas del almohadón de la silla de ruedas.	sales@covers-plus.co.uk
Hilary Lister	Cuadripléjica de 35 años, que únicamente puede mover su cabeza. En el 2005 navegó el Canal Inglés utilizando un sistema de correas que controla las velas y el timón.	toby@hilarylister.com
Richard Fabend	Tiene 66 años y es un cuadripléjico C6 completo, desde hace 11 años mientras vacacionaba. Construye el sitio Handi help que contiene herramientas sencillas e ideas para sobrepasar las frustraciones por las que enfrenta diariamente individuos con discapacidad física. Desea proveer información gratuita.	Handihelp@live.com
Paralinks Wheelchair Nation	Es un sitio que ha recopilado información de SCI por más de 11 años y brinda a la comunidad SCI un lugar para ver a otras personas con discapacidad en situaciones similares para interactuar y compartir experiencias. El sitio fue creado y es mantenido por un cuadripléjico y un parapléjico.	silasslade101@gmail.com
Closing the gap	Fundada por Budd y Dolores Hagen, padres de un niño discapacidad., Closing The Gap provee a padres y educadores, la información para localizar, comparar e implementar tecnología de asistencia.	<a href="http://www.closingthegap.com/contact/">http://www.closingthegap.com/contact/</a>
Madentec	Proveedor de tecnología de asistencia para personas con discapacidades físicas. Esta incluye soluciones para acceder y controlar una computadora o dispositivo de comunicación hands-free. Estas se amoldan a las necesidades de cuadripléjicos, parálisis cerebral, esclerosis múltiple y distrofia muscular.	customerservice@ablenetinc.com
Wheelchair Junkie	Este sitio es operado por Mark E. Smith, un usuario extraordinario de silla de ruedas. El sitio trata de la movilidad, no de empresas manufactureras, por lo que se expresan únicamente las opiniones de usuarios.	msmith@pridemobility.com
ABLEDATA	Provee información objetiva sobre productos de tecnología de asistencia y equipo de rehabilitación disponible de fuentes domésticas e internacionales.	abledata@macrointernational.com

Luego se enviaron las siguientes preguntas para tomar en cuenta en el diseño de la silla y hacer recomendaciones posteriores:

1. What things does your chair already have that you like and are essential?
2. What things does your chair already have that you don't like and you would like you change?
3. What things does your chair don't have and you would like to?

Tabla 49. Síntesis de realimentación

<b>Aspectos presentes deseables</b>	<b>Aspectos presentes indeseables</b>	<b>Aspectos no presentes deseables</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Configuración electrónica para que funciones auxiliares, como reclinarsse, funcionen sin encender la silla.</li> <li>• Llantas todo terreno.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Descansa brazos frágiles y sin resistencia al desgaste diario.</li> <li>• Piernas y estructura de la silla de material de calidad pobre y poca resistencia.</li> <li>• Alta dependencia estructural de la armazón.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Diseño sencillo para que fracturas sean corregidas por amigos y vecinos.</li> <li>• Descansa brazos de material resistente, incluso madera.</li> <li>• Piernas y estructura de la silla de material de alta calidad y resistencia.</li> <li>• Estas partes deberían de ser fácilmente removidas individualmente cuando se fracturan.</li> <li>• Llantas fuertes para todo terreno.</li> <li>• Todas las sillas deberían tener un bracket universal montado en el panel frontal de la silla para permitir adherir piezas de equipo adicional como una mesa, caña de pescar, etc.</li> </ul>

## DISCUSIÓN

Para iniciar el Estudio de Mercado se definió el mercado meta. Éste se limitó a personas con cuadriplejía mayores de 12 años de nivel medio a alto. Se limitó la discapacidad de los usuarios de la silla a cuadriplejía debido a la funcionalidad de la misma. Debido a que es una silla controlada por las señales encefalográficas que emite el usuario, se ajusta exactamente a las necesidades que tiene una persona con cuadriplejía que no puede movilizar ninguna de sus extremidades inferiores o superiores. No necesariamente se excluye el mercado de pacientes con paraplejía, sin embargo, no se dirige el producto hacia este tipo de lesión debido a que como se tiene movilidad en las extremidades superiores, el discapacitado prefiere utilizarlas en una silla de ruedas manual o eléctrica. Se eligió un nivel medio a alto debido a que se ha establecido un precio de venta de \$10,000 lo que supone un poder adquisitivo considerable.

Para la cuantificación de este mercado meta se realizó una investigación del contexto de la discapacidad en Guatemala. Según el XI Censo Nacional de Población y VI de Habitación (INE 2002) el 6.8% de la población presenta una discapacidad. Este porcentaje abarca discapacidades mentales, visuales, auditivas, del lenguaje, del sistema nervioso, musculoesqueléticas, viscerales entre otras; por lo que esta estadística no era suficiente para establecer el tamaño de la población cuadripléjica de Guatemala. Se recurrió a una encuesta más especializada, la Encuesta Nacional de Discapacidad (ENDIS 2005), y se observa que el 22.8% de los discapacitados poseen una limitación musculoesquelética, donde se encuentra la cuadriplejía (ver Tabla No. 16: Distribución de población discapacitada según características). Con esto puede determinarse que el 1.55% de la población posee una discapacidad musculoesquelética, o un equivalente de 227,909 personas.

Sin embargo este porcentaje todavía abarca varias categorías de discapacidades musculoesqueléticas incluyendo cuadriplejía y paraplejía. Para determinar el porcentaje exclusivo de cuadriplejía y paraplejía se

recurrió a una investigación de la prevalencia e incidencia de éstas en el mundo. Se construyó una tabla de la prevalencia en varios países y se promedió el porcentaje para conocer la prevalencia promedio de cuadriplejía y paraplejía en los países del mundo. Se obtuvo un promedio de 0.04% de prevalencia y un 3.15% de incidencia sobre prevalencia, es decir, el 0.04% de la población de un país posee en promedio cuadriplejía o paraplejía, y el 3.15% de esta cantidad resulta con esta lesión cada año. Se aplicó la estadística para Guatemala resultando en una prevalencia de 5,512 cuadripléjicos y parapléjicos, y una incidencia de 174 cada año. Por último para conocer el porcentaje específico de cuadriplejía se realizó el mismo procedimiento para investigar y calcular la proporción de cuadripléjicos y parapléjicos de este porcentaje. Se obtuvo una proporción de 50-50, por lo que se deriva que Guatemala posee 2,756 de cuadripléjicos y una incidencia de 87 nuevos pacientes al año.

La silla de ruedas eléctrica controlada a través de la encefalografía como producto se encuentra entre las etapas del ciclo de vida de nacimiento y crecimiento debido a que se han modelado muy pocas de ellas y el producto sigue en constante desarrollo.

La accesibilidad para introducir un producto como estos es Guatemala se ve limitada debido a que el nivel de vida y poder adquisitivo es bajo. El 51% de la población nacional es pobre (ECOVI, 2006), del cual el 15.20% vive en pobreza extrema y el 35.80% en pobreza no extrema. La mayoría de personas que representan el 49% de la población no pobre, no tiene la capacidad de pago suficiente para cubrir gastos médicos, ni mucho menos el de una silla de ruedas eléctrica. Introducir el producto en Guatemala tendría que estar enfocado en inversión de terceros para personas cuadripléjicas de escasos recursos. Sin embargo puede considerarse una accesibilidad potencialmente mayor en mercados extranjeros como Estados Unidos. Esto porque el nivel de vida e ingresos son altos. Este mercado es más atractivo debido a la mayor

capacidad de pago de las personas, y a su vez, a la mayor cobertura de seguros médicos en la población. Se puede observar que el 97% (ver Tabla No. 23: Gastos y fuente de financiamiento de cuadripléjicos) de cuadripléjicos financian sus gastos con seguro o cuidado médico, medicaid u otro servicio de financiamiento externo y únicamente el 3% se financia con capital propio y otro medio. Por esta razón aún es más accesible el mercado extranjero, donde, en la mayoría, los gastos e inversión médica no se financian por el mismo paciente o familia y esto hace más probable la compra de una silla de ruedas especializada con un precio como el que se estableció.

Es importante notar también que en Estados Unidos, por ejemplo, los gastos de un cuadripléjico en primer año de la lesión gastan alrededor de \$417,000. Una silla de ruedas especializada como la que se ha desarrollado podría formar parte de estos gastos representando menos del 3% de este gasto inicial, e incluso pudiendo ahorrar gastos asociados a la asistencia de terceros, por ser bastante autónoma.

En el Estudio de Mercado, luego de delimitar el mercado meta y cuantificarlo, es necesario extraer una muestra de éste para medir la potencial participación que podría tener la empresa INNOVA en la venta de sillas de ruedas. La población de cuadripléjicos es menor a 100,000 personas en Guatemala por lo que el muestreo se aplica para una población finita. Con un nivel de confianza del 95.5% y un margen de error del 4% se obtiene un tamaño muestral de 541 pacientes. Se puede notar que el tamaño muestral obtenido es relativamente grande y no sería factible ni en tiempo ni en costos. Por esto que se dispuso de un tamaño muestral de  $n = 30$ , una muestra aleatoria simple suficientemente grande estadísticamente para ser representativa. Aún así es una cantidad grande de cuadripléjicos en Guatemala además de que el tipo de elementos muestrales, PERSONAS con estados críticos de salud, resultan poco accesibles y dispersos. Por esta razón se procedió a hacer contacto con cuadripléjicos alrededor del mundo, logrando

contactar a diez. Debido a ser una muestra pequeña, no se procedió encuestar si comprarían o no este producto sino se utilizó su realimentación para aspectos de diseño y ergonomía de la silla. En lugar de determinar una participación determinada o fijar ventas esperadas, se trabajó el Análisis Financiero sujeto a las ventas como variable y se presentaron los estados financieros con el valor mínimo de ventas anuales esperadas para lograr la rentabilidad del proyecto: 19 sillas anuales.

La oferta de sillas de ruedas está segmentada en sillas de ruedas manuales, eléctricas, triciclos de impulsión manual, sillas de ruedas de pie, infantiles y pediátricas, de carretilla, para deportes y sillas de evacuación. A su vez, la oferta de sillas de ruedas eléctricas está segmentada en controladas por la rueda trasera, rueda media y rueda delantera, plegables, todo-terreno y para obesos. Para el análisis de la oferta aplicaron los tipos controladas por la rueda trasera, rueda media y rueda delantera. Las sillas controlados por la rueda trasera tienen un precio promedio de \$6,500, soportan un peso de 300 lb, tienen una velocidad de 6 mph, un alcance de 15 mi, pesan 200 lb. Las sillas controlados por la rueda media tienen un precio promedio de \$4,000, soportan un peso de 300 lb, tienen una velocidad de 5 mph, un alcance de 18 mi, pesan 150 lb. Las sillas controlados por la rueda delantera tienen un precio promedio de \$5,500, soportan un peso de 300 lb, tienen una velocidad de 6 mph, un alcance de 15 mi, pesan 250 lb. Todas éstas con múltiples tipos de batería y distintos diámetros de la rueda. Con estos resultados fue posible obtener una guía para establecer el precio de venta de \$10,000 basado en la oferta de sillas controladas por la rueda trasera e incluyendo el valor agregado del control electroencefalográfico.

La fortalezas del producto como tal son la disponibilidad de recurso humano competitivo y con habilidades de innovación; y que el producto es atractivo y altamente diferenciado. Sus oportunidades son la tendencia de crecimiento de mercado y oportunidad de éste en el mercado internacional. Las debilidades

son principalmente el alto costo de desarrollo y manufactura que representan un alto precio y una estrategia promocional pobre. Y las amenazas son el riesgo a no estimar y llegar al mercado objetivo, la existencia de productos sustitutos y la vulnerabilidad del producto a tener un ciclo de negocio.

Para concluir el Estudio de Mercado se estableció el plan de ventas con el precio de venta ya mencionado y la estrategia de mercadeo. El mercadeo indirecto consiste en la exposición del producto en medios de comunicación masiva como prensa, revistas e Internet enfocado básicamente para llegar a los parientes y amigos de los pacientes. Es indirecto debido a que no está dirigido al consumidor final del producto, el paciente, sino a amigos y familiares que podrían adquirirlo y recomendarlo al paciente. El mercadeo directo consistirá en el contacto directo con pacientes vía correo electrónico. Así como la exposición del producto en revistas médicas exclusivas para discapacitados y conferencias anuales. Estos costos de promoción y publicidad se consideran fijos en el Análisis Técnico debido a que se incurren independientemente de las ventas.

En el Análisis Técnico se establecieron los costos y gastos fijos. Entre los costos se determinaron los costos de materiales directos de \$3,962.32 puestos en Guatemala, y los costos de mano de obra de \$2,847.30 que incluyen el maquinado de piezas y la participación que tiene cada ingeniero en la manufactura por cada silla que se produce. Cabe mencionar que se hizo una estimación del maquinado, tomando como base el maquinado que se realizó en el producto a escala por un factor de 2 para la escala real. Luego se establecieron costos fijos que incluyen el alquiler de una ofibodega para la operación de la empresa, los sueldos y salarios de las plazas administrativas y la promoción y publicidad anteriormente mencionada.

Se llevó a cabo el Análisis CVU y se puede observar que los costos primarios son bastante altos. No se incluyó la variación de productos en

proceso y terminados debido a que se supone se produce a pedido. Después del análisis se determina un costo de manufactura de \$7,369.71. A este se le sumó \$200 de comisión de venta para los agentes de ventas, para dar un total de \$7,569.71 como costo variable unitario y obtener un margen de utilidad del 24.30%. Por último, se analizó cuántas sillas deberían venderse mensualmente con este margen para absorber los costos fijos y resultó en un punto de equilibrio 1.37 sillas al mes.

Para iniciar el Análisis Financiero se calculó la inversión inicial con el equipo mínimo necesario para la operación de la empresa, tanto en la manufactura como en la administración. El costo del equipo se evaluó puesto en Guatemala. INNOVA se financiaría completamente con un préstamo bancario para cubrir esta inversión inicial. A su vez se determinó la TMAR con un 100% de endeudamiento a partir de la tasa activa de préstamos bancarios en dólares (promedio ponderado del Banco de Guatemala) (2) al 1 de septiembre del 2011 de 6.88%. Considerando el efecto del impuesto del ISR del 31% se obtuvo una TMAR 4.75%.

Se estableció un horizonte de planeación de diez años con base en la recomendación de la literatura y la experiencia en evaluación de proyectos y tomando, también, como base el periodo de recuperación de 7 años y 4 meses, para luego de estos observar el rendimiento del negocio luego de recuperar la inversión. Puede observarse que el periodo es relativamente largo debido a que las utilidades netas son bajas en relación a los ingresos y se requieren varios años cubrir la inversión inicial. Nótese que el periodo en el que se salda la deuda de cinco años no es el mismo que el periodo de recuperación debido a que éste último toma como referencia la tasa TMAR que toma en consideración el pago de impuestos sobre utilidades.

Se construyeron los estados financieros a partir del valor mínimo de ventas anuales esperadas para lograr la rentabilidad del proyecto: 19 sillas anuales.

Se observa en el Estado de Resultados una utilidad neta estable a través de los diez años debido a que la operación se supone que es la misma, a excepción que en los primeros cinco años se observa poco menos utilidad debido al pago de intereses del préstamo. Es importante notar que se ha depreciado el equipo linealmente a excepción de la licencia del software, en los diez años para terminar con un valor en libros de cero para todos los equipos. Se puede observar en el Flujo de Efectivo que existen mayores egresos de efectivo en los primeros cinco años por el pago del principal del préstamo, sin embargo año con año la cuenta de Bancos incrementa hasta poseer un saldo final de \$30,420.37 en el décimo año. En el balance general se puede observar el efecto del gasto de depreciación en la disminución del valor en libros de los activos y el mismo efecto de ese gasto en el pasivo y capital reflejado en una disminución de las utilidades retenidas que resultan de las utilidades retenidas de cada mes.

Se llevó a cabo el análisis VPN y TIR a partir del flujo de efectivo. Se obtuvieron estos valores variando las ventas anuales para observar su efecto en la rentabilidad del proyecto en un análisis de sensibilidad. Se puede observar que vendiendo de 1 a 18 sillas anuales el proyecto no es rentable. Es hasta la venta de 19 sillas anuales donde se puede observar el primer VPN positivo de \$8,295.09. A su vez la TIR en este punto es mayor que la TMAR ( $12.87\% > 4.75\%$ ) por lo que este es el punto donde el proyecto empieza a ser rentable. Luego de 19 sillas de venta anuales, se observa un incremento en el VPN y TIR para lograr mayores rentabilidades.

Para la realimentación con el cliente, se contactó a cinco personas particulares con cuádruplejía y paraplejía y las cinco instituciones y empresas administradas para o por cuádruplécicos. Además de una entrevista personal con Jennifer Fernández, una mujer con quebradura completa de médula, en C-12 L-1 con discapacidad de las extremidades inferiores.

Como resultado de esta aproximación se obtienen recomendaciones interesantes. Las personas con discapacidad de las extremidades superiores pueden preferir utilizar sillas de ruedas manuales para ejercitar el resto de su cuerpo, es por esto que la silla de ruedas eléctrica controlada por encefalografía debería estar orientada a cuadripléjicos. Así también factores como el peso de la silla es determinante en la comodidad de la persona, por lo que se debe tratar de hacer lo más liviana posible sin sacrificar la resistencia. Es de mucha utilidad que la silla sea plegable y pueda doblarse y guardarse con facilidad. Las funciones auxiliares de una silla de ruedas eléctrica deberían de funcionar cuando la silla está apagada. Las llantas deberían estar diseñadas para todo terreno. La estructura de la armazón de la silla debería de estar diseñada de tal manera que si una pieza falla o se fractura, pueda reemplazarse individualmente sin cambiar gran parte de la armadura. La estructura de la silla, especialmente los descansa brazos, deben de estar manufacturados de un material flexible y resistente. Se sugiere que las sillas deberían tener un bracket universal montado en el panel frontal de la silla para permitir adherir piezas de equipo adicional como una mesa, caña de pescar, etcétera.

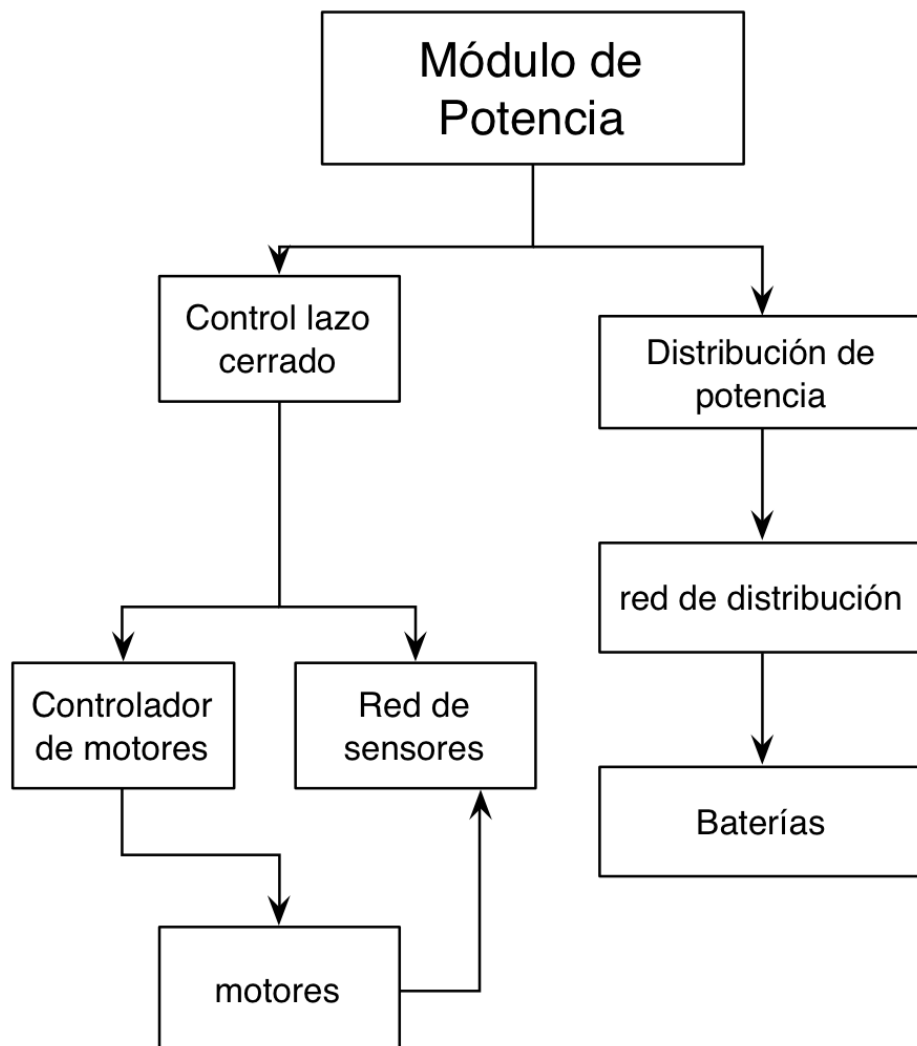
## XII. APÉNDICE B. MÓDULO DE POTENCIA

El módulo de potencia tiene una serie de tareas las cuales pueden ser divididas en secciones, con esto se logra una modularidad del sistema. El desarrollo de los bloques del módulo se realizaron de manera gradual, en la Figura 28, se puede observar el diagrama de bloques del módulo de potencia. Dado que los bloques, que conforman el sistema son dependientes. La forma en que se desarrolló el módulo fue la siguiente:

1. Selección de actuadores
2. Implementación de sistema de distribución de potencial eléctrico
3. Desarrollo de controlador de módulo de potencia
4. Puentes H para motores DC
5. Controlador de motor BLDC
6. Red de retroalimentación del módulo de potencia
7. Desarrollo de aplicación de prueba del módulo de potencia

Cada una de estas siete etapas tiene pasos intermedios, donde las tareas de estos pasos dependieron de los resultados inmediatos, que se dieron en el transcurso del proyecto. El desarrollo del mismo sufrió cambios por razones fuera de nuestro control, por lo que se desarrolló un prototipo a escala de la silla de ruedas.

Figura 28. Diagrama de bloques del módulo de potencia



## SELECCIÓN DE ATUADORES

### A. Diseño experimental

1. Para poder seleccionar los motores adecuados a utilizar en el prototipo de la silla, fue necesario obtener un conocimiento sobre los actuadores disponibles, sus características, fortalezas y debilidades. El proceso se describe de la siguiente manera:

2. Los motores encargados de mover el prototipo deben de tener características básicas. Donde la existencia de un buen par de trabajo, una alta eficiencia y la capacidad de modificar sus características de operación de manera eficiente, eran esenciales.

3. Dada la poca información que se tiene sobre el desarrollo de tecnología de discapacitados, los campos de búsqueda se movieron hacia el área de robótica y modelaje. Donde se buscaron actuadores con características de:

4. Aplicaciones de precisión de movimiento

5. Aplicaciones de potencia de movimiento

6. Después de realizar el análisis preliminar sobre las opciones de motores disponibles en el mercado se decidió profundizar con mayor profundidad en los siguientes tipos de motor:

- a. Motor DC con escobillas (BDC)
- b. Motor DC sin escobillas (BLDC)
- c. Servomotor (giro continuo)

7. Esta elección se realizó tomando en cuenta los parámetros de operación que pueden tener los motores como; eficiencia, costo, torque, complejidad del sistema de control y disponibilidad en el mercado.

## B. Resultados

Los tipos de motores adecuados para utilizar para instalar en el prototipo de la silla son:

1. Motores DC de escobillas (motor BDC): disponible en una amplia variedad de presentaciones donde su potencia y su voltaje de alimentación varían. Este tipo de actuador es muy común en sistemas que utilicen una fuente de alimentación DC.

2. Motores DC sin escobillas (motor BLDC): son el cambio generacional de su versión con escobillas y sus prestaciones de operación son superiores con respecto al motor BDC. Presenta la necesidad de utilizar un sistema de control mucho más complejo donde un microcontrolador es necesario.

3. Servomotores de giro continuo: presentan la cualidad, de ser fáciles de controlar aunque su disponibilidad en cuanto una amplia variedad de tamaños es reducida. La principal característica del mismo es que, el torque de salida que presentan con respecto de su tamaño es elevado.

Un aspecto fundamental es la complejidad del sistema que establece la operación del motor, que tipo de requerimientos de hardware necesita el actuador para trabajar y variar sus características de trabajo. Los requerimientos para los actuadores adecuados para utilizar en la aplicación son los siguientes:

1.Motores BDC: de fácil control, es posible hacerlos funcionar mediante un puente H. Donde es posible modificar de manera eficiente la velocidad de giro y el sentido del mismo de un motor BDC.

2.Motor BLDC: la necesidad de utilizar un microcontrolador es total, para poder hacer trabajar este tipo de motor. Aunque una vez se establece el sistema de control del motor el rendimiento de este actuador es muy superior con respecto a un motor de tamaño equivalente BDC.

3.Servomotores de giro continuo: dado que son servos modificados, el control de los mismos es igual al de los servos convencionales. Una señal de PWM, establece el las condiciones de trabajo del actuador.

En la Tabla 50 es posible observar una comparación de características del de los motores BLDC versus motores BDC.

Tabla 50. Comparación de características de motores BLDC versus motores BDC

Categoría	Motor BLDC	Motor BDC
Conmutación	Conmutación electrónica basada en sensores de posicionamiento hall	Conmutación con escobillas
Mantenimiento	Es menos requerido no hay desgaste de escobillas	El mantenimiento periódico es requerido
Vida útil	Alta	Baja
Características torque/velocidad	Permite operación a distintos rangos con carga nominal	a moderado a mayor velocidad la fricción en las escobillas es mayor y se reduce el torque
Eficiencia	Alta no hay perdidas de voltaje por escobillas	moderada
Output Power/ Frame Size	Alto debido a que tiene una mejor disipación de calor	Bajo debido a que el calor se origina en el rotor y cuesta más disiparlo
Inercia de rotor	Baja debido a los imanes permanentes en el motor presenta buena respuesta dinámica	Alta debido a los componentes mecánicos y tiempo de respuesta de los bobinados en el rotor
Rango de velocidad	Alta no hay limitaciones mecánicas como las escobillas	baja debido a las limitaciones mecánicas creadas por las escobillas
Ruido eléctrico	Bajo	Alto por los arcos en las escobillas
Costo de construcción	Alto el costo de los imanes permanentes y sensores	Bajo
Control	Complejo y costoso	Sencillo y barato

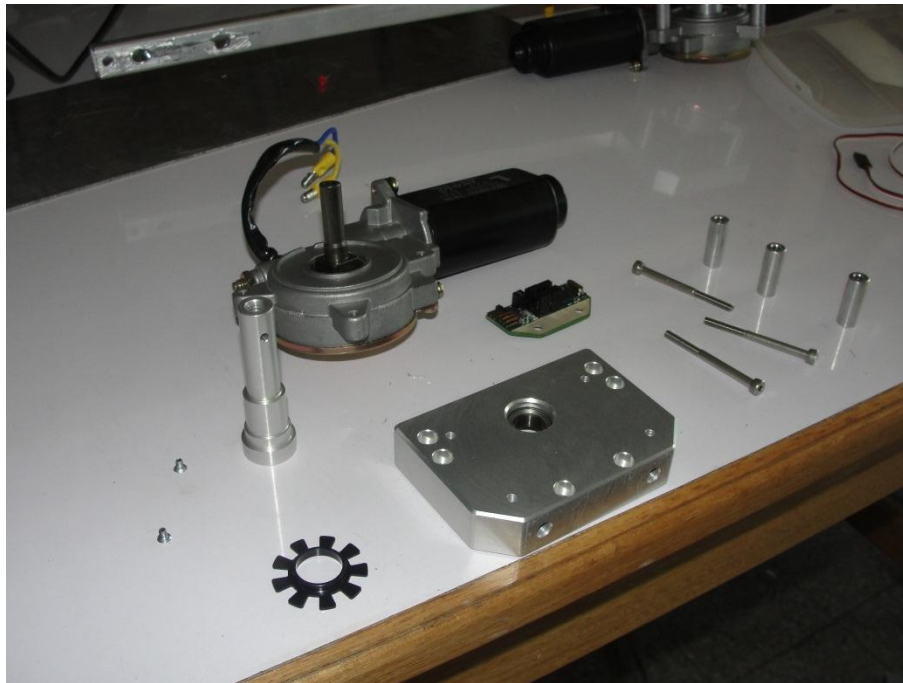
Se eligieron motores para dar movimiento al prototipo de la silla de ruedas y los sistemas mecánicos que conformaban la silla de ruedas; este proceso se realizó tanto para el caso de que el prototipo de la silla se realizara a escala y para el caso de que la silla se realizara a escala real. El prototipo a escala real fue el que se terminó implementando.

1. Motores DC. Estos actuadores están a cargo de dar el movimiento sobre el plano x-y al prototipo de la silla de ruedas a escala. Con estos motores, la silla de ruedas es capaz de avanzar, retroceder, girar hacia la izquierda y girar hacia la derecha.

Como motores DC se decidió utilizar, Motor Mount and Wheel Kit (#27971). Producido por PARALLAX, dentro de las razones de la elección de estos motores están:

- a. Cumple con los requerimientos de mecánicos para darle movimiento al prototipo de la silla.
- b. Presenta un consumo de corriente adecuado y una velocidad de giro conveniente para dar movimiento al prototipo de la silla de ruedas.
- c. Trabajan con un voltaje nominal de 12VDC, donde es posible variar este voltaje de alimentación para obtener una velocidad variable.
- d. El motor está diseñado para trabajar en aplicaciones similares, por lo cual presenta facilidad para ser instalado en el prototipo de la silla de ruedas.
- e. Éste posee una base, ideal para instalar en la estructura de la silla; además esta base está adecuada para la instalación de los encoders, necesarios para implementar el sistema de control de motores.

Figura 29. Componentes del motor mount and wheel kit



2. Servo-Motor de Giro Continuo. Dados los requerimientos del módulo de mecánico para el prototipo a escala, debía de haber un actuador el cual proveyera de torque al mecanismo para subir gradas del prototipo de la silla de ruedas. Éste debía tener un elevado torque, presentando una baja inercia y la capacidad de controlar su funcionamiento (velocidad y sentido de giro) de manera adecuada.

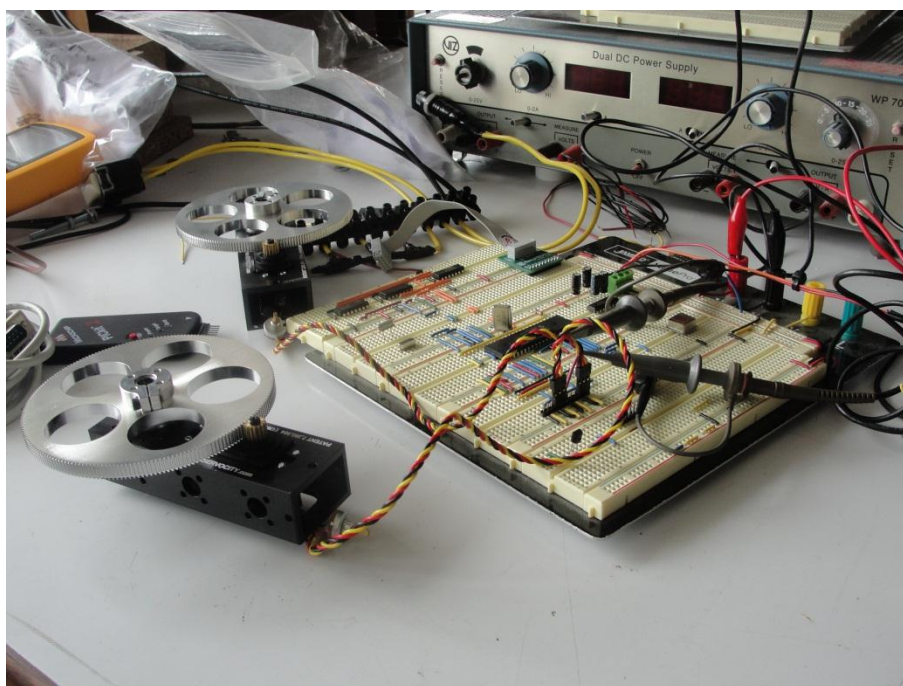
Se escogió al servomotor de giro continuo HS-7955TG, producido por HITEC, este actuador provee el torque necesario para el proyecto. Esto se realiza mediante una caja reductora, con una relación de 13.5 a 1. Es actuador es capaz de proveer, la potencia mecánica necesaria para hacer trabajar los mecanismos para subir gradas.

Las características operacionales de los servomotores seleccionados, es posible observarlas en la Tabla 5, dentro de las características a destacar está el bajo consumo de corriente que tiene el actuador, comparado con el torque que se lleva alcanzar en el eje de salida de la caja reductora.

Figura 30. Características de servos HS-7955TG

Característica	Valor
Sistema de control:	control por ancho de pulso
Pulso requerido:	4.8 – 6 VDC voltaje pico-pico
Temperatura de operación:	-20° C – 60° C
Velocidad de operación:	0.19seg/60° (4.8VDC) 0.15 seg/60° (6VDC)
Torque máximo:	250 oz/in (4.8VDC) 333 oz/in(6VDC)
Consumo de corriente:	222 mA(4.8VDC) 300mA(6VDC)

Figura 31. Servos HS-7955TG durante el proceso de pruebas



Estos servomotores son modificados de manera tal que puedan girar de manera continua. Aunque se pierde el control de lazo cerrado de posición, se conserva el control de velocidad. Los cambios en la velocidad de giro del actuador no se hacen tan evidentes dada la presencia de una caja reductora con una relación de 13.5 a 1.

La presencia de la caja aumenta el torque considerablemente y esto es necesario para el tipo de tarea que debe de cumplir en el prototipo.

3. Motores BLDC. Dado que la construcción del prototipo se dio en escala 1:2, las prestaciones extras presentadas por los motores BLDC ya no son necesarias. El precio extra que tienen estos actuadores y la complejidad extra del implementar un controlador para estos motores se justifica en el momento en que se necesita un gran par mecánico de trabajo, como el que sería necesario cuando el prototipo se realice a escala real.

Se estableció a BODINE-ELECTRIC como compañía encargada de proveer los actuadores de este tipo. Donde la familia de actuadores a utilizar sería la 34B-E and 34B-F Series Parallel Shaft BLDC Gearmotor. Esta línea de motores es la que mayor par de trabajo presenta para un consumo de potencia eléctrica de  $\frac{1}{4}$  de HP. Donde los torques de salida del motor llegan a estar en el orden de los 310 libras por pulgada. Dicho torque es el más alto que se encontró para un motor de  $\frac{1}{4}$  de HP en todo el mercado, con una alimentación de 24VC.

### C. Discusión

La búsqueda inicial de motores se dio sin conocer los requerimientos mecánicos específicos que iba a tener el prototipo. Solo se destacaba la búsqueda de eficiencia y un alto torque de operación.

Por esto el motor BDC y el motor BLDC parecían ser las opciones más viables, por un lado los motores BDC son uno de los tipos de actuador más comunes de ver en la mayoría de aplicaciones de robótica, donde se requiera una cantidad de torque considerable.

Por su parte el motor BLDC es el motor que viene como cambio generacional, a los motores con escobillas. El porqué del hecho tiene que ver con que el

actuador presenta un rendimiento superior, en cuanto a la eficiencia que tiene el motor. Además gracias a su diseño y la tecnología de los materiales de los que se confeccionan, es posible obtener mayor torque de salida, que un motor BDC equivalente en consumo eléctrico. Su vida útil es mayor debido a que no utiliza componentes mecánicos para el proceso de conmutación de bobinas, debe mencionarse de igual manera que el ruido eléctrico que produce es nulo en comparación de los motores BDC. Este tipo de actuador es el más utilizado en las nuevas aplicaciones de transporte; como los son los carros híbridos.

La selección de un tipo de motor y que este tipo de motor tenga especificaciones operacionales específicas se debe a los requerimientos que se dan por parte del módulo de mecánica. Partiendo de los requerimientos dados por el módulo de mecánica los cuales son:

1. Datos de torque necesario para movimiento plano 68 lb\*pul [20].
2. Datos sobre torque necesario para que funcione el mecanismo de subir y bajar grada 137.5 lb\*pul [20].
3. Partiendo de estos requerimientos mecánicos se tomó la decisión de selección de actuadores para el modelo a escala. Los motores DC darán el movimiento en el plano X-Y al prototipo. Además el mecanismo para subir y bajar gradas obtendrá su potencia, mediante servomotores de giro continuo.

Para el caso en el que la silla se realice a escala real los motores que estarán a cargo de dar movimiento en el plano X-Y y al mecanismo para subir y bajar gradas, son motores BLDC. Esto dado que la implementación a escala real necesita mayor potencia y justifica el gasto económico extra que se realiza por estos motores.

## IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN DE POTENCIAL ELÉCTRICO

### A. Diseño experimental

La distribución del potencial eléctrico se debe realizar teniendo como meta; resguardar la integridad de los usuarios del prototipo de la silla y del sistema mismo. Es por esta razón que el proceso de distribuir el potencial eléctrico se debe realizar tomando ciertas medidas de precaución. Para lo cual es necesario;

1. Utilizar el conductor eléctrico apropiado en las distintas partes del circuito.
2. Instalar dispositivos de protección (fusibles) para el circuito.
3. Realizar las conexiones de los dispositivos que conforman el sistema utilizando terminales y borneras para buscar la seguridad del sistema
4. Realizar todas las escalas de voltaje necesarias para que funcione el prototipo de la silla de ruedas

El sistema de distribución de potencia de la silla de ruedas debe tener distintos voltajes dentro de los cuales están:

1. Alimentación para motores DC(14VDC)
2. Alimentación para servomotores (6VDC)
3. Alimentación de control (5VDC)

La alimentación de potencia del sistema parte de las baterías escogidas para proveer del potencial eléctrico al prototipo de la silla

### B. Resultados

El sistema de distribución de potencia debe proveer de alimentación eléctrica a todos los elementos del prototipo de la silla que la requieran. Para esto se debe

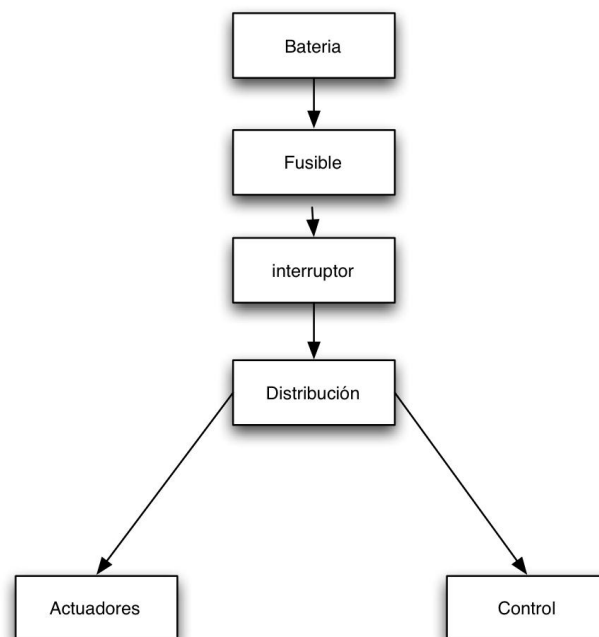
tener en cuenta que esto se debe realizar de manera segura. Por lo cual debe de haber una etapa de seguridad entre la batería y elementos eléctricos del sistema. La forma en que los elementos se conectaron se observa en la Figura 32.

Las características de las baterías de polímero de litio (8 celdas) son las siguientes:

Tabla 51. Características de las baterías compradas para el prototipo

parámetros	Descripción
Voltaje VDC	14.8(nominal) 16.8 pico 11 (corte)
Capacidad	25.2 Ah ( 372.6 Wh)
Terminales	14 AWG carga y descarga
Peso	4.1 lbs
Tasa máxima de descarga	14 amperios

Figura 32. Organización del sistema de distribución de potencial eléctrico



Esta organización para trabajar con la batería se siguió desde el inicio de las pruebas donde fue necesaria la utilización de la misma. En la primera etapa esta organización se realizó según lo indica la Figura 33.

Figura 33. Sistema de distribución preliminar para pruebas iniciales



La conexión de los dispositivos se realizó utilizando un calibre de conductor según fuera su tasa de consumo eléctrico. Todas aquellas conexiones principales dentro de las cuales están:

1. Conexión de batería a fusible,
2. Conexión de fusible a interruptor principal
3. Conexión del interruptor principal al bloque de bornera

Estas conexiones se realizaron utilizando un conductor de calibre 14 AWG el cual está capacitado para manejar hasta 20 amperios, se está utilizando un conductor que no presentara sobre calentamiento, ante el amperaje pico que maneja el sistema de distribución de potencia que son 14 amperios.

Por su parte los motores DC instalados en el sistema fueron conectados utilizando cables de calibre 18 AWG, con este calibre se maneja de manera sobredimensionada los 3 amperios como máximo que consumen los motores cuando operando con carga. De igual manera la distribución se realizó utilizando borneras dimensionados de acuerdo al calibre de conductor utilizado. En la Figura 34 se puede observar el detalle.

Figura 34. Detalle de conexión de motores

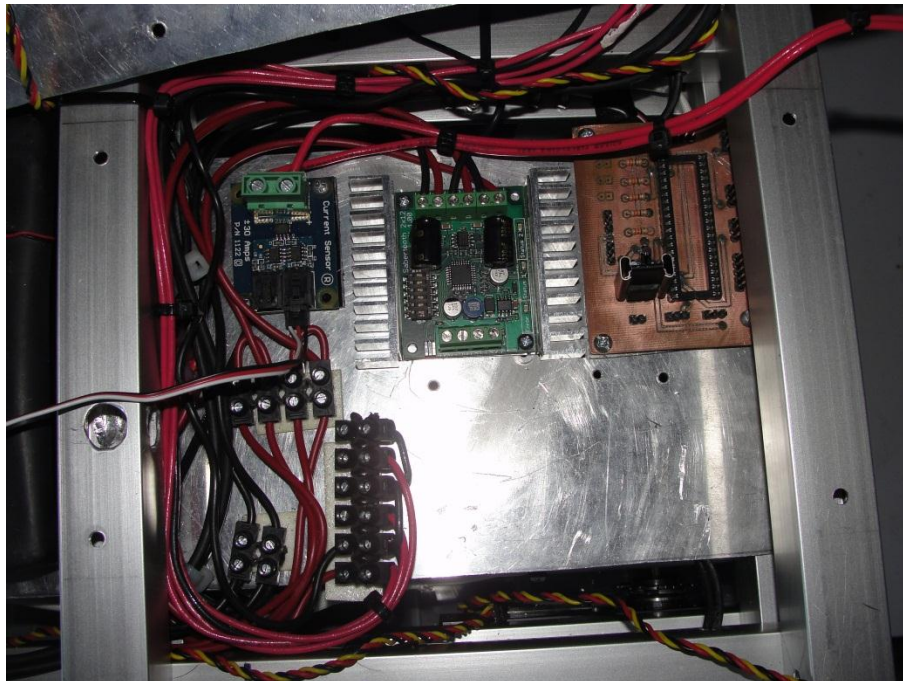
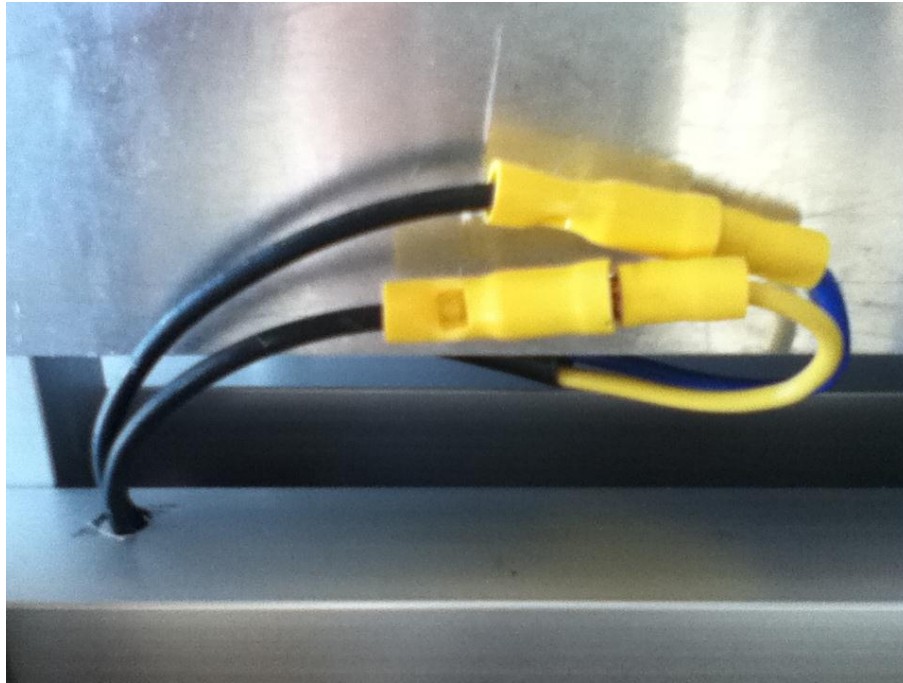


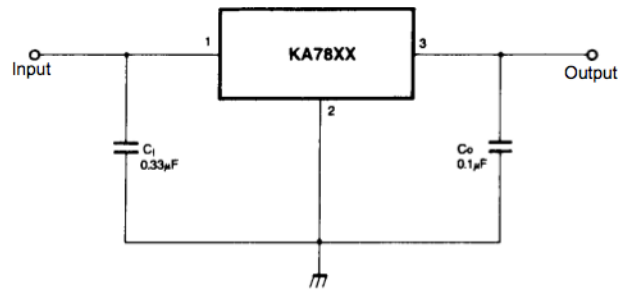
Figura 35. Detalle de conexión de terminales hacia motores para facilitar mantenimiento al motor



En ningún momento se realizaron cálculos sobre caídas de tensión, teniendo en cuenta que las dimensiones del sistema de distribución no lo ameritaban. El largo de los conductores en ningún momento excede un metro de largo, y el ancho de conductor está sobre dimensionado por lo cual este tipo de problemas se descarta.

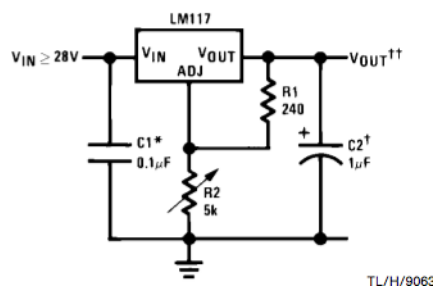
La alimentación hacia los miembros de control se realizara mediante un regulador de voltaje LM 7805 [20] al cual se conectara el voltaje nominal de la batería y tiene una salida de 5VDC. El circuito de conexión del dispositivo se observa en la Figura 36.

Figura 36. Configuración de conexión de Im 7805



De igual manera para obtener el máximo desempeño de los servomotores de giro continuo, estos deben de trabajar con un voltaje de 6VDC. Por lo cual se realizara un circuito acondicionador de voltaje utilizando el regulador de voltaje LM317 [20].

Figura 37. Configuración de conexión de LM317



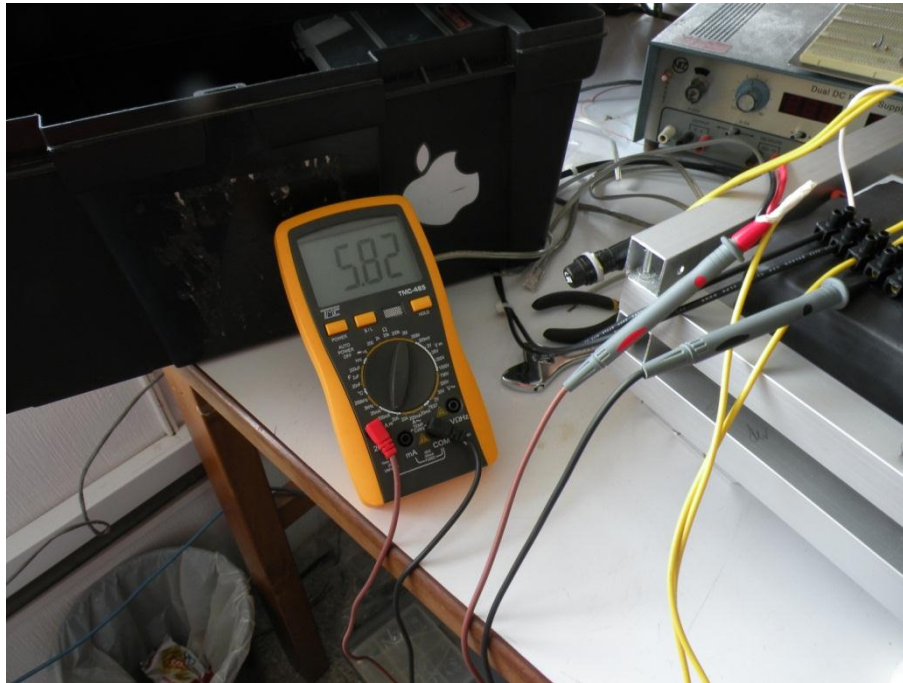
Para hacer trabajar los reguladores de voltaje a 6VDC de salida sólo se modificó el valor de la resistencia R2 del diagrama presentando, utilizando un potenciómetro de precisión.

Todo el sistema de potencia esta resguardado por un fusible principal de 15 amperios y un interruptor principal para desconectar físicamente los componentes del sistema de la alimentación.

Para observar el correcto funcionamiento se puso a prueba el sistema y se midió la corriente consumida por los actuadores trabajando.

Como protección de sobre carga solamente está la protección que presenta la batería. Esta tiene un interruptor de sobre carga cuando se exige más de 14.1 Amperios a la batería el interruptor abre el circuito al que está conectado. El sistema de distribución no implementa este tipo de protección es recomendable que se instale un interruptor termo-magnético en el sistema.

Figura 38. Prueba de consumo de corriente del módulo de potencia



### C. Discusión

Se decidió que las líneas de alimentación en todos los elementos se realizarán utilizando el voltaje nominal de la batería 14.8 VDC. Por lo tanto el acondicionamiento del voltaje se realizará de manera local.

Por lo cual todos los PCB utilizados en el proyecto tendrán su propio regulador de voltaje, con esto cada tarjeta se hace menos propensa a verse afectada por algún problema en el sistema. Dado que cada regulador de voltaje tiene implementada protección contra corto circuito y además los reguladores de voltaje

ayudan a eliminar ruido en las líneas de transmisión de voltaje, haciendo más robusto el sistema ante la presencia de ruido.

Cabe destacar que dentro de las razones sobre la forma en que se diseñó el proceso de cableado y utilización de borneras y terminales permite que el sistema pueda modificarse de manera más fácil. Con esto también se permite la opción de realizar cambios al sistema sin la necesidad de desconectar totalmente todos los componentes del prototipo.

## DESARROLLO DE CONTROLADOR DE MÓDULO DE POTENCIA

### A. Diseño experimental

Para desarrollar el módulo de potencia se debía utilizar un microcontrolador (MCU), el cual estuviera encargado de ejecutar un programa. En éste se establecen las salidas y entradas necesarias para que el prototipo de la silla de ruedas pueda operar con normalidad.

Se debía de elegir un dispositivo capaz de ejecutar dicha tarea de manera que, pudiera cumplir con los requerimientos del sistema. Los cuales son atender todas las entradas al módulo, salidas del módulo y tiempo de ejecución para la decisión de tareas de las que era responsable el modulo.

Para lo cual fue necesario:

1. Listar requerimientos: Determinar las salidas y los requerimientos de las salidas del módulo (tipo de salidas, protocolos), determinar el número de entradas a utilizar en el módulo (tipo de entrada, protocolos), determinar el número de tareas y la complejidad computacional de las mismas.
2. Buscar un microcontrolador: después de tener un listado de requerimientos buscar un dispositivo capaz de atender las necesidades del proyecto.
3. Conseguir el microcontrolador: Obtener un dispositivo, de la familia de dispositivos seleccionada, obtener el entorno de desarrollo y el programador necesario para hacerlo trabajar.
4. Pruebas preliminares: Después de escoger el microcontrolador para implementar el modulo, se debían de hacer pruebas preliminares con el mismo, dado que presenta una arquitectura diferente a los microcontroladores conocidos. Se debió hacer pruebas básicas para adaptarse al nuevo MCU, como poner un pin de salida en alto.

5. Generación de señales de salida: establecer las señales de salida necesarias para hacer funcionar el módulo de potencia.
6. Lectura de entradas: determinar la forma correcta de leer todas las entradas necesarias para el correcto funcionamiento del módulo de potencia.

## B. Resultados

1. Controlador de módulo de potencia. Este controlador debía evaluar todas las variables que son importantes para el sistema de potencia, realizar decisiones a partir del estado de estas variables y establecer las salidas del sistema. Esta tarea está a cargo del dsPIC30F4011[8]. Este dispositivo es un controlador de señales digitales, en esencia es un microcontrolador estándar con mucho más hardware dedicado a tareas como la multiplicación y operaciones de punto flotante. Sumando mejoras de funcionamiento a los módulos comunes en un microcontrolador de microchip.

Dentro de las características del dispositivo se encuentran [20] :

1. Arquitectura para una palabra de 16 bits
2. Memoria de programa de 48Kbytes
3. Memoria ram de 2Kbytes
4. Velocidad de reloj máxima de 120 MHz mediante PLL configurable por 4x, 8x, 16x.
5. Cinco TIMERS de 16 bits, con prescaler programable
6. High-currentsink/sourceI/Opins:25mA/25mA
7. 16-bitCaptureinputfunctions
8. 16-bitCompare/PWMoutputfunctions
9. 3-wireSPImodules(supports4Framemodes)
10. I2C modulesupports Multi-Master/Slave mode and 7-bit/10-bit addressing

11. Dos módulos UART.
12. Módulo de ADC, con 16 canales de muestreo

Utilizando este dispositivo se generan las señales, para el control de actuadores que forman parte del prototipo, de igual manera se leen las entradas que sirven para tomar decisiones sobre el comportamiento del prototipo de la silla de ruedas. Éstas son los comandos de movimiento, la información de realimentación sobre el comportamiento de operación de los actuadores, el estado de los sensores ultrasónicos, y la inclinación que presenta el prototipo de la silla.

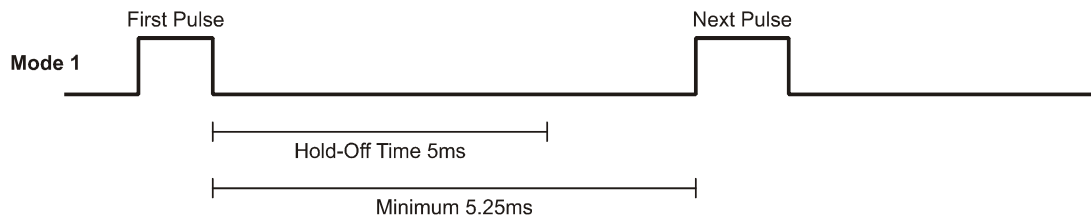
Utilizando el MCU se generan las siguientes señales para el control de actuadores;

1. Señales de PWM para puentes H, para control de velocidad y sentido de giro de motores DC.
2. Señales de PWM para servomotores de giro continuo, para establecer velocidad y sentido de giro de actuadores.
3. Señales de PWM para puentes H

Estas señales de PWM son las encargadas de especificar los parámetros de operación que debe de presentar el motor DC de manera instantánea.

Las señales de control para los motores DC, están determinadas por los requerimientos del driver para motores DC a utilizar. Mediante este controlador de potencia, es posible modificar la velocidad y sentido de giro de un motor DC; utilizando solamente una señal de PWM para este propósito.

Figura 39. Características de una señal de PWM [20]



2. Implementación de las señales de control para motores DC. Después de establecer los parámetros que se debían de tener de la señal de PWM, para controlar la operación de un motor DC. Se procedió a buscar la forma de generar este tipo de señales, utilizando como dispositivo de control el MCU dsPIC30F4011. Se estableció una lista de requerimientos dentro de los cuales están:

1. Deben de ser hasta cuatro señales de PWM con el mismo periodo.
2. Las señales deben de tener un ancho de pulso variable entre 1 ms y 2 ms.
3. Las señales de PWM tendrán una frecuencia de 100 Hz.
4. Se utilizará la investigación previa del desarrollo de los controladores de motores BLDC para generarlas.

3. Señales de control servomotores de Ggro continuo. Los servomotores de giro continuo son servos modificados para tener la capacidad de tener un giro continuo, pero con un sistema de control de velocidad con lazo cerrado. La señal de control para este actuador es del mismo tipo de las señales generadas para el control de los motores DC. Buscando un mejor funcionamiento en el control de los servos, se decidió utilizar los módulos de output-compare que trae el dsPIC30F4011. En la Tabla 52, se puede observar los valores que debe tomar la señal de PWM para que el servo trabaje en los modos de operación posibles.

Tabla 52. Especificaciones de la señal de PWM para control de servo de giro continuo

ancho de pulso (ms)	Estado de operación
$1.5 < PWM < 1.9$	Giro horario (velocidad variable)
1.5	Motor Detenido
$1.1 < PWM < 1.5$	Giro anti horario(velocidad variable)

Dado que se van a utilizar cuatro servomotores de giro continuo y el MCU tiene cuatro módulos de este tipo, no hay problemas para generar las señales de control de estos actuadores.

4. Módulo de output-compare. Este tipo de módulo tiene la opción de ser configurado para establecer una señal de PWM, donde los bits a modificar son los OCM<2:0> del registro OCXCON, esta serie de módulos utiliza un TIMER como soporte secundario y se puede elegir entre el TIMER2 y TIMER3. El proceso para establecer el módulo es el siguiente:

1. Establecer el período escribiendo el valor del mismo en el registro PRY.
2. Establecer el ciclo de trabajo, escribiendo el registro OCxRS.
3. Escribir en el registro OxCR el ciclo de trabajo inicial.
4. Habilitar la interrupción si se desea.
5. Configurar el módulo para operar en modo de PWM, programando en un uno lógico los bits OCM<2:0> del registro OCXCON.
6. Configurar el prescaler del TMRX

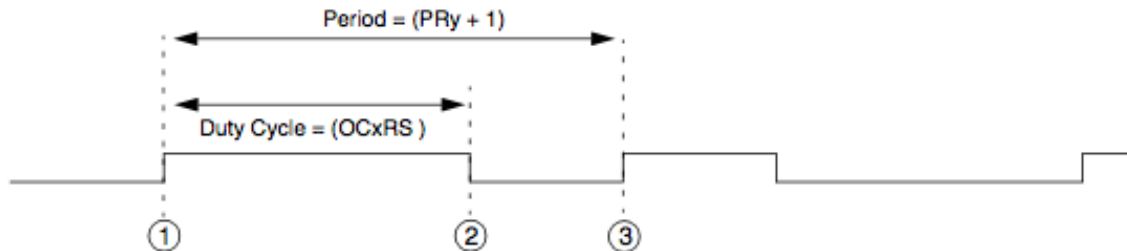
Además el periodo de la señal de PWM puede estar dado por la siguiente ecuación:

Figura 40. Ecuación para periodo de PWM con modulo de output compare

$$\text{PWM Period} = [(PRy) + 1] \cdot T_{CY} \cdot (\text{TMRy Prescale Value})$$

$$\text{PWM Frequency} = 1/[\text{PWM Period}]$$

Figura 41. Especificaciones de señal de PWM con módulo de output compare



- ① Timer is cleared and new duty cycle value is loaded from OCxRS into OCxR.
- ② Timer value equals value in the OCxR register, OCx Pin is driven low.
- ③ Timer overflow, value from OCxRS is loaded into OCxR, OCx pin driven high. TylF interrupt flag is asserted.

El MCU utilizado está trabajando con un cristal oscilador de 10Mhz y un PLL de x8 para llegar a tener una velocidad de reloj de 80MHZ. Los servomotores normalmente trabajan a una frecuencia de 50Hz para esto los módulos deben de tener un módulo de TIMER configurado, para realizar las tareas de establecer el periodo del PWM, específicamente se utilizó el TIMER2 de dsPIC30F4011 y la configuración del módulo es el siguiente:

Prescaler = 8

PR2 = 500000

Con esta configuración se logra obtener la frecuencia de 50Hz en el PWM, el contador del TIMER2 sumará una unidad cada vez que se hayan ejecutado ocho instrucciones. Es por esto que el prescaler del módulo está establecido con un valor de ocho.

También por los requerimientos de los servomotores a utilizar la señal control de PWM debe estar entre los 1.1 ms y los 1.9 ms. La señal de control debe estar dentro de estos rangos, para operar con normalidad. Esto se logra poniendo los registros OCxRS entre los valores de  $2750 < OCxRS < 4750$ . Esto partiendo del siguiente resultado:

$$\frac{4750 \times 8}{20 \times 10^6} = 1.9 \text{ ms} , \quad \frac{2750 \times 8}{20 \times 10^6} = 1.1 \text{ ms}$$

Con esto se logra una señal con las cuales el servomotor de giro continuo puede trabajar dentro de todo su rango de operación.

### C. Discusión

La implementación del controlador del módulo de potencia tiene una gran relevancia y el buen funcionamiento del controlador, establece que el prototipo de la silla de ruedas se desenvolverá de manera correcta en las tareas para las cuales fue diseñada.

El programa que se ejecute en el controlador del módulo de potencia debe de estar optimizado para ser lo computacionalmente más eficiente posible. Esto tiene que ver con que los algoritmos implementados para el control de actuadores y lectura de sensores se ejecuten lo más rápido posible.

Una vez que se tienen el código implementado el cual es capaz de establecer en operación a los actuadores es necesario realizar pruebas de funcionamiento del sistema. Dentro de las primeras pruebas se establecieron las señales de control en función de un comando de movimiento y se observó el comportamiento del módulo al enviar un comando de movimiento mediante la aplicación de interfaz desarrollada.

Una vez se obtuvo un comportamiento adecuado de las señales de control, fue el momento de conectar los drivers de los motores y observar el comportamiento del sistema y así ir realizando pruebas paulatinas hasta construir un sistema más complejo. Al cual se le pudieran realizar pruebas que acercaran el comportamiento que se buscaba finalmente en el sistema. Todas estas pruebas y procesos de experimentación se realizaron de manera progresiva.

## **PUENTES H PARA MOTORES DC**

### **A. Diseño experimental**

Después de haber determinado los motores DC a utilizar, es necesario establecer la forma en que se van a controlar dichos actuadores, dado que el módulo de control establece el estado en el que tienen que trabajar los motores. Pero la señal de salida del módulo de control es de índole digital y debe de existir un medio intermedio entre la señal digital de PWM y la señal de alimentación del motor para que se establezca un modo de operación. Además, los motores DC instalados deben de tener tanto una velocidad variable como un cambio de giro en la operación normal del prototipo de la silla.

Buscando que este proceso se realice de la manera más fácil posible se busca un dispositivo que implemente las funciones de un puente H, para un motor DC. Las características de dicho dispositivo deben de ser:

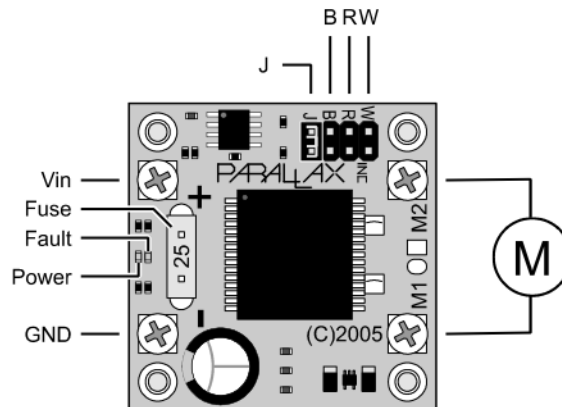
1. Tener la capacidad de modificar el sentido de giro y velocidad de un motor DC.
2. Operar con un voltaje de alimentación de 14VDC a 16VDC como mínimo.
3. Estar capacitados para manejar motores DC con un consumo de corriente que este entre los valores de 5 a 10 Amperios.
4. Que presente una facilidad relativa para ser conectado con un micro-controlador.
- 5.

### **B. Resultados**

Los resultados de la búsqueda de un dispositivo que cumpliera con las especificaciones propuestas fue fácil de encontrar, por facilidad y conveniencia se decidió comprar el HB-25 Motor Controller producido por parallax. Esto partiendo del hecho que es el mismo proveedor al cual se le compraron los motores DC y

éste los recomienda para el uso de los motores DC comprados. Por otra parte, la interfaz de control de parámetros de operación se podía realizar utilizando un microcontrolador sin presentar una gran dificultad. Es posible observar en la figura 29 una descripción general del mismo.

Figura 42. HB-25 Motor Controller [20]



1. Vin: Entrada de voltaje, +6VDC a +16VDC
2. GND: Conexión a tierra
3. M1: Conexión número uno a motor
4. M2: Conexión número dos a motor
5. W: entrada de PWM para control
6. R: sin conexión
7. B: conexión a tierra de la señal de control de PWM
8. J: jumpers para modo de operación

La señal de entrada al pin W, debe ser una señal del tipo de PWM, donde el ancho del pulso puede variar entre 0.8 ms y 2.2 ms. La frecuencia de esta señal debe estar entre el intervalo de  $50 < f < 190$  Hz. El valor del ancho de pulso determina tanto la velocidad como el sentido de giro del motor. Los valores de ancho de pulso que estarán estableciendo estos comportamientos se establecen a continuación, en la Tabla 53.

Tabla 53. Especificaciones de señal de PWM para control de motor DC

ancho de pulso (ms)	Estado de operación
$1.5 < \text{PWM} < 2.2$	Giro horario (velocidad variable)
1.5	Motor Detenido
$0.8 < \text{PWM} < 1.5$	Giro anti horario (velocidad variable)

Las señales de control para los controladores deben de obedecer el formato establecido por el fabricante donde, por especificaciones propias del dispositivo de control de potencia, el tiempo entre pulsos de PWM debe de ser de 5.25 ms como mínimo.

Figura 43. Detalle de par de puentes HB-25 instalados

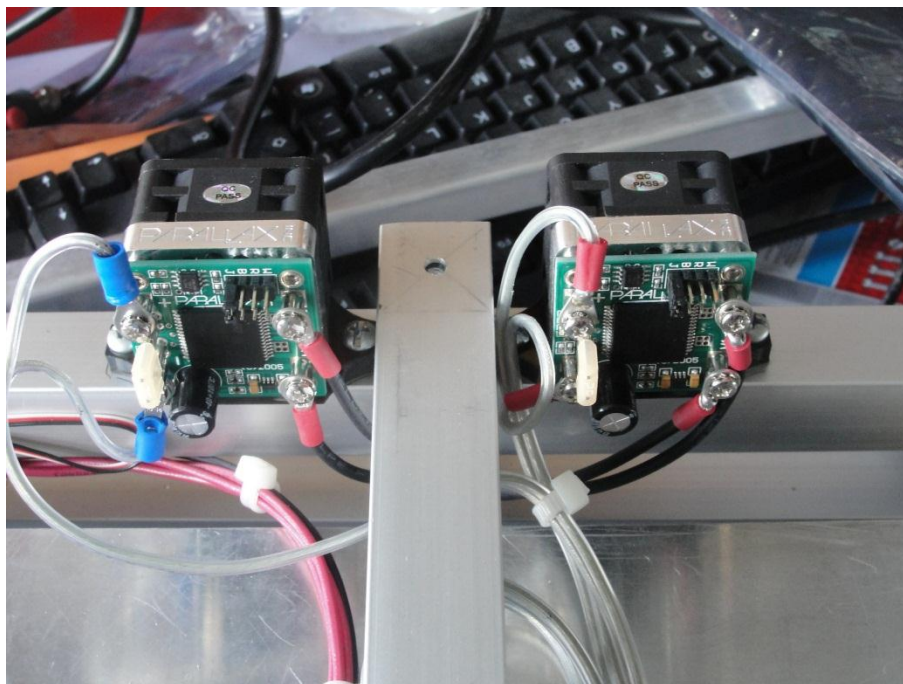
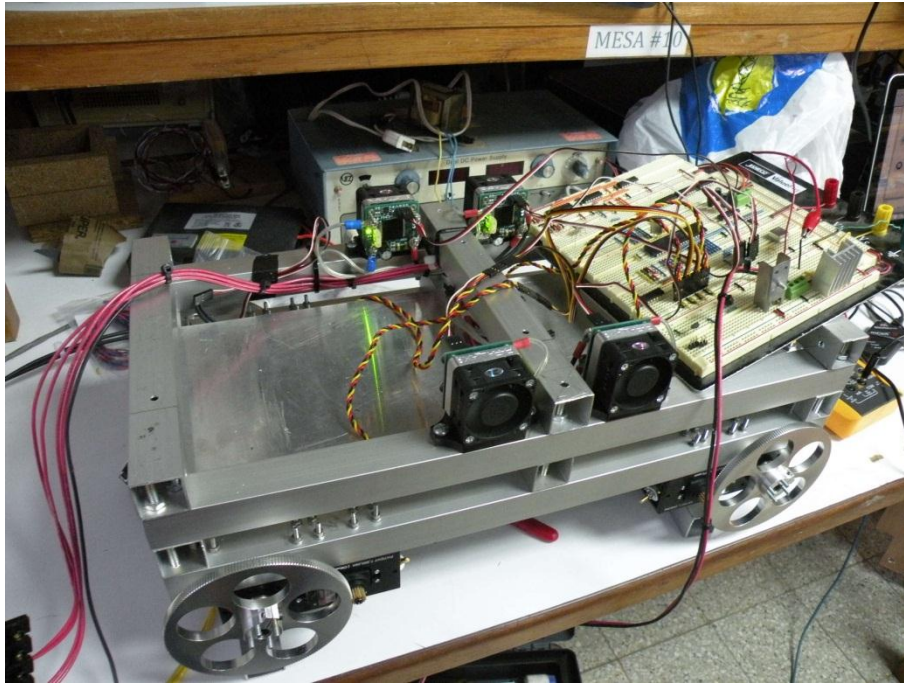


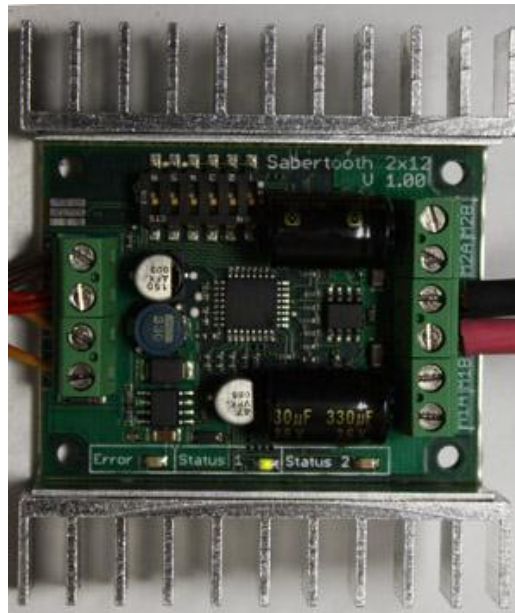
Figura 44. Cuatro puentes HB-25 instaladas en el prototipo de la silla realizando pruebas



Después de hacer funcionar estos controladores de manera repetida por un espacio de 15 días, sus características operacionales ya no eran las mejores y mostraron fallas donde se hacen evidente el daño en los semiconductores de potencia del puente H. Por lo cual se decidió no seguir utilizando estos controladores y se optó por comprar los siguientes controladores:

Sabertooth dual 12A motor driver [20], producido por Dimension Engineering, estos presentan de igual manera las características de operación buscadas en los controladores para los motores.

Figura 45. Sabertooth dual 12A motor driver [20]



Este controlador tiene las siguientes especificaciones:

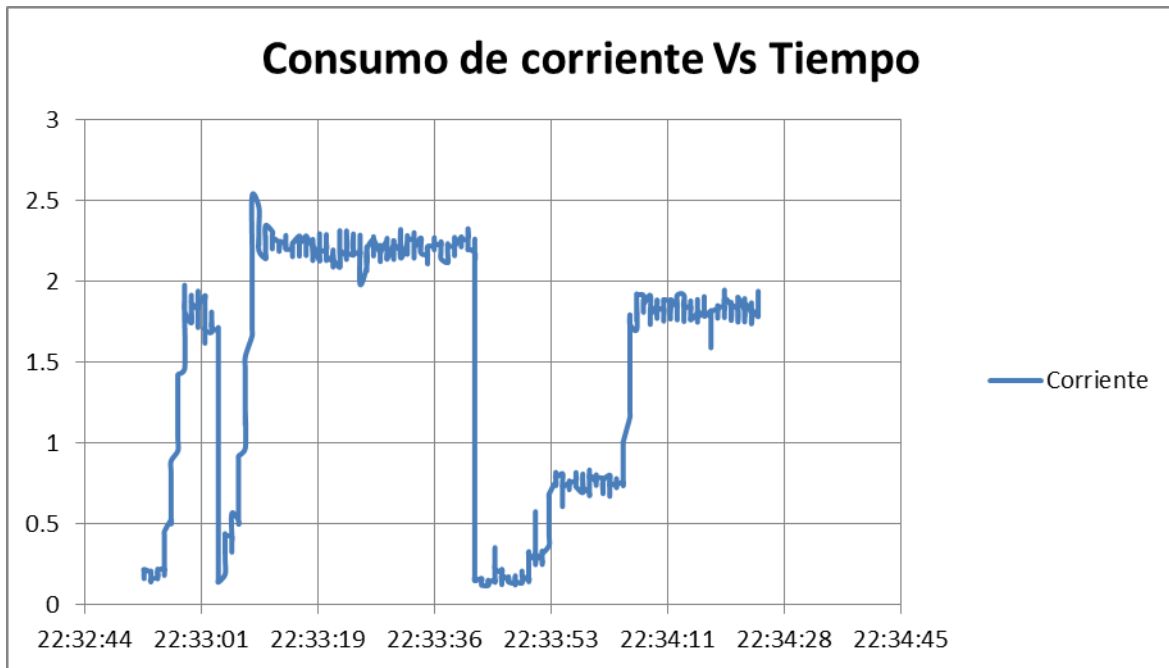
Tabla 54. Características operacionales del Sabertooth dual 12A motor driver [20]

Parámetros	Descripción
Voltaje de entrada	6 -24 VDC
Corriente	12 Amp nominal picos de 25 Amp
Control	Analógico, serial, PWM

Este Driver para motores DC contiene dos puentes H en el PCB con la capacidad para controlar dos motores DC de manera separada.

Después de tener el nuevo controlador de motores DC, se realizaron una serie de pruebas para descartar por completo la existencia de picos de voltaje o corriente que pudieran generar un daño a los semiconductores de potencia presentes en el controlador del motor DC. Se puede observar a continuación en la Figura 46 la el comportamiento de corriente que del Sabertooth dual 12A motor driver [20] trabajando bajo condiciones estándar sin carga.

Figura 46. Gráfica de corriente consumida por un puente H en una rutina de movimiento de una pareja de motores DC utilizando el Sabertooth dual 12A motor driver



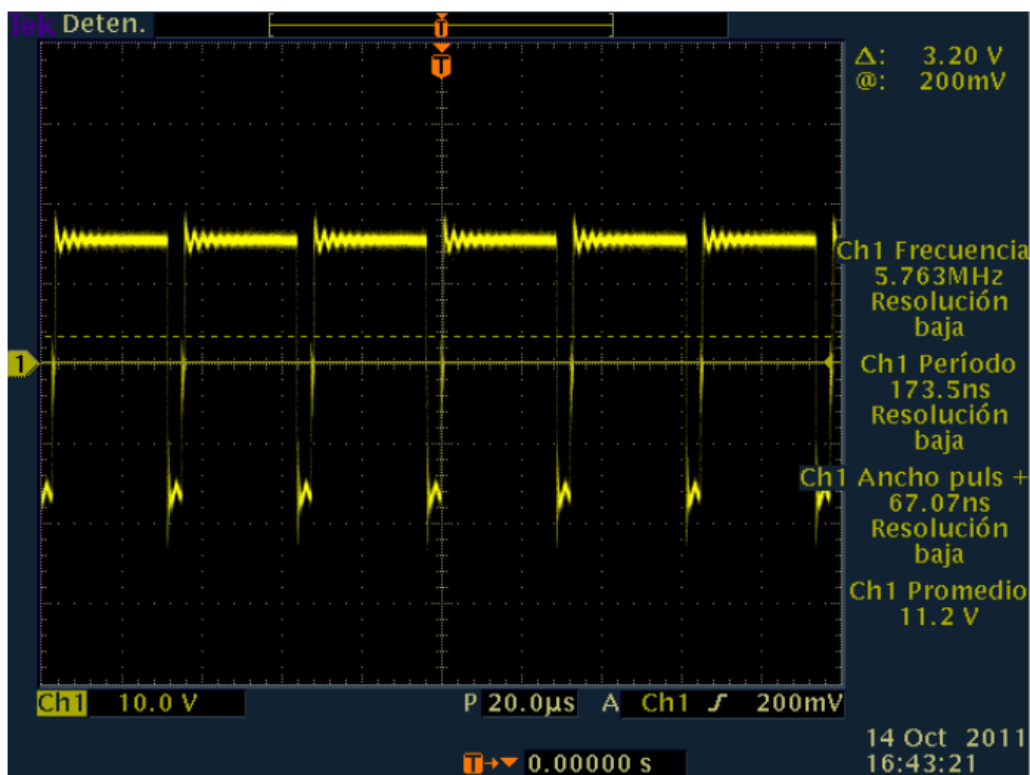
Se observó el comportamiento de controlador y fue posible determinar que aunque se observan picos de corriente en el consumo del controlador, la proporción de los sobresaltos no es excesiva y no pasa el 10% en la mayoría de los casos además el tiempo de duración de los picos no es excesivo.

En cuanto a la opción de que se pudiera observar un pico de voltaje, la opción se descarta, partiendo de la forma en que funciona el controlador. Al poner en funcionamiento el controlador este tiene una salida de PWM de amplitud de VCC a  $-VCC$  donde VCC es el voltaje de alimentación del controlador del motor, con un ciclo de trabajo del 50%. Con esto el voltaje promedio aplicado al motor es 0VDC.

Lo que hace el controlador es cambiar el porcentaje del ciclo de trabajo con tal de establecer un voltaje promedio positivo o negativo y con esto cambiar la velocidad y sentido de giro de un motor DC.

En la Figura 47 es posible observar el voltaje de salida de las terminales del controlador de motores DC Sabertooth dual 12A motor driver.

Figura 47. Respuesta del controlador para motores DC Sabertooth dual 12A motor driver



TDS 3032 - 07:30:15 p.m. 14/10/2011

La puesta en trabajo de estos controladores no presentó grandes problemas con respecto a el trabajo que ya se había realizado, dado que las señales de control de los dispositivos son señales de PWM, con las mismas especificaciones que las señales de control de los controladores producidos por parallax.

La señal de PWM debía tener un ancho de pulso entre 1ms y 2 ms. Para modificar la velocidad y sentido de giro del motor.

### C. Discusión

La puesta en trabajo de los puentes H seleccionados está a cargo del módulo de control, y esta tarea se realiza de manera satisfactoria por el encargado del módulo de potencia. Al realizarse las pruebas con los HB-25, producidos por parallax en las primeras pruebas no se presentó ningún inconveniente y estos funcionaron de manera normal. Estas primeras pruebas mediante los controladores de los motores DC fue posible hacer trabajar a los motores DC modificando su velocidad y sentido de giro según fuera el deseo del operario del prototipo.

Dentro de las pruebas realizadas al prototipo de la silla de ruedas utilizando estos controladores se contempló la salida alrededor del campus de la universidad del valle de Guatemala, del prototipo y se realizaron las primeras pruebas del sistema.

Debido a la falta de una causa real de la falla de estos controladores se decidió no comprar estos de nuevo y cambiar hacia los drivers para motores producidos por otro fabricante.

Se escogió a Sabertooth dual 12A motor driver, producido por Dimension Engineering, como el controlador a utilizar y los resultados sobre las pruebas del mismo son satisfactorios.

## CONTROLADOR DE MOTOR BLDC

### A. Diseño experimental

Establecer forma de controlar un motor BLDC

1. Buscar la forma estándar de controlar el sentido de giro y velocidad de un motor BLDC.
2. Establecer un plan de trabajo para lograr implementar el control de cuatro motores BLDC.
3. Conseguir un microcontrolador con el cual se pueda implementar el control de los cuatro motores.
  - a. Generación de un banco de veinticuatro señales de PWM
  - b. Implementación de lectura de sensores de efecto HALL

Generación de bancos de PWM

1. Encontrar un algoritmo eficiente para generar una señal de PWM, utilizando solamente una interrupción del TIMER1 del dsPIC30F4011 para generarla.
2. Implementar el algoritmo y realizar observaciones sobre el comportamiento de la señal de PWM.
3. Generar las tres señales de PWM restantes utilizando la misma lógica, utilizada para generar el primer PWM.
4. Realizar pruebas del comportamiento de las señales en los puertos de salida.
5. Utilizando las señales de PWM0-PWM3, generar cuatro bancos de PWM en el microcontrolador.
6. Determinar la manera más eficiente para obtener las salidas de PWM, para los cuatro motores BLDC a utilizar.
7. Implementar el circuito para obtener las veinticuatro salidas de PWM, utilizando el menor número de pines de salida del microcontrolador

## Lectura de sensores de efecto HALL

1. Plantear el sistema para hacer eficiente la lectura de los sensores de efecto HALL de los cuatro motores BLDC.
2. Conectar los componentes necesarios para realizar la lectura de los sensores.
3. Realizar los cambios en el programa principal de para realizar la lectura de los sensores de efecto hall.

## B. Resultados

Durante el tiempo que la silla de ruedas se proyectó como un modelo a tamaño real, la utilización de motores BLDC era necesaria. Por lo cual se comenzó a implementar un módulo de control capaz de poder hacer trabajar a cuatro motores BLDC al mismo tiempo. Este módulo debía tener veinticuatro salidas de PWM y doce entradas digitales para los sensores de posición relativa. Dado el elevado número de pines de salida a utilizar de un microcontrolador, y las condiciones de trabajo de las entradas se optó por multiplexar las señales de salida (señales PWM) y demultiplexar las entradas de los sensores de efecto HALL. Dicho procedimiento se realizó utilizando las siguientes topologías de conexión de dispositivos descritas a continuación.

1. Multiplexación de señales. Para realizar la multiplexación de las señales fue necesario primero realizar señales de PWM. El desarrollo de las señales de PWM se realiza utilizando un microcontrolador de la familia dsPIC, específicamente el dsPIC30F4011, trabajando a una frecuencia de reloj de 20 MHz.

2. Implementación de señales de PWM. Para controlar los cuatro motores BLDC, que utilizaría en la silla eléctrica para proveer el movimiento del sistema, era necesario tener cuatro bancos de PWM. Donde un banco de PWM se refiere a poseer seis salidas de PWM con el mismo periodo y ciclo de trabajo, con estas

seis señales se logra implementar la secuencia de conmutación eléctrica de un motor BLDC y con esto proveer el movimiento del eje del motor.

Dentro de las consideraciones generales que fueron tomadas para generar los bancos de PWM están:

- Solamente habrá un ciclo de trabajo por banco de PWM
- Los cuatro bancos de PWM tendrán el mismo periodo
- Tanto el periodo como el ciclo de trabajo del pulso podrán ser cambiados durante la ejecución del programa principal.

Todo esto partiendo del hecho que los cuatro motores para mover la silla serian iguales.

La implementación del algoritmo para generar los pulsos de PWM parte de la premisa de tener una llamada de interrupción a un tiempo muy corto (200us). Con esta llamada de interrupción se levanta una bandera, con la que se indica que ya ha pasado un tiempo determinado. Durante el flujo de programa principal, mediante una de funciones se verifica el estado de esta bandera, si la bandera está levantada se genera el ciclo de trabajo y periodo del PWM, utilizando un contador para el ciclo de trabajo(contPWM) y un contador para el periodo (contT).

Estos contadores se comparaban con respecto de registros de periodo(periodo) y del ciclo de trabajo(cicloPWM), dependiendo de esto cambia el estado de la bandera, estados.B1, para las pruebas preliminares era posible verificar el estado de esta bandera en un pin de salida del microcontrolador.

Dentro de los aspectos a destacar sobre la forma de implementar una señal de PWM utilizando una llamada de interrupción de un timer, están los siguientes:

- Presenta la oportunidad de generar el número de señales de PWM que sean necesarios. Donde los valores de período y ciclo de trabajo serán múltiplos del tiempo en el que se genera la interrupción.
- Si se escoge un valor muy pequeño de tiempo para generar la interrupción, se puede dar la posibilidad de que se den varios llamados de interrupción mientras no se termina una vuelta del ciclo principal de ejecución del programa maestro del MCU, observándose señales de PWM con comportamiento errático.

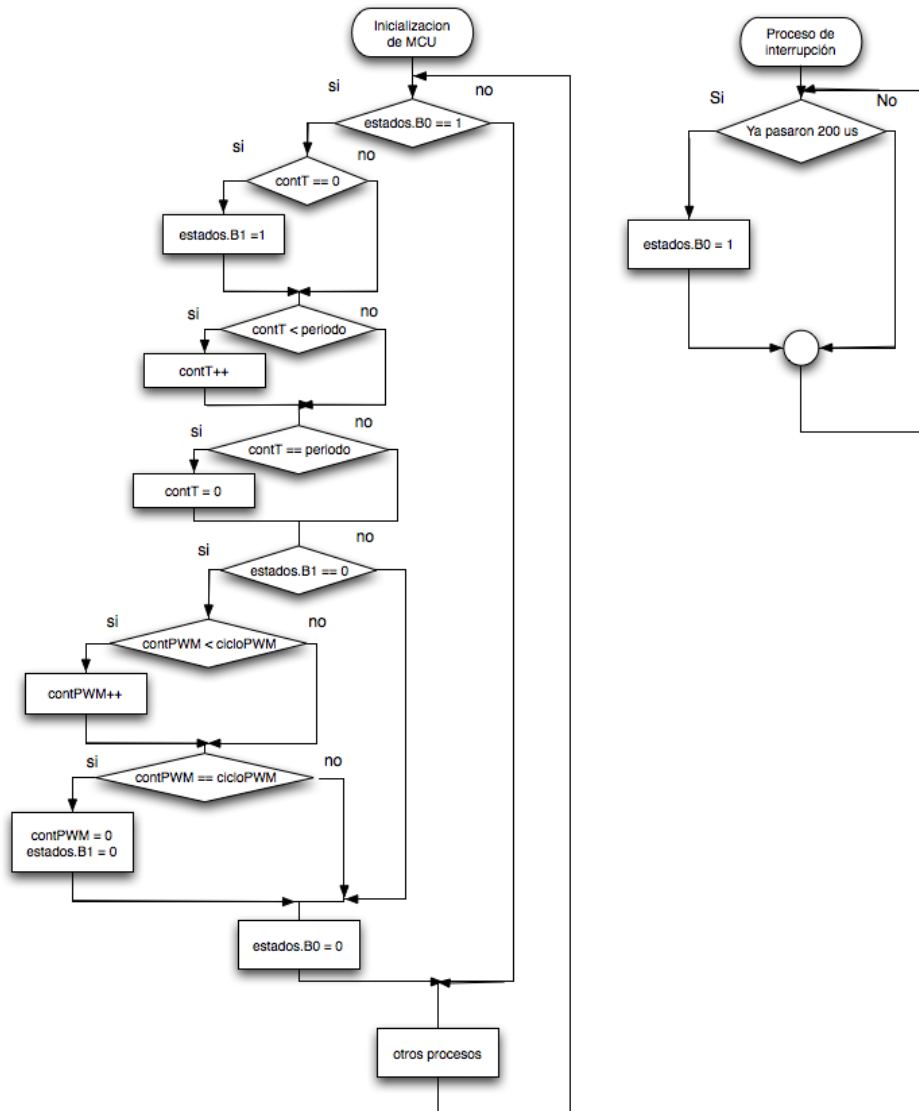
Para implementar las señales se utilizó el microcontrolador ya antes mencionado y se trabajó en el entorno de desarrollo creado por mikroelektronika, llamado mikroC para dsPIC [16]. El programa principal del módulo contempla una serie de funciones las cuales hacen funcionar al sistema, según se vayan dando los diferentes estados del sistema. En la Figura 48, se puede observar el diagrama de flujo para generar una señal de PWM.

Una vez se obtuvieron las señales de PWM era necesario generar los bancos de PWM y poner el estado de los bancos en pines de salida. Cuando se piensa en el hecho de poner los bancos directamente a pines de salida, se observa el hecho de que sería necesario tener un microcontrolador con veinticuatro pines de salida libres. Esta cifra es demasiado alta, para los treinta pines de entrada o salida que tiene el dsPIC30F4011. Por lo cual se optó por utilizar, solamente seis pines para enviar al exterior las veinticuatro señales de PWM. Esto se logra multiplexando señales, poniendo en los pines de salida el banco0 e inmediatamente después el banco1 y así subsecuentemente hasta empezar de nuevo con el banco.

El valor de un banco se guarda en un registro de FLIP-FLOPS, por lo cual fue necesario tener cuatro registros de memoria. La habilitación de los FLIP-FLOPS se da utilizando un contador octal, el cual recibe los pulsos de reloj y señal de

RESET por parte del microcontrolador. De esta manera se logra obtener las veinticuatro señales de salida, utilizando solamente ocho pines del dispositivo. En la Figura 49, es posible observar un diagrama de bloques del circuito.

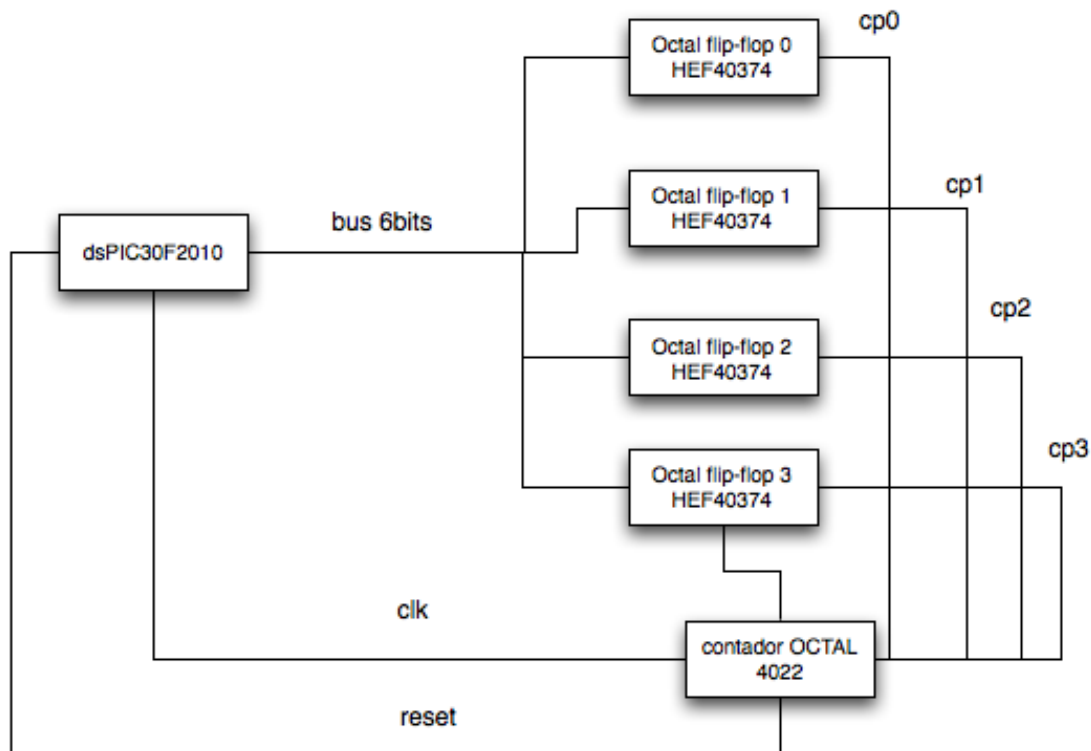
Figura 48. Diagrama de flujo para generar múltiples señales de PWM con ciclo de trabajo y periodo dinámico



*El diagrama de flujo describe el proceso de decisiones lógicas necesarias para generar una señal de PWM con ciclo de trabajo y periodo dinámico. estados.B0 bandera de interrupción de tiempo*

*estados.B1 bandera de estado de señal de PWM*  
*periodo registro que guarda el valor de periodo actual*  
*contT contador para generar el periodo de la señal*  
*cicloPWM registro que guarda el valor de ciclo de trabajo actual del PWM*  
*contPWM contador para generar el ciclo de trabajo del PWM*

Figura 49. Diagrama de bloques del circuito implementado para multiplexar señales de PWM

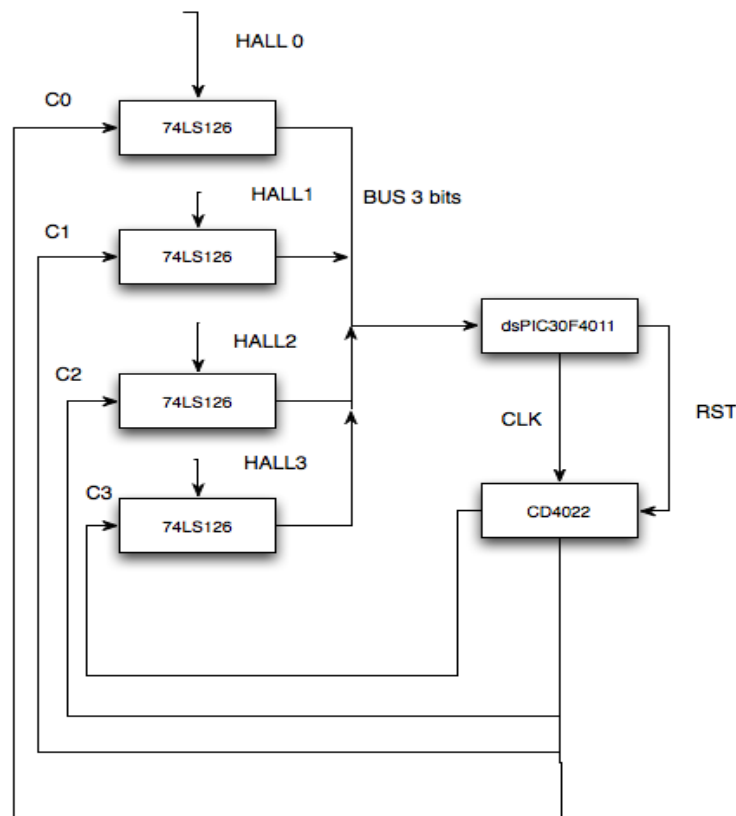


Con los bancos de PWM generados, se prosiguió con el desarrollo del módulo de potencia. Donde en esta oportunidad, se debían de leer los cuatro sensores de efecto hall, tratando de utilizar la menor cantidad de pines del MCU. Dentro de las opciones para realizar esta tarea, se evaluaron diversas soluciones. Utilizar registros en esta oportunidad no era viable por el choque eléctrico que se podía llegar a presentar.

Por lo cual se planteó la utilización de buffers tri-estado(74LS126), para evitar el choque eléctrico de señales y habilitar estos buffers de manera secuencial,

como se hace con los bancos de flip-flop. Las señales de control hacia los buffers proviene de un contador octal(CD4022). Donde las señales de reloj(CLK) y reset (RST) del contador, provienen del MCU. La frecuencia de estas señales, establece la frecuencia de muestreo de los sensores. El sistema implementado para leer los sensores se puede observar en la Figura 50.

Figura 50. Diagrama de bloques para leer sensores de efecto HALL



En busca de implementar un sistema con la mayor robustez posible, las señales de reloj para la lectura de los sensores y para demultiplexar los pines del microcontrolador, se generan con base en la interrupción de tiempo que se utiliza para generar las señales de PWM. El período de llamado de la interrupción depende del tiempo de barrido de programa principal. Mientras más grande sea el tiempo de barrido, más se debe de aumentar el período de este llamado a la interrupción. Cabe destacar que este problema se disminuye en función de que se aumente la velocidad de reloj del microcontrolador. La velocidad de operación

del reloj interno de los microcontroladores dsPIC30F4011 puede llegar hasta los 120 MHz, utilizando el módulo de PLL.

3. Lectura de sensores de efecto HALL. En medida que el contador octal habilita de manera secuencial los bancos de buffers tri-estado. Se realiza la lectura de los pines [2:0] del PUERTO\_B, el valor de lectura se almacena en un registro específico según sea el valor de un contador interno. Con el valor de lectura del sensor de efecto HALL se puede determinar la secuencia de conmutación correcta para poner en movimiento a un motor BLDC.

Esta secuencia de conmutación se calcula de acuerdo al sentido de giro que se desee dar al motor. De igual manera se deben revisar el estado de dos banderas para verificar si las salidas de PWM son activadas o el sentido de giro que se le va a enviar al motor. Esto se realiza revisando el registro de control estados y la forma en que se manejan los bits de la palabra están a continuación:

Registro de control: estados

B15: sin implementar

B14: sin implementar

B13: sin implementar

B12: motor3 hacia delante cuando es 0, hacia atrás cuando es 1

B11: motor2 hacia delante cuando es 0, hacia atrás cuando es 1

B10: motor1 hacia delante cuando es 0, hacia atrás cuando es 1

B9: motor0 hacia delante cuando es 0, hacia atrás cuando es 1

B8: motor3 encendido cuando es 1, apagado cuando es 0

B7: motor2 encendido cuando es 1, apagado cuando es 0

B6: motor1 encendido cuando es 1, apagado cuando es 0

B5: motor0 encendido cuando es 1, apagado cuando es 0

B4: señal de PWM3 es activa cuando es 1, no está activa 0

B3: señal de PWM2 es activa cuando es 1, no está activa 0

B2: señal de PWM1 es activa cuando es 1, no está activa 0

B1: señal de PWM0 es activa cuando es 1, no está activa 0

B0: Interrupción a 60 us ha ocurrido cuando es 1, no ha ocurrido interrupción 0

Dentro de los registros de control se encuentran los que guardan los estados de los sensores, a estos se les suman los registros que tienen el estados de los bancos de PWM. Estos registros cambiaran en función de la interrupción del TIMER1 y los estados de los sensores de efecto HALL. El listado completo de registros se describe en la Tabla 55. En la misma se da una descripción general de la función del registro.

Tabla 55. Listado de registros de control

o	Nombre	Descripción
1	cicloW0	Almacena valor de ciclo de trabajo de PWM0
2	cicloW1	Almacena valor de ciclo de trabajo de PWM1
3	cicloW2	Almacena valor de ciclo de trabajo de PWM2
4	cicloW3	Almacena valor de ciclo de trabajo de PWM3
5	contPWM0	Lleva la cuenta de ejecución del ciclo de trabajo de PWM0
6	contPWM1	Lleva la cuenta de ejecución del ciclo de trabajo de PWM1
7	contPWM2	Lleva la cuenta de ejecución del ciclo de trabajo de PWM2
8	contPWM3	Lleva la cuenta de ejecución del ciclo de trabajo de PWM3
9	contT	Lleva la cuenta de ejecución del periodo de las señales de PWM
10	periodo	Almacena valor del periodo de señales de PWM
11	estados	Registro de control de estados de la interrupción de TIMER1
12	contOctal	Contador que lleva registro del número de pulsos enviado al contador octal
13	banco0	Guarda el estado de la configuración de pines de salida del banco de PWM0
14	banco1	Guarda el estado de la configuración de pines de salida del banco de PWM1
15	banco2	Guarda el estado de la configuración de pines de salida del banco de PWM0
16	banco3	Guarda el estado de la configuración de pines de salida del banco de PWM0
17	sensor0	Guarda estado de sensor de efecto HALL0
18	sensor1	Guarda estado de sensor de efecto HALL1
19	sensor2	Guarda estado de sensor de efecto HALL2
20	sensor3	Guarda estado de sensor de efecto HALL3

### C. Discusión

Esta forma de controlar los motores BLDC se deja de manera recomendada para cuando se implemente el prototipo de la silla a escala real. El gasto en los motores BLDC se hace necesario por el desempeño mecánico que se necesita de los actuadores. Sin embargo, aunque no se hayan utilizado los mismos, se deja el diseño de un método eficiente para controlar hasta cuatro motores BLDC, utilizando un microcontrolador dsPIC30F4011.

## RED DE REALIMENTACIÓN DEL MÓDULO DE POTENCIA

### A. Diseño experimental

Una vez que se tiene un sistema de control a lazo abierto para todos los actuadores a utilizar en el prototipo de la silla de ruedas. Es necesario establecer un control lazo cerrado, esto se debe a la necesidad de poseer un sistema de monitoreo de los actuadores, y la forma en que se comportan estos en todo momento. Con esto se logra tener un control preciso sobre la posición y velocidad del prototipo de la silla.

Para realizar el proceso de monitoreo de actuadores es necesario utilizar un instrumento de medición y la serie de pasos seguidos para hacer trabajar estos instrumentos de medición son los siguientes:

1. Leer la hoja de datos del Position Controller Kit de parallax.
2. Determinar el hardware necesario para hacer trabajar los sensores.
3. Determinar un algoritmo para realizar las consultas de información.
4. Implementar los circuitos y el algoritmo con el fin de realizar las pruebas necesarias.

### B. Resultados

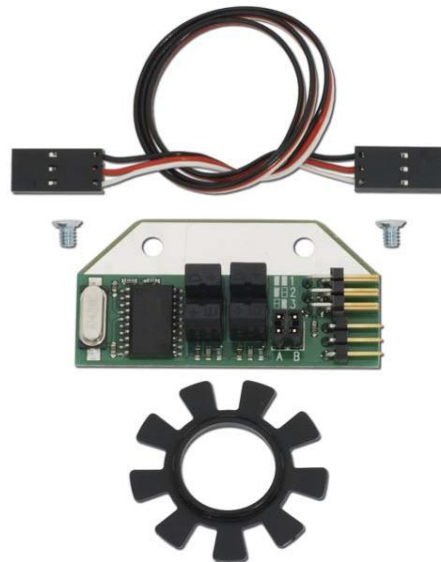
1. Sistema de monitoreo. Dado que todos los actuadores son motores, el instrumento de medición que dará información sobre el comportamiento de los actuadores es un encoder incremental. El instrumento de medición elegido para esta tarea es el Position Controller Kit [20], fabricado por parallax.

Este componente nos permite obtener la información instantánea sobre el estado que presentan los actuadores instalados en el prototipo de la silla de

ruedas, para poder tomar decisiones para el módulo de control y realizar cambios de ser necesario.

En la Figura 51 se observa el componente. Este dispositivo utiliza un encoder para establecer la posición y velocidad en cualquier momento, tiene una resolución de 36 pulsos por rotación.

Figura 51. Sensor de posición [20]



Este dispositivo utiliza un encoder para establecer la posición y velocidad en cualquier momento, tiene una resolución de 36 pulsos por rotación.

El sensor obtiene la posición del motor mediante el conteo incremental, y calcula velocidad promedio. Es posible obtener estos datos mediante la petición de información utilizando el comando de petición respectivo. Esta respuesta se realiza ante la petición de la información, con esto se le permite al controlador del módulo de potencia ocuparse en otras tareas y pedir la información ya procesada cuando lo necesita.

La forma en que este sensor recibe las peticiones y manda la información se realiza por un solo canal, implementando una comunicación serial asíncrona half-

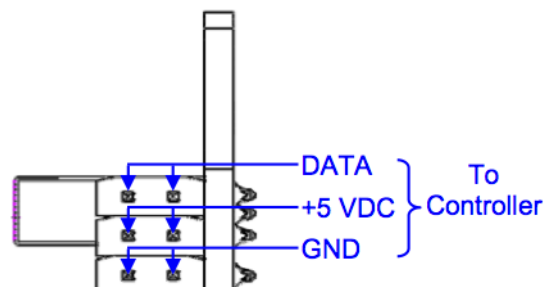
duplex a un baudrate de 19,200 buads/seg. Buscando la mayor optimización del sistema se puede implementar la comunicación con cuatro sensores en un mismo hilo.

## 2. Características

1. 36 posiciones codificadas por revolución
2. Un solo canal para entradas y salidas, utilizable hasta con cuatro sensores
3. Alimentación de 5 VDC
4. Comunicación serial a 19,200bauds/seg

3. Conexión. El sensor tiene tres pines para comunicarse con el entorno, uno es el canal de datos, los restantes son; voltaje y tierra. Todo según la figura.

Figura 52. Pines de conexión del sensor [20]



4. Identidad del dispositivo. Cuando más de un sensor está conectado al mismo bus de datos, es necesario que cada dispositivo tenga una dirección o código característico. Este código se asigna mediante la conexión de una conexión de jumpers específica. Los valores de identificación están entre 1 a 4. Cuando se envía un comando para la dirección 0, todos los dispositivos leen el comando y de ser válido reaccionan al mismo. Los códigos de identificación se dan según la Figura 53.

Figura 53. Tabla de códigos de identificación de sensores [20]

AIB	ID Value*	Binary
■ ■	1	001
■ □	2	010
□ ■	3	011
□ □	4	100

\* ID Value 0 is reserved for addressing all devices at once.

Dentro de los comandos que se le pueden mandar al sensor están los siguientes que se observan en la Figura No. 54. Cabe mencionar que los últimos tres bits del comando están reservados para direccionar los sensores.

Figura 54. Comandos para el sensor de posición [20]

#### Command Set Summary Table

	Description	Command	Hex	Binary	Single	All *	
Query	Query Position	QPOS	1	0x08	00001 000	•	
	Query Speed	QSPD	2	0x10	00010 000	•	
	Check for Arrival	CHFA	3	0x18	00011 000	•	
Action	Travel Number of Positions	TRVL	4	0x20	00100 000	•	•
	Clear Position	CLRP	5	0x28	00101 000	•	•
Configuration	Set Orientation as Reversed	SREV	6	0x30	00110 000	•	•
	Set Tx Delay	STXD	7	0x38	00111 000	•	•
	Set Speed Maximum	SMAX	8	0x40	01000 000	•	•
	Set Speed Ramp Rate	SSRR	9	0x48	01001 000	•	•

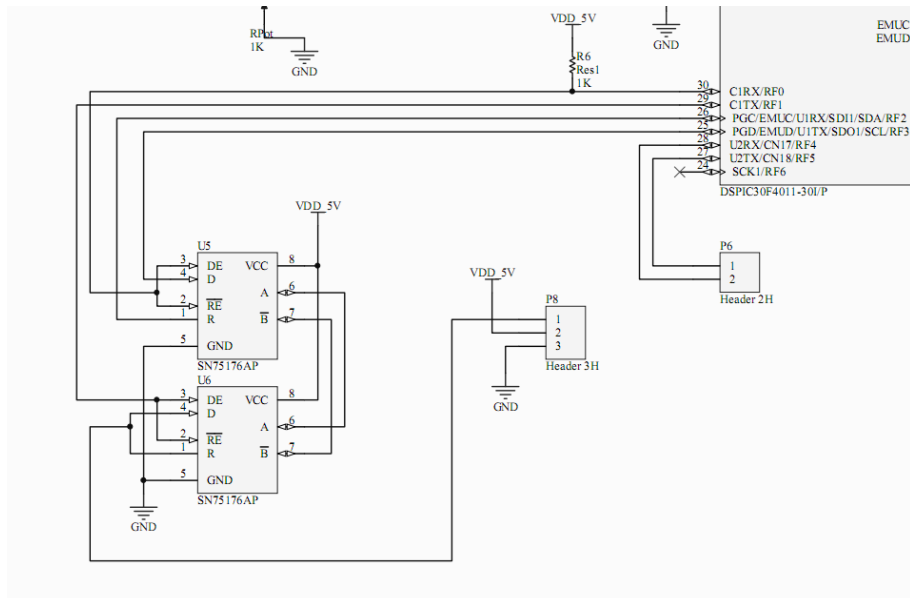
\* Every command can be used to address a single Position Controller device; additionally, configuration commands and action commands can be used to address all devices on the bus at once by using the special case ID value 0.

5. Implementación de la red. Se deben armar dos buses de comunicación con los sensores dado que el sistema debe tener información sobre los ocho actuadores presentes. Dado que el MCU a utilizar no tiene configuración del módulo UART para comunicación HALF-DUPLEX, se debe utilizar un buffer triestado para simular esta función.

De igual manera se deben multiplexar dos canales de datos para poderse comunicar con los dos canales de sensores de manera simultánea. Dentro de las opciones analizadas para poder establecer la comunicación con los dos buses de sensores, se presentaron varios caminos. La decisión sobre la forma de establecer estos dos canales partió de la experimentación realizada.

Para realizar dicha comunicación se utilizaron los SN75176B [15], los cuales son transceivers de comunicación serial 485, estos implementan un bus half-duplex para la transmisión y recepción de datos. Esta forma de implementar la comunicación resultó ser la forma más eficiente de realizar el canal half-duplex, dado que se trató de construir este canal utilizando buffers tri-estado estándar y la respuesta del canal para la transmisión y recepción de datos no fue tan buena como se esperaba. En la Figura 55 se observa el circuito construido para establecer un canal half-duplex de comunicación serial.

Figura 55. Circuito construido para realizar un canal half-duplex con los SN75176AP [20]

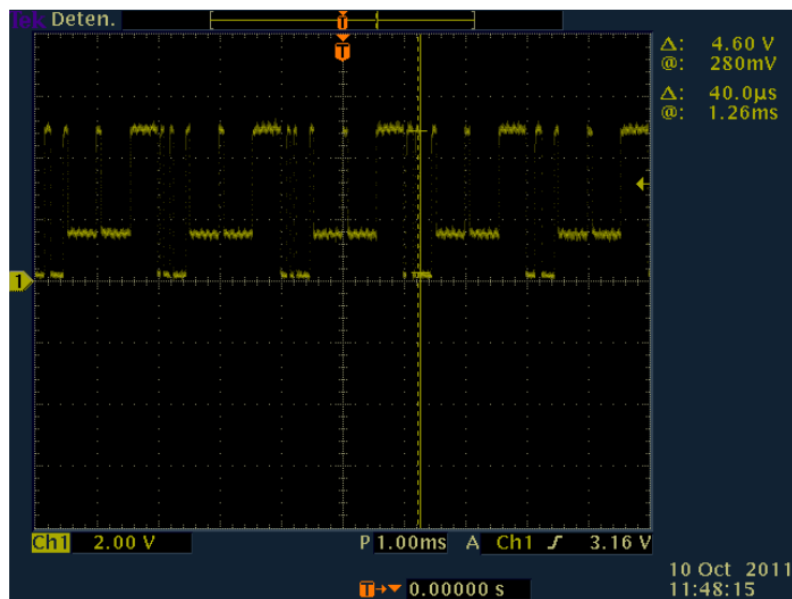


El programa principal que ejecuta el controlador del módulo de potencia envía peticiones sobre la posición de cada sensor de posición, cada 2ms donde

pregunta de manera secuencial a los sensores. Primero pide el estado al sensor con la dirección uno y así subsecuentemente hasta llegar al sensor de dirección cuatro.

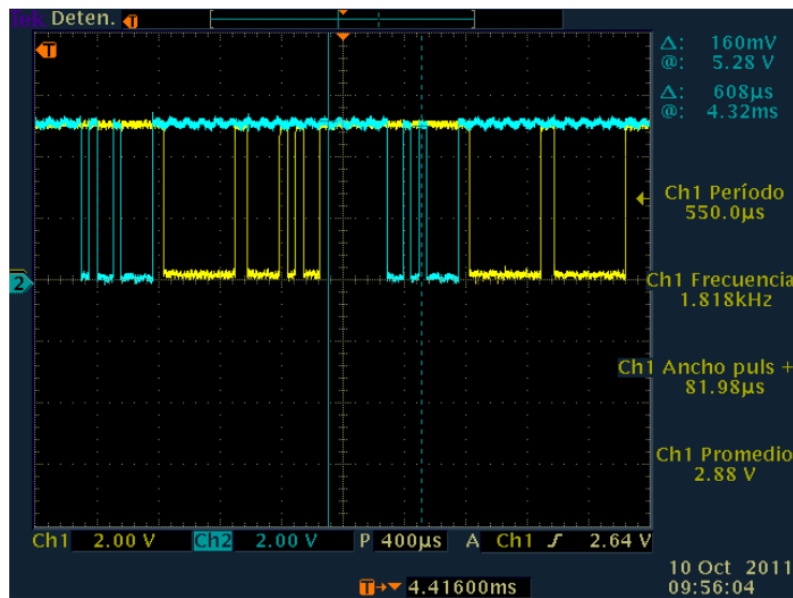
En la Figura 56., se observa la respuesta de los sensores en el canal utilizando los buffers trie estado, y en la Figura 57 se observa la respuesta de los sensores utilizando los transceivers.

Figura 56. Respuesta de los sensores en el canal half-duplex utilizando buffers tri-estado



TDS 3032 - 02:35:02 p.m. 10/10/2011

Figura 57. Respuesta de sensores en el canal half-duplex utilizando transceivers SN75176B [20],



TDS 3032 - 12:42:50 p.m. 10/10/2011

## B. Discusión

La implementación de esta red necesita una sincronización bastante precisa, donde se debió tomar en cuenta el tiempo que toma al controlador del módulo de potencia realizar la petición de información a un sensor, y la velocidad con que el sensor responde.

En cuanto a los resultados en la implementación del canal y el porqué de la decisión de utilizar un circuito utilizando los buffers tri-estado u otro con transceivers tiene que ver con los resultados que se obtuvieron al hacer trabajar los circuitos y la respuesta que presentaron, implementando el canal de comunicación half-duplex.

Además este proceso se realiza de manera secuencial y se debe realizar la petición de información a los sensores de manera ordenada. Esto se debe realizar de esta manera dado que todo el proceso se realiza solamente utilizando un canal

para el intercambio de datos. Por lo cual no es posible establecer un pipeline, para pedir y recibir los datos de los sensores de una forma mucho más eficiente y rápida.

El circuito implementado es capaz de implementar el canal de comunicación half-duplex de comunicación serial, necesario para obtener la información de los sensores de posición.

## DESARROLLO DE APLICACIÓN DE PRUEBA DEL MÓDULO DE POTENCIA

### A. Diseño experimental

Dado que el programa que ejecuta el controlador del módulo de potencia necesita de comandos de movimiento para funcionar fue necesaria una herramienta de software que permitiera realizar pruebas preliminares.

Esta aplicación tiene la tarea de dar los comandos de movimiento con los cuales el módulo podía probar su funcionamiento. Esta aplicación se fue desarrollando de manera progresiva.

Las tareas asignadas que debía tener la aplicación son las siguientes:

1. Proveer de una interfaz visual para poder probar el funcionamiento de los componentes que forman el módulo de potencia.
2. Comunicarse con el controlador del módulo de potencia mediante el protocolo de comunicación serial RS232.
3. Estar desarrollada para poder sufrir cambios a medida que el proyecto fuera progresando en su ejecución.
4. Controlar el comportamiento operativo de los motores DC.
5. Controlar el comportamiento operativo de los servomotores de giro continuo.
6. Recibir información de realimentación del módulo de potencia.

La aplicación se implementó en la plataforma de desarrollo visual express 2010 C# [20], ésta tiene una serie de librerías las cuales hacen más fácil la implementación de la aplicación y su comunicación con el controlador del módulo de potencia.

Dentro de las librerías a destacar están las siguientes:

1. Librería para manejo de puerto serial
2. Librería para manejo de hardware periférico(joystick)
3. Librería para generación de gráficas en tiempo real

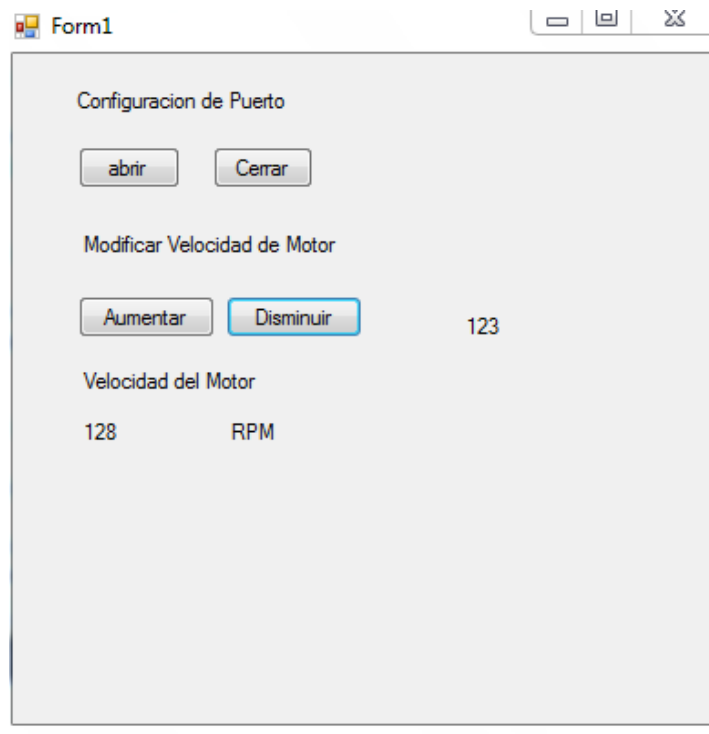
## B. Resultados

El desarrollo de dicha aplicación se dio de manera progresiva, conforme fue necesario se tornó más compleja y se fueron realizando cambios a la misma.

La comunicación del microcontrolador de potencia con las órdenes provenientes del módulo de interfaz humano – máquina presentan la necesidad implementar un canal de comunicación. Por lo cual al empezar a trabajar en el desarrollo del programa del controlador de potencia se debían tomar en cuenta las órdenes que puede generar el usuario para que la silla responda. Es por esto que se construyó una aplicación preliminar (Figura 58) para simular esta comunicación.

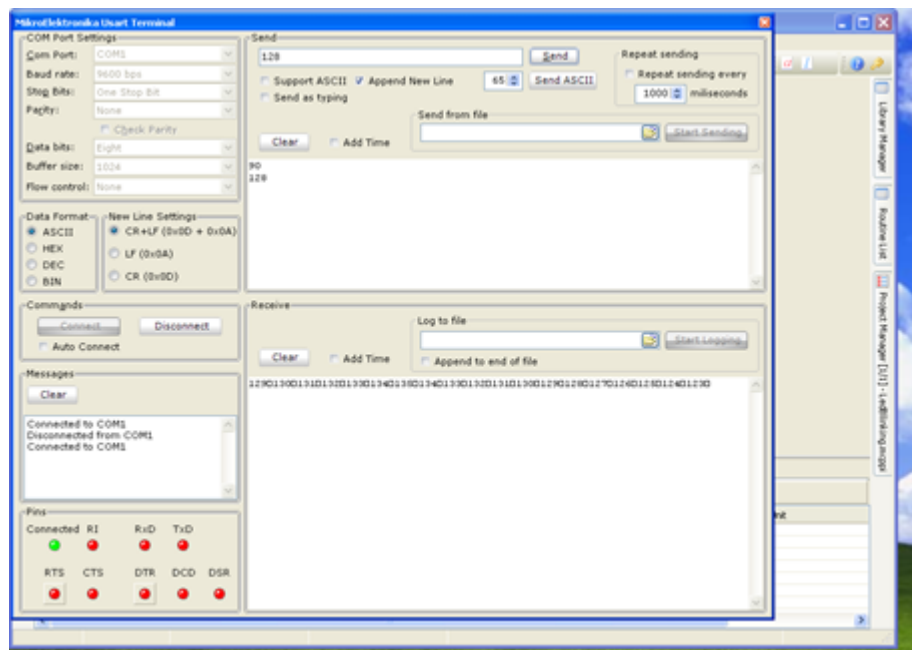
La ejecución de la aplicación en esta oportunidad sólo modifica los valores del ciclo de trabajo de los PWM. De igual manera lee la velocidad teórica del motor en función del PWM que está ejecutándose por el controlador del módulo de potencia.

Figura 58. Aplicación de interfaz PC versión 1.0



Para que se lograra observar de mejor manera la ejecución de la aplicación al mismo tiempo se realizó una simulación de la comunicación con el controlador del módulo de potencia por medio de una computadora. La ejecución de la prueba se puede observar en la Figura 59. Esta prueba se realizó utilizando una terminal de comunicación serial.

Figura 59. Simulación de la comunicación de la aplicación de interfaz PC con el módulo de potencia



A medida que el desarrollo del módulo aumentó, la aplicación necesitó que fuera más compleja y presentar al usuario muchos más comandos. Fue necesario implementar una interfaz gráfica que fuera intuitiva para el manejo de los actuadores presentes en el prototipo de la silla de ruedas.

De igual manera se fueron sumando actuadores al módulo, primero se establecieron las señales de control para hacer trabajar los motores DC y que el prototipo tuviera la habilidad de moverse sobre el plano X-Y, a continuación se observan las modificaciones al programa.

La aplicación llegó a tener una integración tal que llegó a tener gráficas y despliegue en pantalla de la información de retroalimentación proveniente del controlador del módulo de potencia a continuación las Figuras 60, 61 y 62 muestran el desarrollo progresivo de la aplicación.

Figura 60. Programa de interfaz PC versión 2.0

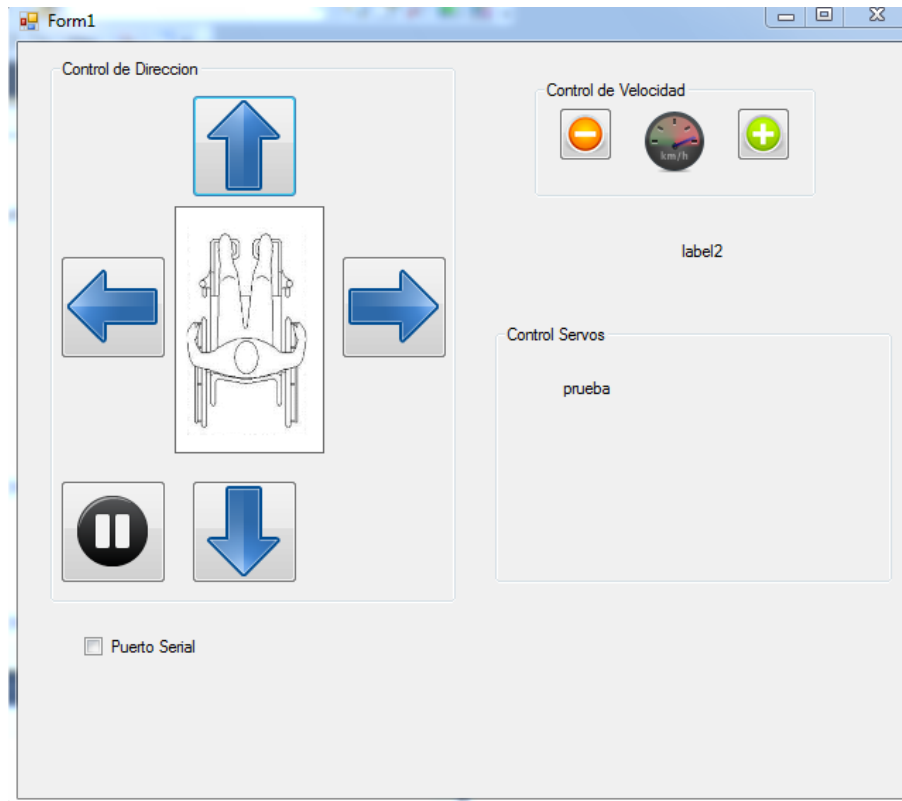


Figura 61. Programa de interfaz PC versión 2.5

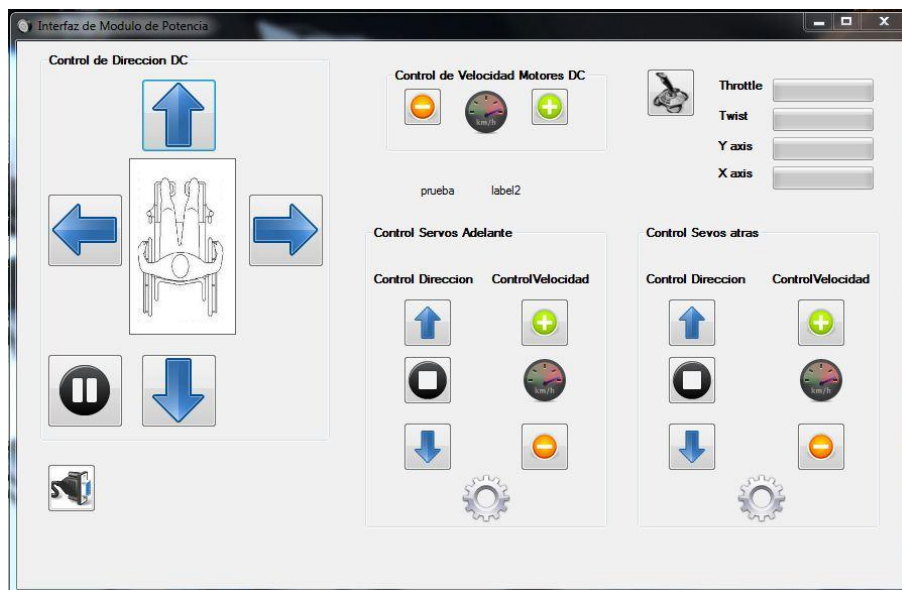
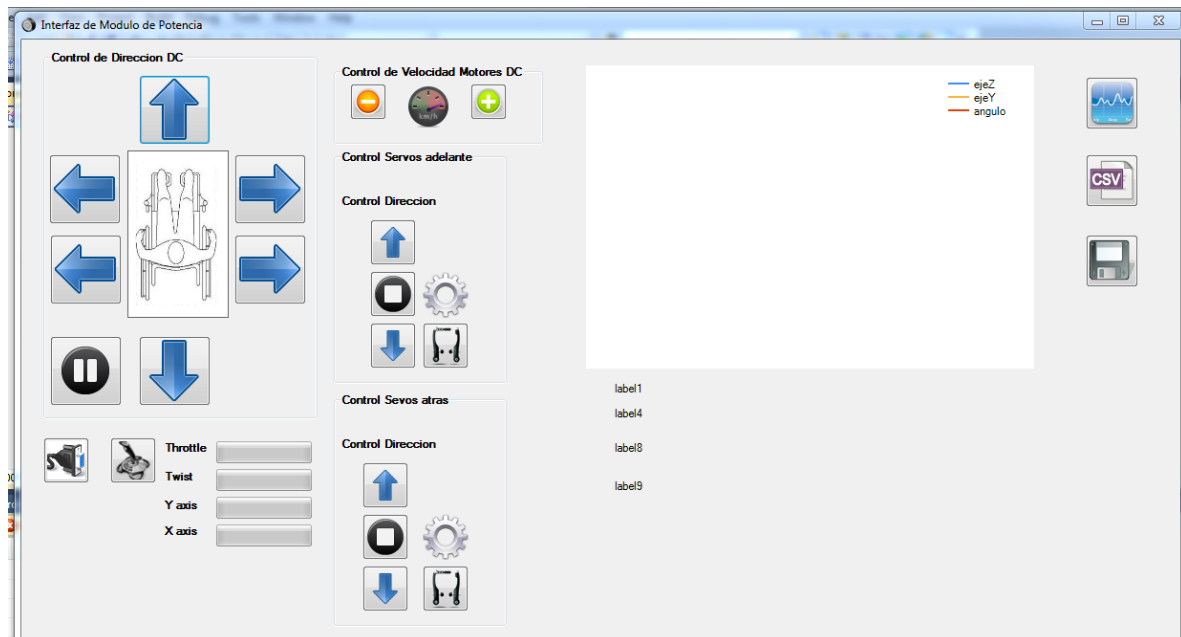


Figura 62. Programa de interfaz PC versión 3.0



### C. Discusión

La aplicación desarrollada presentó un buen desempeño al momento de realizar las pruebas preliminares del sistema, permitió de manera sencilla modificar los valores de operación de los actuadores.

Cuando se presentaron problemas en el comportamiento de drivers de los motores, la herramienta permitió depurar el problema dado que su funcionamiento permitía modificar los valores de las señales de control de los drivers de manera fácil desde la aplicación.

En el momento en que se empezó la fase de pruebas de campo del prototipo y aún no se contaba con la integración del módulo de interfaz humano-maquina la aplicación permitió realizar las pruebas de movimiento. Para esto se debió entrelazar el programa con los eventos producidos por un joystick. Con esto fue posible realizar llamadas a los métodos escritos en el programa para establecer un movimiento en el prototipo de la silla. Con la ayuda de estos cambios fue posible comenzar con el proceso de pruebas de

campo. Con esto el control del prototipo se realizó de manera intuitiva y proveía de manera más rápida los comandos de movimiento dados por el usuario desde la aplicación.

## DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL PCB PARA EL MÓDULO DE POTENCIA

### A. Diseño experimental

Después de tener los dispositivos que conforman el módulo de potencia trabajando en un protoboard, se vio en la necesidad de diseñar e implementar un PCB. Que contuviera los elementos para hacer funcionar el módulo de potencia. Se utilizó como herramienta de diseño Altium Designer 09 [20], y el proceso de desarrollo es el siguiente:

1. Realizar un esquemático en el programa Altium designer donde interconectan todos los elementos a utilizar para que el módulo de potencia opere.
2. Generar un template de PCB con los parámetros establecidos por los requerimientos de CNC a utilizar para fresar la tarjeta.
3. Importar los elementos del esquemáticos en la hoja de PCB
4. Colocar los elementos en el PCB, considerando la mejor ubicación posible
5. Hacer las rutas para la capa "*bottom layer*" del PCB para que la mayoría de rutas se realicen en esta capa del PCB
6. Hacer las rutas para la capa "*top layer*" del PCB
7. Revisar el PCB y realizar modificaciones para que todos los componentes se puedan soldar adecuadamente.
8. Soldar los componentes en el PCB

### B. Resultados

Se realizó el esquemático del circuito, para después proceder a implementar el PCB donde, los tracks deben tener un ancho de 30 mills y los pads un ancho de 70 mills. El drill con una medida de 30mills. El clearance entre los tracks y pads debe ser de 30 mills también.

La colocación de los elementos del PCB, se realizó teniendo en cuenta la función del elemento, tamaño, y el grado de interacción con los demás componentes del PCB. Con esto se logra que los recorridos de los track no sean tan complicados y se optimice el diseño del PCB. En la figura 44 se observa el esquemático y en la Figura 63 el PCB final.

Figura 63. Diagrama esquemático del Módulo de potencia

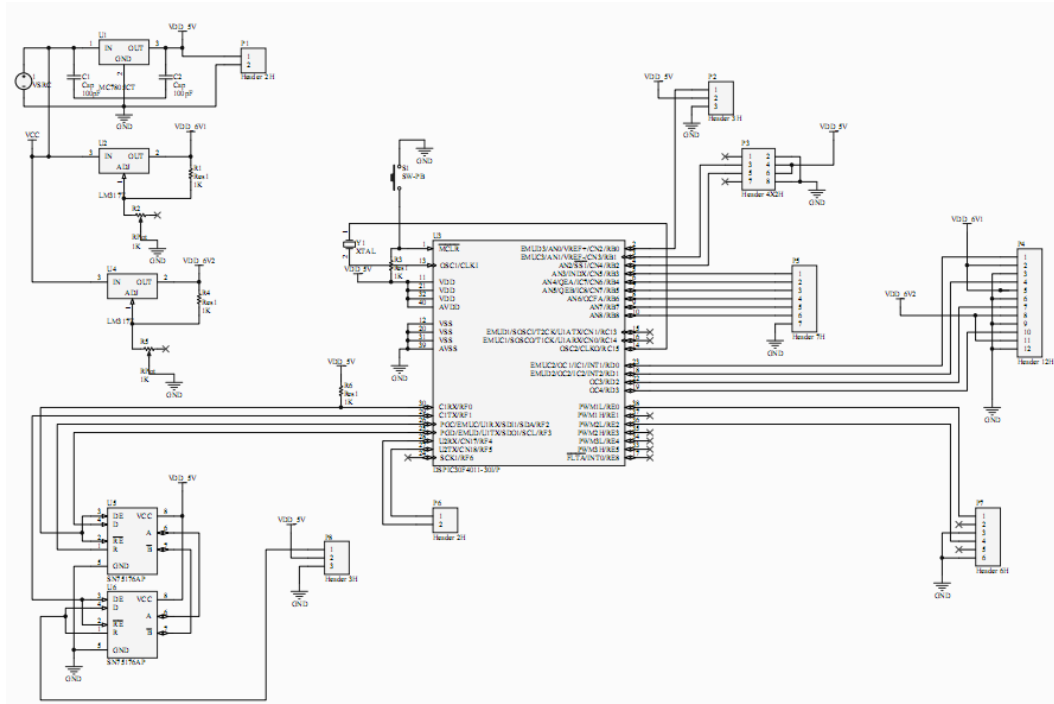


Figura 64. PCB del Módulo de potencia

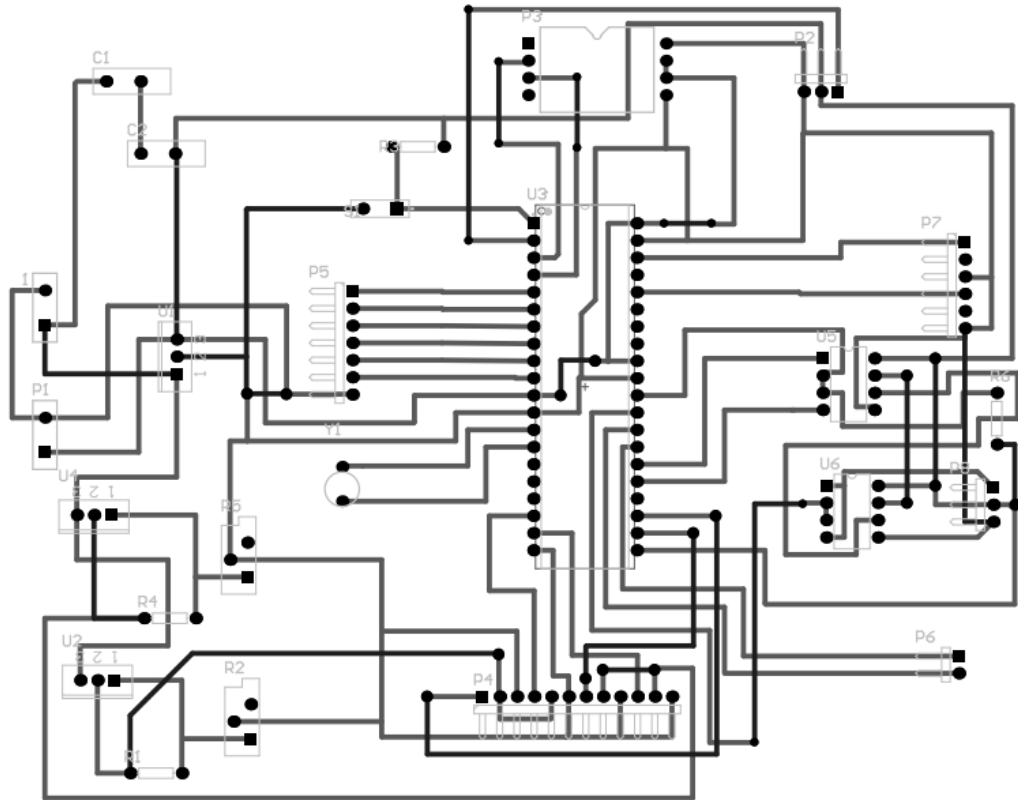
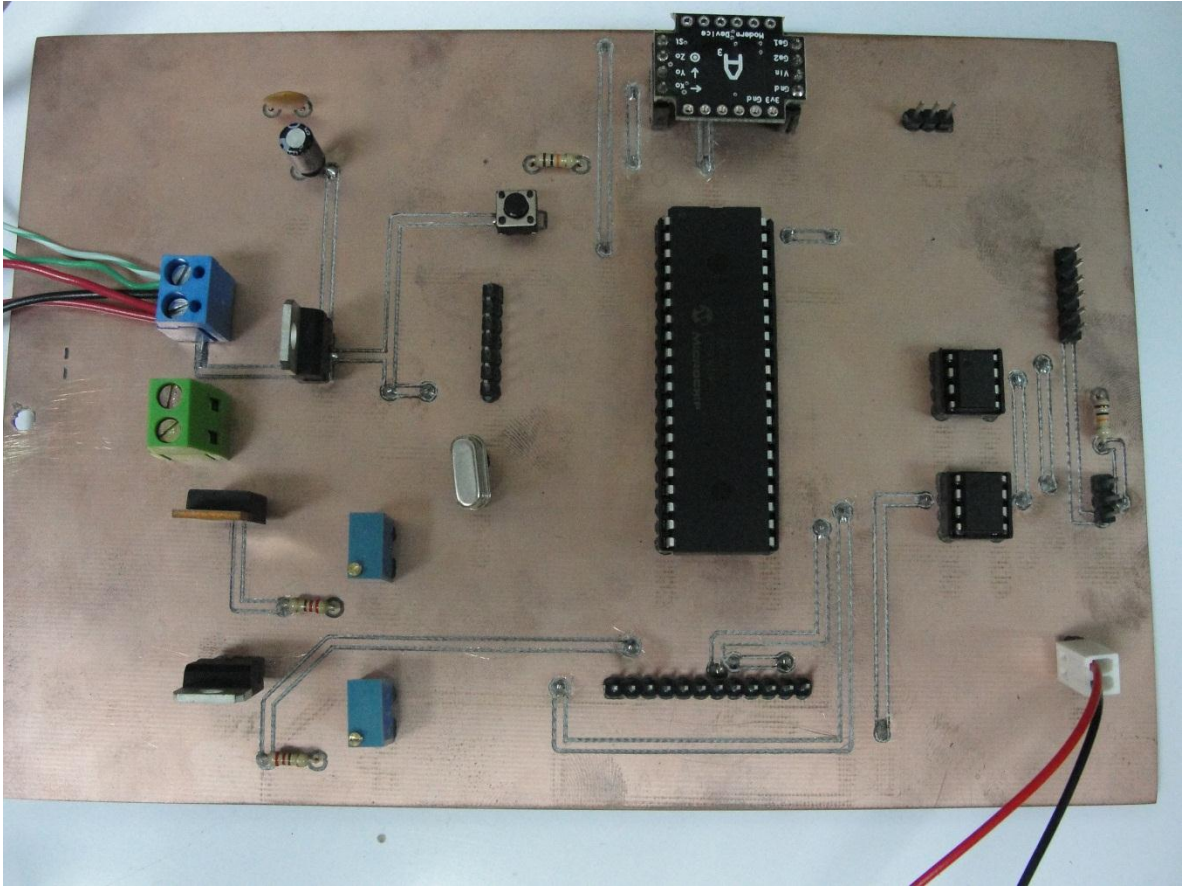


Figura 65. PCB del Módulo de potencia



### C. Discusión

Se diseñó e implementó el PCB del módulo de potencia, donde las pruebas preliminares de la misma presento la presencia de voltajes parásitos dentro del PCB. Fue necesario realizar una labor de limpieza de las rutas, para corregir errores en el maquinado de la tarjeta.

Después de este trabajo aun fue posible observar voltajes parásitos dentro del área no trabajada del PCB, y fue posible observar un comportamiento no ideal en los elementos del PCB que tienen señales analógicas como salidas. Tomando esto en consideración es posible observar que la calidad de trabajo producida por la máquina en que se maquinó el PCB no es el mejor.

### **XIII. APÉNDICE C. MÓDULO DE MECÁNICA**

El desarrollo del trabajo de graduación se divide en una serie de capítulos, correspondientes a cada sección del diagrama de bloques del módulo de mecánica, teniendo como capítulos, el diseño de los soportes triangulares, el sistema de dirección, estructura principal, control de nivelación del asiento, y construcción del prototipo. En cada capítulo se incluye la metodología utilizada, los resultados y la discusión correspondiente. Esto ofrece una mayor claridad sobre lo realizado en cada parte del diseño del prototipo, mostrando con más detalle lo realizado en cada una de las áreas principales del diseño del prototipo. Es importante resaltar que todos los experimentos, pruebas y resultados realizados, están relacionados, mostrando el resultado final, como conjunto, en el capítulo de la construcción del prototipo.

#### **DISEÑO DE SOPORTES TRIANGULARES**

##### **A. Metodología**

1. El primer paso hacia la construcción del prototipo era diseñar el mecanismo que ayudaría a subir y bajar gradas. Se inició con una investigación de las distintas sillas que existen actualmente o han existido capaces de subir gradas, explicados anteriormente la sección de antecedentes. En conjunto se investigó robots que tuvieran el mismo tipo de función, y qué mecanismo utilizaban.

2. Luego de haber elegido parte del mecanismo a utilizar se diseñó la geometría en función del tipo de gradas que se deseaba subir. Anteriormente se comentó, que se escogió un estándar de gradas residenciales con mediadas de contra huella de 9.5 cm de alto y de huella de 12.5 cm de largo.

3. Delimitar la geometría de la estructura triangular a un perímetro establecido, el cual se diseñó que no fuera más grande que el diámetro de una llanta de una silla de ruedas convencional. El rango de diámetro que tienen estas ruedas son de entre 20 y 24 pulgadas, debido a que se estaba utilizando una escala 1:2 este rango corresponde a la 10 y 12 pulgadas.

4. Esta etapa consistió en realizar una serie de relaciones geométricas para poder obtener la distancia entre las ruedas, en función del diámetro deseado para cada rueda y el diámetro exterior de la geometría. Estas relaciones además permiten encontrar la geometría completa del soporte triangular. Por último en esta etapa se verificó que no existieran conflictos de colisión entre la estructura triangular y las gradas.

5. Determinar el tipo de transmisión mecánica de la entrada del motor hacia las ruedas. Se utilizaron las relaciones geométricas encontradas en las etapas anteriores para determinar el paso diametral de los engranajes del tren planetario. Luego con el paso diametral y la distancia entre centros se buscaron engranes en catálogos en internet.

6. Determinar las fuerzas que actuarían cuando la estructura estuviera estática, para poder encontrar las fuerzas radiales sobre los apoyos. Luego se hizo un análisis de fuerzas dinámico cuando el mecanismo subiera un escalón.

7. Seleccionar el material de los triángulos, los engranajes y los ejes. En el caso particular de los triángulos se realizó un análisis estático, utilizando la herramienta de software para análisis de elementos finitos (MEF) de Autodesk Inventor 2012 student edition [22] y determinar el factor de seguridad del material escogido bajo distintos escenarios de cargas.

8. Calcular la fuerza transmitida máxima permisible por diente y su dureza de superficie, de los engranajes. Además se determinó la geometría de los ejes y el material tomando en consideración la disponibilidad en el mercado.

9. Selección de los cojinetes, tomando en consideración la geometría de los ejes y determinar el factor de seguridad asumiendo el peso máximo deseado de la estructura.

10. Elaboración de los planos de construcción en base a los diseños en realizados con la herramienta de software Autodesk Inventor 2012 student edition. [22]

## B. Resultados

1. Estructura triangular. Se determinaron las siguientes relaciones para determinar la geometría básica de la estructura triangular.

$$B = \frac{D2 - D1}{2}$$

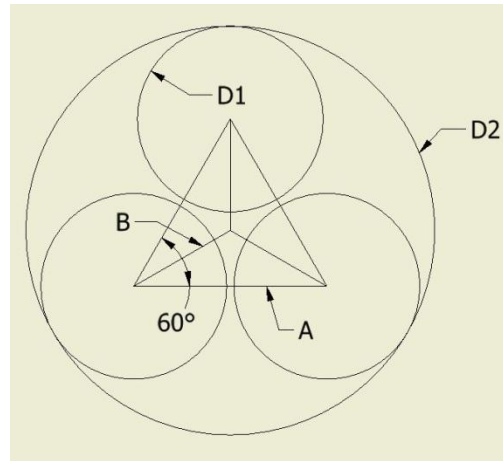
$$A = (D2 - D1) * \cos 30^\circ$$

$$P_d = \frac{D2 - D1}{4}$$

(1)

En donde  $P_d$  es el paso diametral de los engranajes a utilizar. Es importante resaltar que  $D_2$  tiene que ser mayor que  $D_1$  en todo momento. En la Figura 66, se muestra la geometría básica del triángulo y la identificación de cada uno de sus lados.

Figura 66. Geometría triángulo.



Luego se obtuvo una relación en función de la geometría para el tamaño máxima de contra huella que el mecanismo puede superar, obteniendo la ecuación ( 2 ), para la contra huella máxima.

$$CU_{max} \leq (A) * \sin 60$$

( 2 )

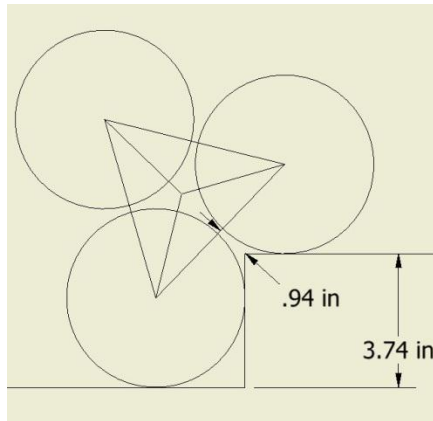
La Tabla 56 muestra los valores elegidos para la geometría del perfil de la estructura triangular.

Tabla 56. Dimensiones perfil triangular.

D1	D2	A	B	Pd	CU <sub>max</sub>
11 in	5 in	5.196 in	3 in	1.5 in	4.5 in

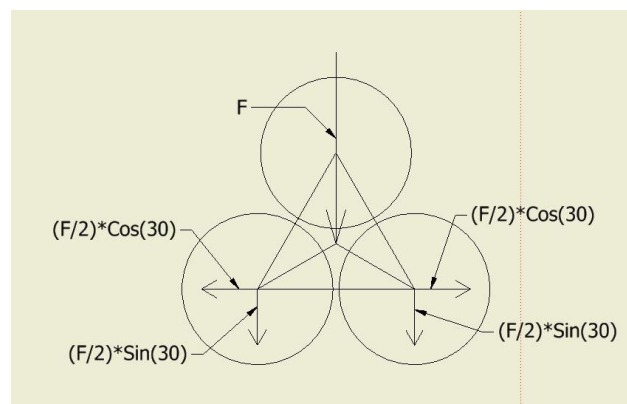
La Figura 67 muestra la primera revisión de interferencia de la geometría con el valor de contra huella de 3.74 in (9.5 cm).

Figura 67. Revisión de interferencia perfil simple



Debido a que se deseaba minimizar el peso de los triángulos y a su costo más bajo de maquinado, se optó por utilizar plástico de ingeniería, siendo más específicos un nylon 6-6. Con el diseño del perfil básico se realizó un análisis sencillo de las fuerzas que actuarían sobre los cuatro soportes triangulares, asumiendo el peso máximo delimitado para el prototipo. La Figura 68 muestra el análisis de las fuerzas sobre los apoyos en posición normal.

Figura 68. Análisis de fuerza sobre los apoyos posición 1



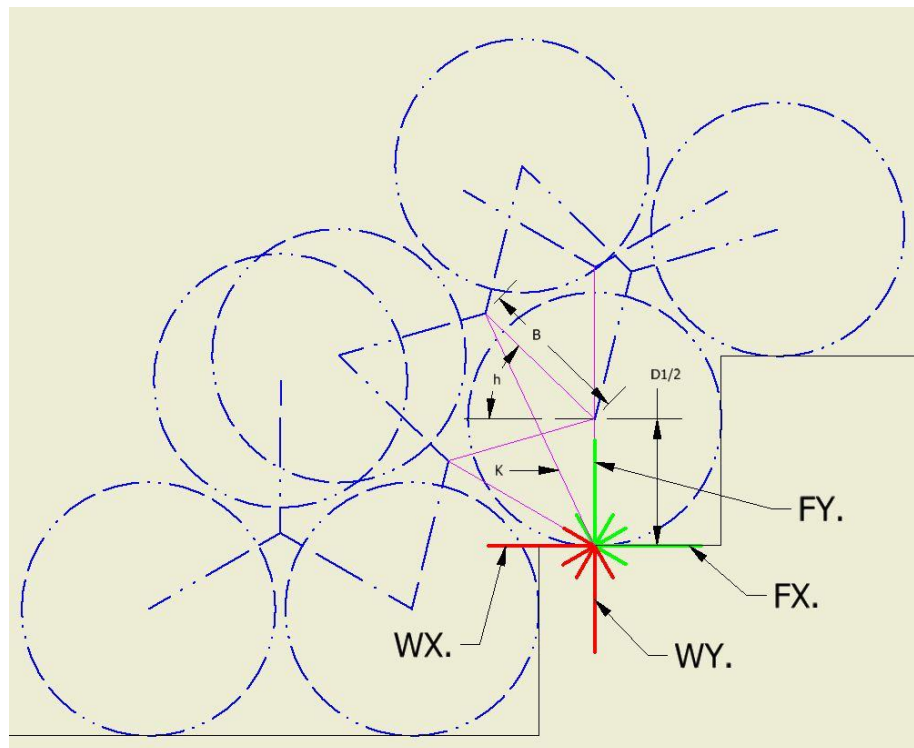
Observando la Figura 68 se aprecia que en esta posición habrá dos fuerzas intentando separar las ruedas tangentes al suelo hacia afuera y otras dos correspondientes al componente del peso en el eje vertical. En la Tabla 17, se muestran las distintas fuerzas que afectarían.

Tabla 17. Fuerzas en los apoyos con peso máximo

Peso máximo	Peso por apoyo	Fuerzas horizontales.	Fuerzas verticales.
50 lbf	12.5 lbf	$\pm 5.41$ lbf	3.125 lbf

En el caso en donde solo estuviera apoyado en cuatro ruedas, el peso sobre los cojinetes de los vértices en contacto con el suelo sería igual a 12.5 lbf. En la Figura 69, se puede observar el perfil de la estructura triangular subiendo por dos escalones, junto con las fuerzas que actúan sobre el punto de contacto.

Figura 69. Análisis de trayectoria de subida



Observando la figura el valor de  $B$ , y  $D_1$  hacen referencia a las dimensiones previamente indicadas. En relación al valor de  $K$  es la distancia que existe desde el punto en donde se aplica el torque, para girar la estructura, y el punto tangente entre el suelo y la rueda, en este caso se despreció la deformación de la rueda. La letra  $h$  indica el ángulo del segmento  $B$  respecto a la horizontal paralela al suelo, midiendo en sentido horario y positivo. Utilizando la ley de coseno se determinó la ecuación ( 3), en función del ángulo de giro,  $h$ , para la distancia del segmento  $K$ .

$$K(h) = \sqrt{B^2 + \left(\frac{D_1}{2}\right)^2 - 2(B)\left(\frac{D_1}{2}\right)\cos(90 + h)}$$

( 3)

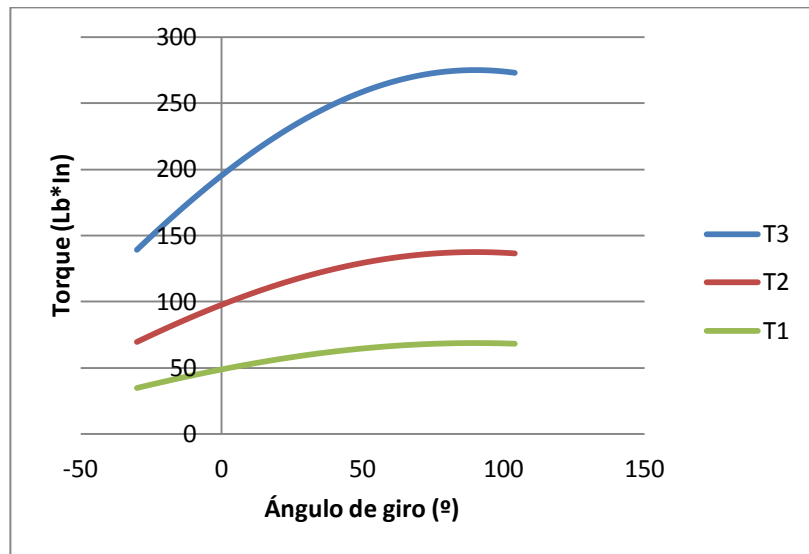
Utilizando la Figura 69 se determinó el ángulo máximo de giro, ecuación (4), que necesita el mecanismo para posicionar una rueda sobre el siguiente escalón, tomando en consideración el alto de la contra huella y la longitud del segmento A.

$$h_{max} = 150 - \sin^{-1}\left(\frac{CU}{A}\right)$$

(4)

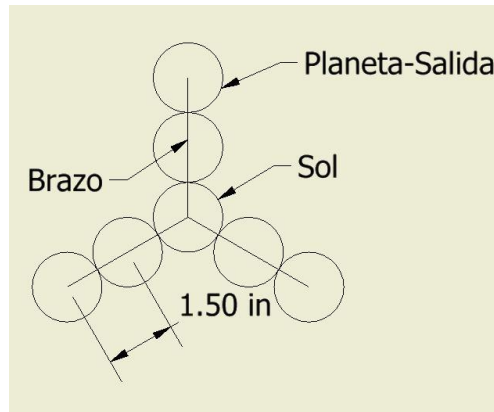
Utilizando las ecuaciones 3 y 4 y tomando el peso máximo deseado, 50 lb, para el prototipo se obtuvo la Figura 70, en donde se observa el torque necesario para hacer girar la estructura. Se analizaron 3 casos, con cuatro triángulos girando al mismo tiempo, con dos triángulos girando y con el caso crítico, solamente uno.

Figura 70. Ángulo de giro vs. Torque requerido mínimo



2. Engranajes planetarios. Al tener el paso diametral se determinó el siguiente arreglo de engranajes planetarios. Es importante resaltar que el brazo en este sistema es el triángulo, como se observa en la Figura 71.

Figura 71. Arreglo de engranajes planetarios



Debido a que se buscaba que la estructura fuera lo más liviana posible y económica se optó por un engranaje de resina de acetileno (ver Tabla A 3 en anexos las propiedades de dicho material). La siguiente tabla muestra las propiedades físicas del engranaje elegido.

Tabla 58. Propiedades de engranaje seleccionado

Paso diametral.	Ancho de cara.	Número de dientes.	Diámetro interno.	Ángulo de presión	Material.	Máxima fuerza de transmisión @ 168 rpm
1.5 in <sup>-1</sup>	0.250 in	36	.250	20	Resina de Acetileno.	34.32 lbf

Luego de haber seleccionado la geometría del engranaje se calculó la fuerza de transmisión máxima permisible por diente. Se utilizó el criterio de Lewis modificado y el criterio de AGMA para dureza de superficie, el procedimiento detallado se muestra en la sección de anexos bajo memoria de cálculo 1. Se debe recordar que la máxima velocidad deseada para el prototipo es de 2.5 mi/h correspondiente a 168 rpm con una rueda de 5 pulgadas de diámetro. La tabla 4 muestra la fuerza máxima permisible por diente.

3. Cojinetes. En el cálculo de los cojinetes fue considerado que se tendrían dos cojinetes por eje y en donde se analizaron para el caso crítico, con el peso del prototipo distribuido equitativamente en solo cuatro ejes. El diámetro interno de los cojinetes fue el mismo que los engranajes, con un diámetro interno de 0.250 in. Utilizando los catálogos de SKF [22] y el criterio de vida para rodamientos establecido por el ABMA [22] se calculó el factor de seguridad del cojinete seleccionado. La Figura A 8 de la sección de anexos muestra las especificaciones del cojinete utilizado.

Tabla 59. Cojinete elegido con peso máximo

Modelo	RPM	Fuerza radial	Fuerza axial	Factor de seguridad
WEERB 004-2ZR	168	6.25 lb	6.25 lb	1.36

4. Diseño 3D y planos. A continuación se muestra la Figura 72 y 73 con el diseño de la estructura triangular ensamblada completamente. Los planos con las acotaciones a más detalle se pueden encontrar en la sección de planos, en anexos.

Figura 72. Diseño 3d estructura triangular

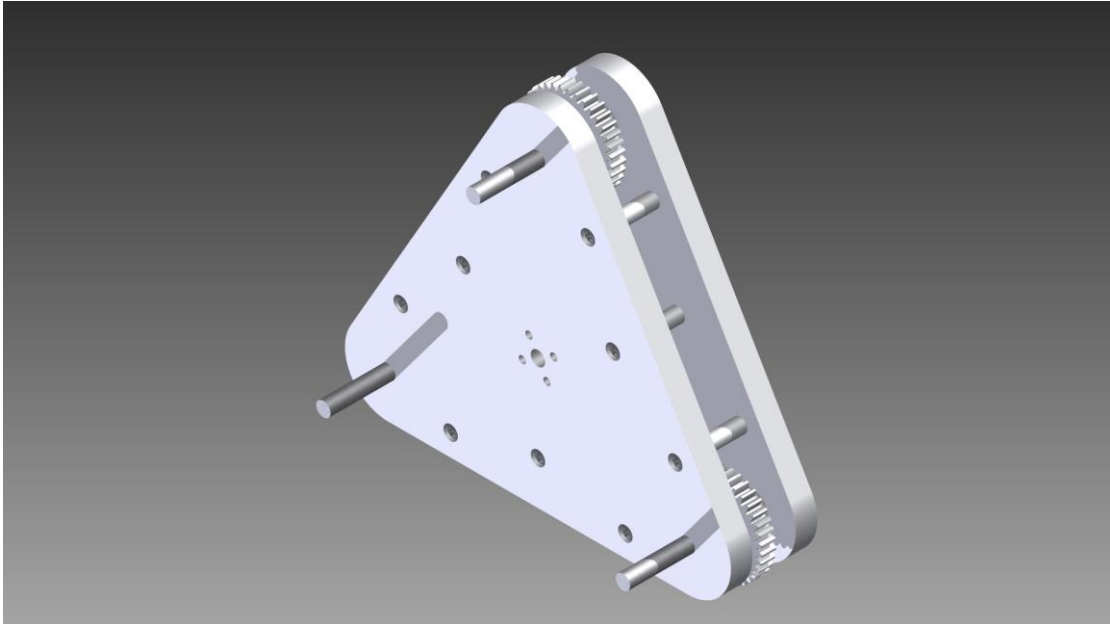
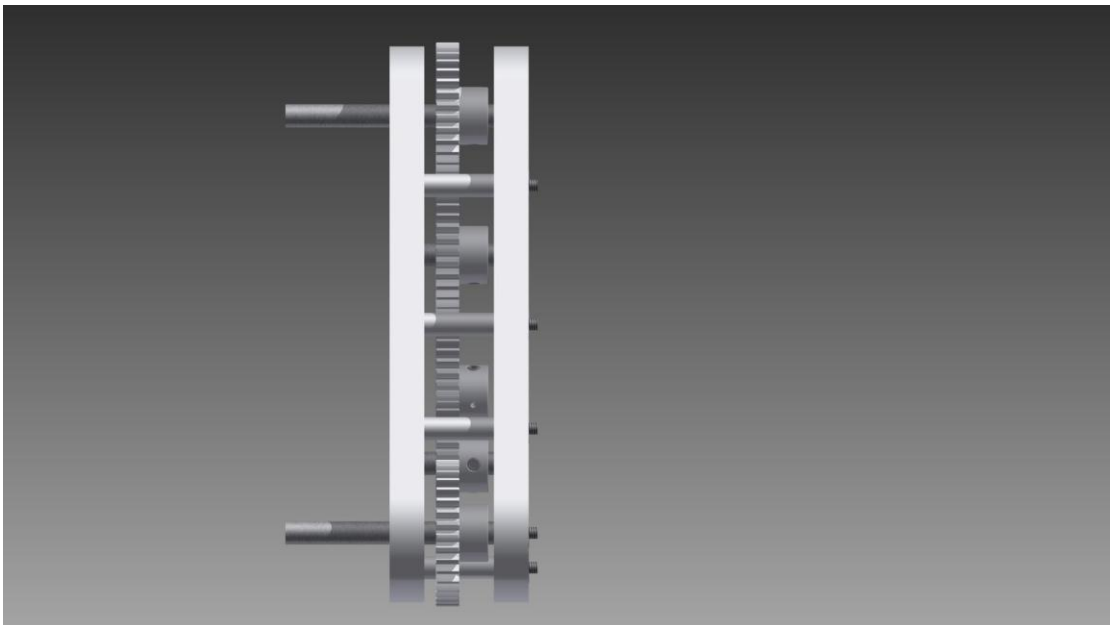


Figura 73. Vista lateral 3D estructura triangular



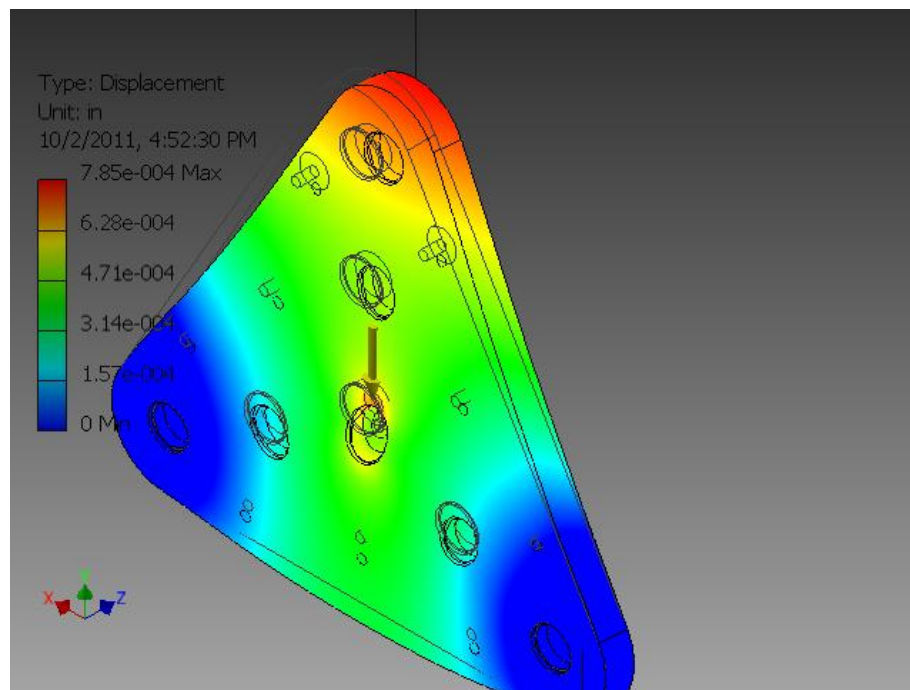
5. Análisis de energía de deformación en la estructura triangular. Luego de finalizar el diseño de la estructura triangular se realizó un análisis estático utilizando la herramienta de software de estados finitos previamente mencionado en la metodología. Con la simulación de estados finitos de Autodesk Inventor Student edition 2012 [22], se obtuvo la Tabla 60Tabla .

Tabla 60. Esfuerzo de Von Mises y Factor de seguridad

Fuerza aplicada	Esfuerzo de Von Mises (máx.).	Desplazamiento (máx.).	Factor de seguridad
50 lb	0.80 Kpsi.	$7.85 \times 10^{-4}$ in	15.0

A continuación se presenta la Figura 74 que muestra la simulación correspondiente al detalle del desplazamiento de la pieza.

Figura 74. Desplazamiento pieza triangular



### C. Discusión

El diseño de la estructura triangular requirió que se utilizaran conceptos básicos de geometría para así poder dimensionar las relaciones obtenidas, ver ecuación 9. Uno de los aspectos más relevantes fue obtener la contra huella máxima permitida, en función de la geometría del apoyo. Saber esto permite conocer la altura en la que deben estar posicionados los sensores de distancia ultrasónicos del módulo de comunicación [22] y así determinar si es posible subir la grada que se tenga enfrente. Esta información se utilizó más adelante en la instalación de los sensores en la estructura final del prototipo.

Utilizando la geometría seleccionada junto con la ecuación 9, se pudo escoger el tipo de engranaje a utilizar para el tren de transmisión planetario. El motivo de seleccionar engranes de plásticos fue por su bajo peso, y sumados con su reducido tamaño, su inercia es bastante baja lo que permite acelerar y frenar su movimiento con mayor facilidad. Esto permitió la selección de los motores para el movimiento de estos engranajes. Un aspecto que determinó la selección de los engranajes y la mayor parte de componentes del prototipo fue al hecho que el financiamiento obtenido, limitaba a que todos los componentes fueran adquiridos en Estados Unidos y estuvieran ya terminados. Por último, se calcularon la fuerza máxima permisible para el diente del engranaje de plástico a 168 rpm, correspondiente a la velocidad máxima, utilizando el criterio de Lewis modificado, junto con el procedimiento recomendado por el fabricante de los mismos. Este valor fue de utilidad para compararlo con la fuerza transmitida por el motor seleccionado.

En el análisis de cojinete se supusieron cargas radiales, correspondientes a las cargas por el peso total del prototipo y cargas axiales, ya que al cruzar existen fuerzas provocadas por la fricción que actúan sobre la cara del cojinete. Se utilizó el caso crítico, con el peso máximo deseado para la estructura, distribuida solamente en cuatro apoyos. A pesar de tener un factor

de seguridad de 1.36, ver Tabla 57, esto se consideró suficiente, ya que como se indicara más adelante el peso del prototipo fue mucho menor a 50 lb.

La selección de los ejes fue en función del diámetro interno del engranaje, y se seleccionaron de acero inoxidable. El acople entre los ejes y los engranajes fue utilizando un tornillo de presión ya incluido en el engranaje. El material del triángulo fue seleccionado buscando un peso bajo y de fácil maquinado, ya que estos se tuvieron que maquinar en el país por lo que se escogió un plástico de ingeniería disponible en Guatemala.

Con la geometría y material de las distintas partes se realizaron los planos generales y modelos tridimensionales. En el caso de la estructura triangular se sometió a un análisis estático utilizando el criterio de Von Mises para materiales dúctiles, con la ayuda de la herramienta de análisis de elementos finitos de Autodesk Inventor [22] y así poder determinar su factor de seguridad al ser sometida al peso máximo de 50 lb. El factor de seguridad de 15, ver Tabla 58, indica que la estructura triangular esta diseñada para soportar un peso mucho mayor a las 50 libras.

## SITEMA DE DIRECCIÓN

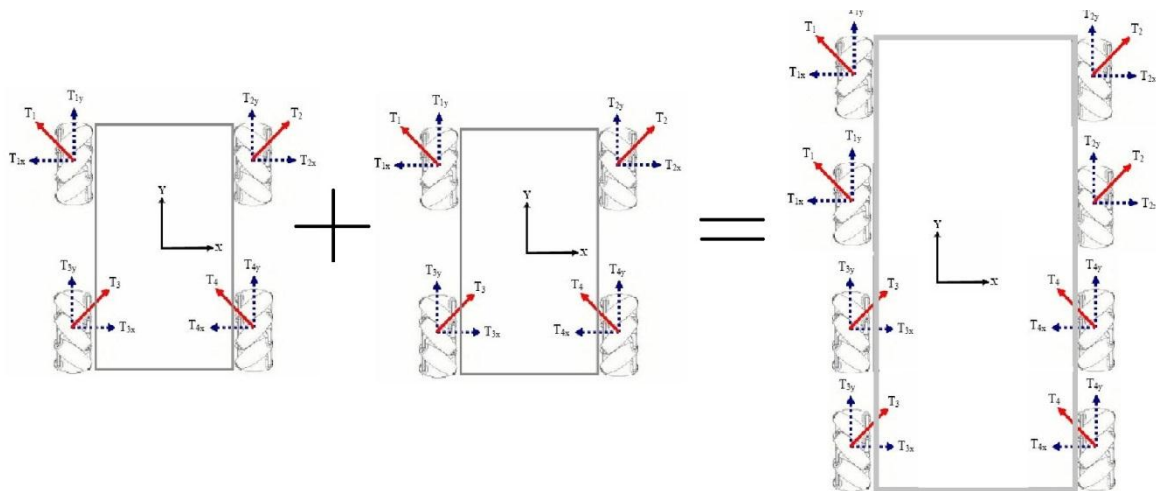
### A. Metodología

1. Se realizaron dos modelos del sistema de dirección, el primero utilizando las ruedas Mecanum y el segundo con las ruedas convencionales.
2. Análisis del sistema de dirección con las ruedas mecanum encontrando el modelo de fuerzas en función del torque.
3. Análisis con ruedas convenciones para determinar la relación que debe existir entre el ancho entre ruedas y distancia entre ejes.

### B. Resultados

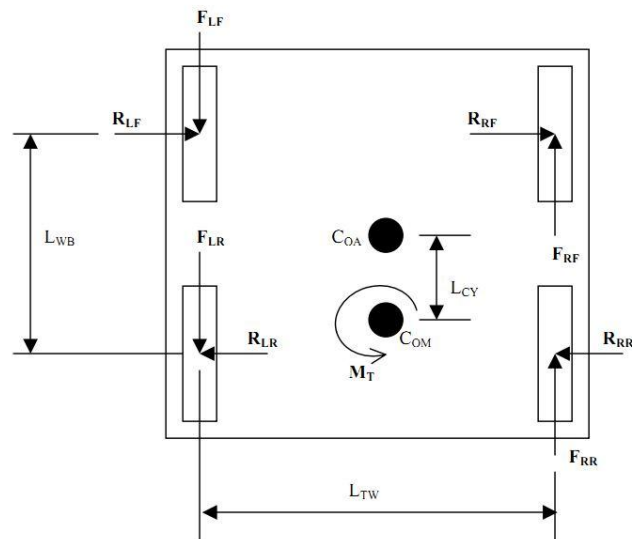
#### 1. Análisis con ruedas Mecanum.

Figura 75. Vectores de fuerza con 8 ruedas mecanum en contacto con el suelo



2. Análisis con ruedas convencionales. La Figura 76, muestra el diagrama de momentos y fuerzas para que un vehículo de 4 ruedas gire sobre su propio centro. Donde  $L_{WB}$  y  $L_{TW}$  son las distancias entre ejes y ancho, respectivamente. El  $C_{OM}$  es el centro de masa y  $C_{OA}$ , centro geométrico del vehículo.  $L_{CY}$  es la distancia el  $C_{OM}$  y  $C_{OA}$ .

Figura 76. Análisis de fuerza para que un vehículo gire sobre su propio eje



[22]

Haciendo un análisis de momento de la figura anterior se obtiene la desigualdad 5.

$$\mu_x L_{TW} > \mu_y \left( L_{WB} - 4 \frac{L_{CY}^2}{L_{WB}} \right)$$

(5)

Haciendo una extensión del cálculo de la ecuación 5, se obtuvo la siguiente para 8 ruedas en contacto.

$$2\mu_x L_{TW} > \mu_x \left[ (L_{WB_1} + L_{WB_2}) - 4L_{CY}^2 \left[ \frac{1}{L_{WB_1}} + \frac{1}{L_{WB_2}} \right] \right]$$

(6)

### C. Discusión

Después del diseño del mecanismo triangular, la segunda parte crítica del diseño del prototipo fue el sistema a utilizar para la dirección. Al investigar sobre sistemas de dirección se encontró que un tipo de ruedas que permitían un movimiento bastante versátil eran las ruedas mecanum. El uso común de este tipo de ruedas es una configuración mínima de 4 ruedas. Por lo que el reto en este diseño era crear un sistema de dirección utilizando 8 ruedas mecanum. El concepto fue sencillo ya que al tener el doble de ruedas, consecuentemente se tiene el doble de vectores de fuerza tanto en el eje Y y X, como se muestra en la Figura 75. Eso mantiene el equilibrio de las fuerzas y se logra mantener los distintos movimientos en la Figura 66.

Un inconveniente con las ruedas mecanum es su elevado costo de fabricación. Al tener la condición de utilizar productos ya terminados y de procedencia estadounidense, si no se encontraban ruedas del diámetro deseado se tendrían que fabricar en el país y sin el financiamiento. Debido a este riesgo se decidió analizar otro sistema de dirección que fuera sencillo de adaptar sin modificar físicamente el resto de componentes del prototipo.

El sistema de dirección que se escogió como segunda opción es reemplazando las ruedas mecanum por ruedas convencionales. En este caso la dirección sería invirtiendo la rotación de las ruedas del lado izquierdo respecto al derecho y viceversa para lograr una dirección similar a la de los tractores o tanques. El objetivo de este sistema es hacer girar el vehículo sobre

su propio centro geométrico. Sin embargo con este tipo de dirección surgen ciertos inconvenientes a tomar en consideración, las distancias entre ejes. Se realizó un análisis simple de momentos alrededor del centro geométrico, tomando en consideración la distancia del centro de masa a este punto. En este análisis se supuso que el centro de masa estaría sobre el eje de simetría del vehículo, paralelo a la longitud, ya que en el diseño del prototipo se está buscado un diseño simétrico. En el momento justo que el vehículo comienza a girar, es cuando se rompe la condición de equilibrio, por lo que este análisis parte de un análisis estático en el instante antes que comience a girar. Por último se tomaron en consideración los coeficientes de fricción estático entre la rueda y el suelo y suponiendo que ninguna rueda se deforma.

Al realizar este análisis para la configuración con cuatro ruedas, se obtuvo la desigualdad mostrada en la ecuación 13. Posteriormente se realizó el mismo análisis con un vehículo de 8 ruedas, obteniendo la ecuación 14, en donde  $L_{WB1}$  y  $L_{WB2}$  son las distintas distancias entre ejes. Si se toma en consideración que el material de todas las ruedas es el mismo, su coeficiente de fricción será el mismo en los cuatro puntos, suponiendo que no exista un cambio de superficie durante el giro. Esto hace que los coeficientes de fricción se eliminen de las expresiones. Finalmente si el centro de masa coincide con el centro geométrico del vehículo, las condiciones de giro se simplifican. En el caso de 4 ruedas la condición a cumplirse para que gire es que el ancho sea mayor a la distancia entre ejes. En el caso de 8 ruedas la condición a cumplirse es que dos veces el ancho debe ser mayor que la suma de las dos distancias entre ejes.

## ESTRUCTURA PRINCIPAL

### A. Metodología

1. Al tener el mecanismo triangular ya definido fue necesario escoger la distancia entre ejes. Esta fue una de las partes más importantes, ya que se debió considerar varios aspectos, como interferencia con las gradas y el hecho de respetar el largo máximo de 65 cm que puede ocupar el prototipo, delimitado por la escala. Utilizando las distintas ecuaciones encontradas en el diseño de la geometría triangular se realizó un programa de computadora, utilizando C# [22], para verificar que no existieran conflictos de interferencia.

2. El siguiente paso fue el de escoger qué sistema se utilizaría para impulsar la rotación de los soportes triangulares y la rotación de las ruedas.

3. Se utilizaron los datos calculados para la fuerza máxima permisible por diente de cada engranaje y el torque mínimo requerido para lograr la rotación de los soportes triangulares. Al tener estos valores se buscaron motores de bajo peso y que fueran sencillos de implementar. Finalmente con los motores escogidos se diseñó la transmisión del movimiento de las ruedas y de la estructura triangular.

4. Al estar establecida la forma que estarían acoplados los motores con los soportes triangulares, se diseñó el chasis principal de la estructura de una forma que cada parte del prototipo fuera modular. Además la estructura fue sometida a un análisis estático, utilizando el criterio de energía de deformación y la herramienta de software de análisis de elementos finitos previamente utilizado.

5. La siguiente etapa fue el de diseñar el sistema de nivelación mecánico del asiento. Esto comprendió la selección de un mecanismo capaz de mover el

asiento sobre un pivote establecido, junto con el tipo de motor a utilizar para dicho propósito. Además se diseñó un asiento tomando en consideración la escala del prototipo, así como la ubicación de todo el sistema del asiento en el chasis principal.

6. Posteriormente se determinó la ubicación de los distintos sensores dentro de la estructura y el espacio para el sistema de control, potencia y baterías. La última etapa fue la de escoger el tipo de ruedas a utilizar respetando el diámetro previamente establecido y que tuvieran un coeficiente de fricción alto para optimizar la tracción de estas con el suelo.

## B. Resultados

1. Distancia entre ejes. Utilizando el programa de interferencias para este propósito en particular, ver Figura A 9 en anexos, se determinó que la distancia entre ejes debía respetar la siguiente desigualdad, ecuación 7, en donde  $x$  es la distancia entre los ejes centrales de cada estructura triangular.

$$43 \text{ cm} \geq x \geq 28 \text{ cm}$$

(7)

2. Selección de motores. Luego de una investigación por distintos proveedores se realizó una tabla de los posibles motores a utilizar, ver tabla A 6 en anexos. Recordando lo calculado anteriormente, el torque máximo requerido en el escaro crítico para la rotación del triángulo, 275 lb\*in, y el número de revoluciones por minuto deseadas, 168 rpm, se escogieron dos motores.

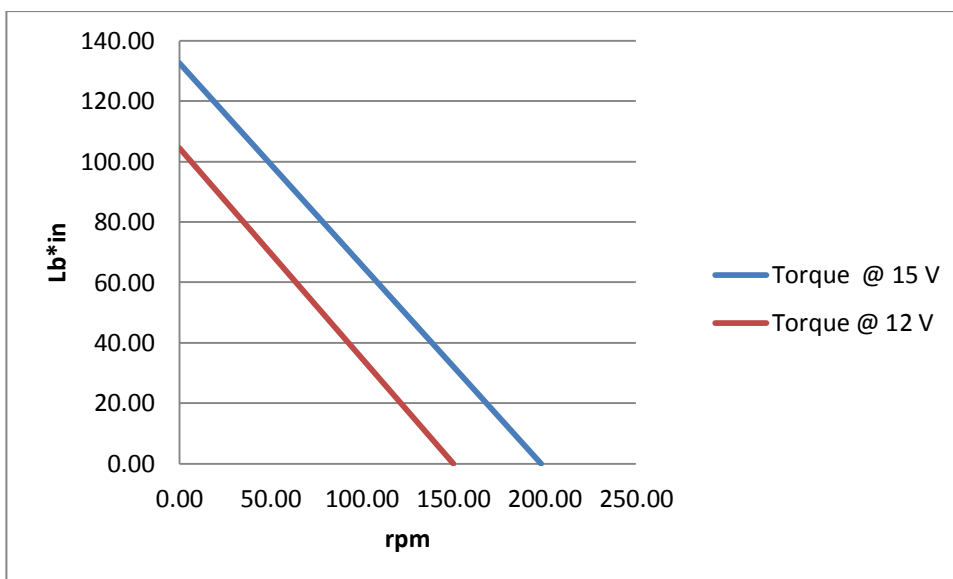
Tabla 61. Motores seleccionados

Motor	Voltaje (V)	Corriente (A)	RPM	Torque (lb- in)	Peso (lb)
-------	-------------	------------------	-----	--------------------	-----------

SPG7955A	6	0.3	5.68	280.94	0.63
Parallax	12-15	1.5-3	150-190	-	3.2

En el caso del motor Parallax y el que será utilizado para el movimiento de las ruedas fue necesario encontrar la curva del motor para así poder determinar el torque a distintos voltajes.

Figura 77. Curva de motor, motor DC Parallax



Luego se obtuvieron las curvas para la potencia mecánica, y de las fuerzas transmitidas contra las permisibles de los engranajes a distintas velocidades.

Figura 78. Curva de potencia mecánica, motor DC Parallax

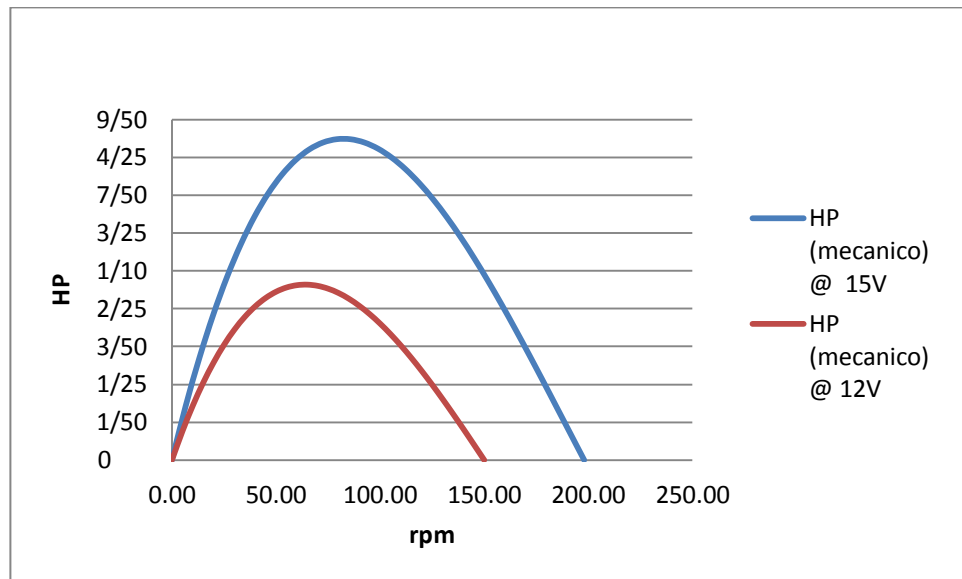
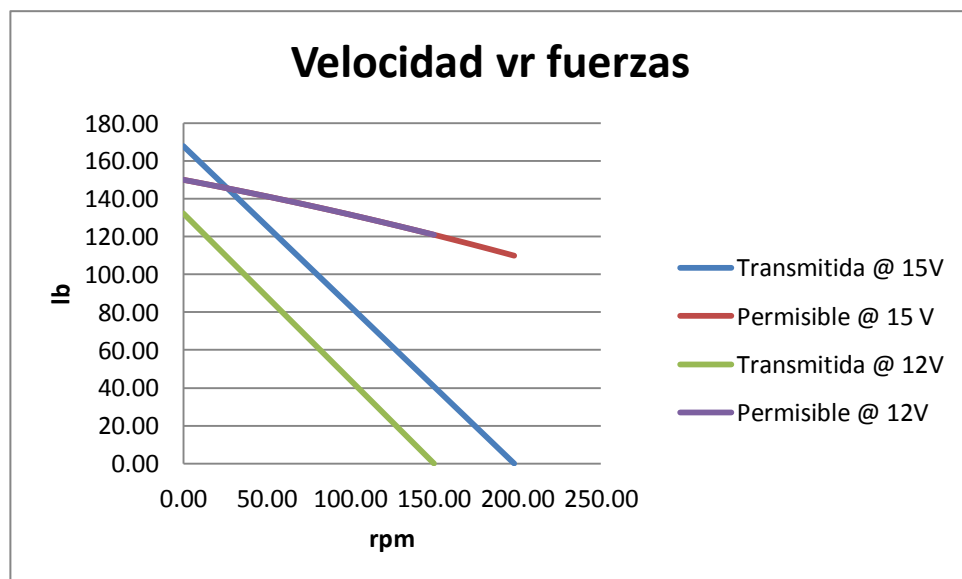


Figura 79. Curva de fuerzas, motor DC Parallax



A continuación se muestra la Tabla 62, con el torque necesario para poder mover el prototipo suponiendo tres escenarios, con dos ruedas en el suelo, con cuatro ruedas en el suelo, ocho ruedas en el suelo, asumiendo un coeficiente de fricción de 0.8 [22].

Tabla 62. Torque requerido para mover el prototipo

# Ruedas en contacto	2	4	8
Torque (lb*in)	50	25	12.5

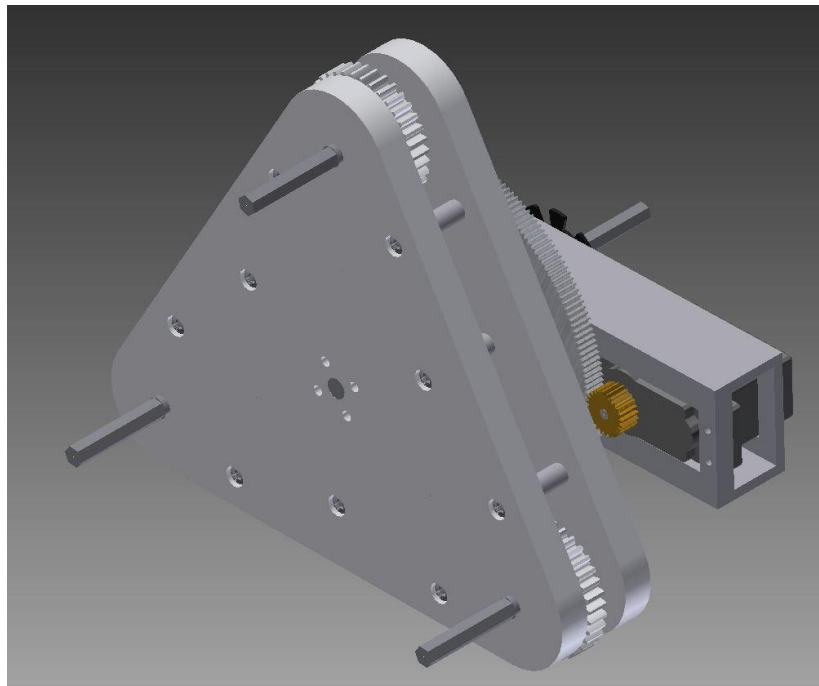
En relación al motor SPG7955A, ver Figura 80, está conformado por una reducción de engranajes entre un piñón de bronce y una corona de aluminio 6061-T6 junto con un servo motor de giro continuo.

Tabla 63. Especificaciones Motor SPG7955A

Reducción	Fuerza axial máxima.	Fuerza radial máxima.	Servo motor
13.5:1	200 lb	200 lb	HS-7955TG

### 3. Acoplamiento de los motores con la estructura triangular.

Figura 80. Motor SPG7955A acoplado a la estructura triangular



En la Figura 80 se aprecia que el piñón del servo mueve al engrane mayor de aluminio el cual esta físicamente acoplado con la estructura triangular. El eje que mueve los engranes pasa dentro del eje que soporta la estructura triangular, las Figuras 81 y 82, muestran lo descrito.

Figura 81. Detalle transmisión rotación triangulo

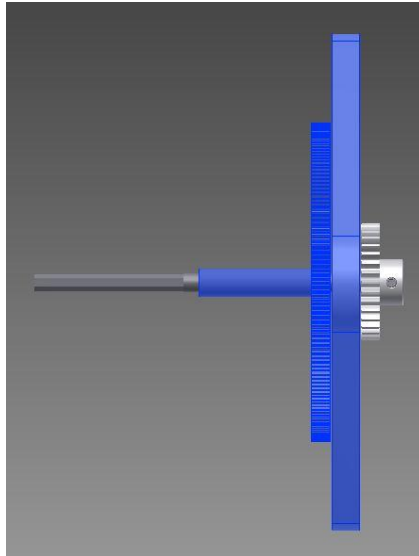


Figura 82. Detalle transmisión del engranaje solar

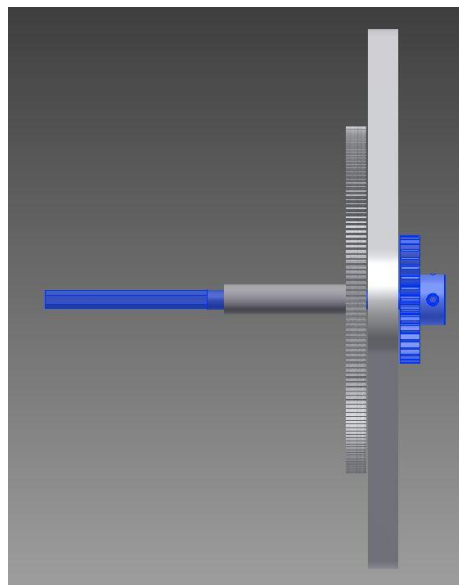
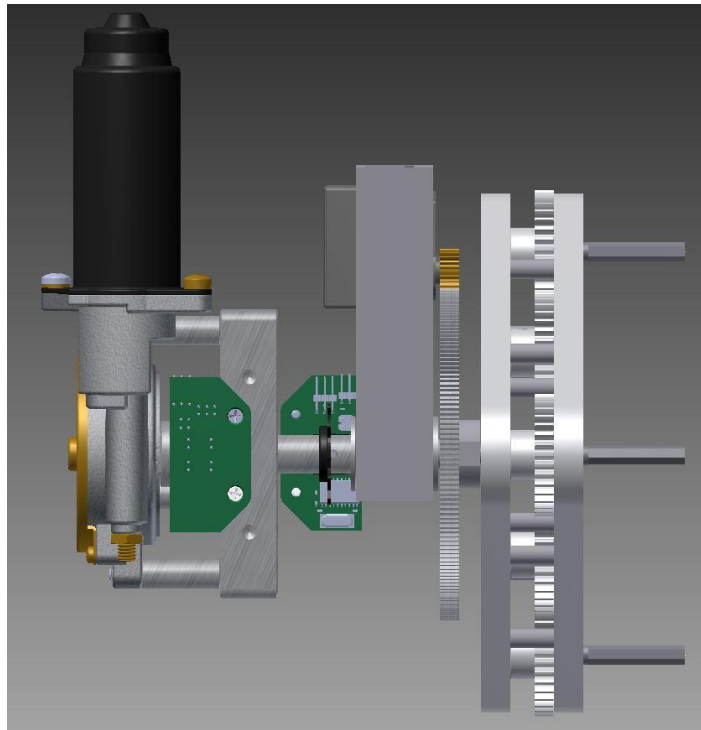


Figura 83. Acoplamiento del motor DC Parallax con el eje de transmisión del engranaje solar



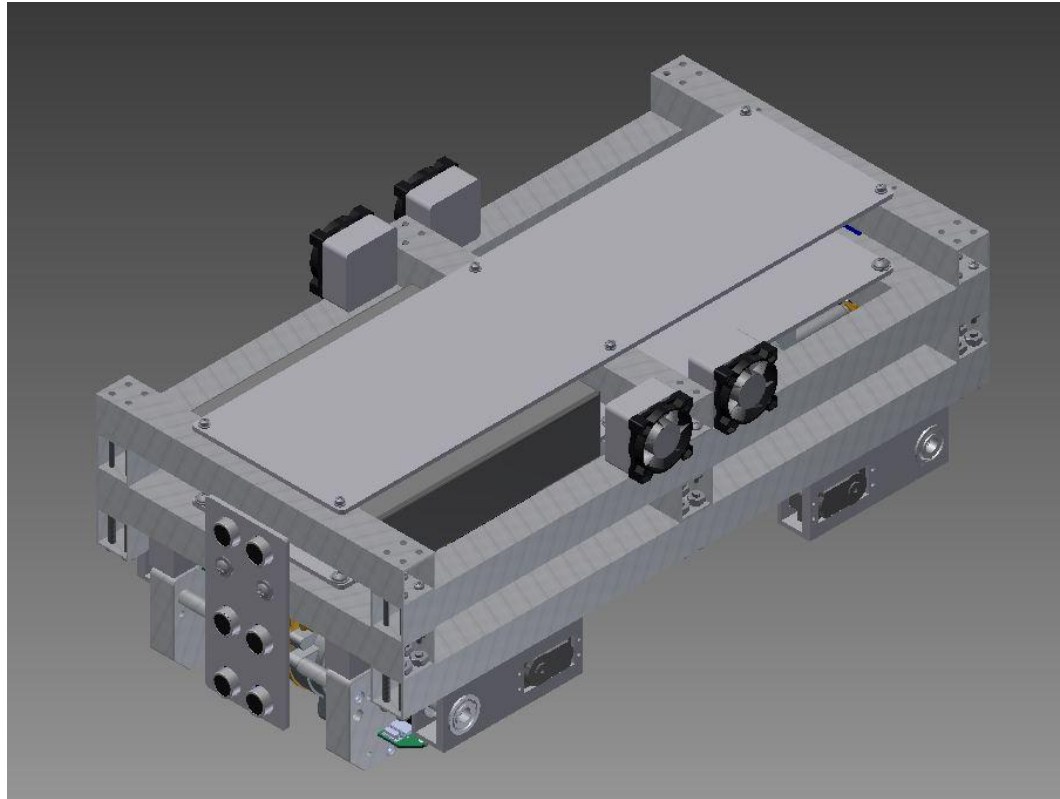
4. Diseño del chasis de la estructura. Terminado el diseño de la implementación de los motores se procedió con el del chasis principal, en donde se realizó un análisis estático, utilizando la herramienta de software de método de elementos finitos utilizado anteriormente. En la Tabla 64, se muestran los detalles relevantes.

Tabla 64. Análisis estático chasis principal

Fuerza aplicada	Esfuerzo de Von Mises (máx.).	Desplazamiento (máx.).	Factor de seguridad
180 lb	0.74 Kpsi.	$1.73 \times 10^{-4}$ in	15.0

La Figura 84, muestra el diseño final junto con la batería, sensores ultrasónicos, sensores de rotación, motores y puentes “H”. En la sección de planos en anexos se puede encontrar los planos del chasis, así como imágenes mostrando de manera más detallada las distintas partes.

Figura 84. Diseño del chasis del prototipo



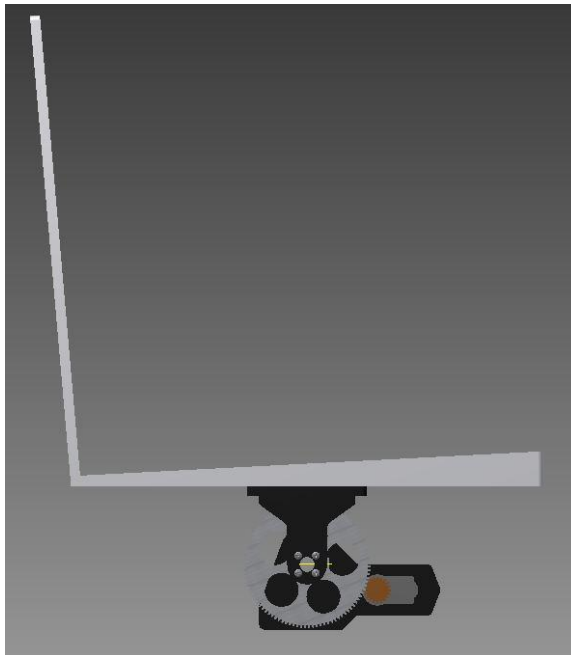
5. Diseño del mecanismo de nivelación del asiento. A raíz que el prototipo no debe soportar el peso de una persona, el diseño del mecanismo que controla el nivel del asiento se simplifica. Al final se implementó un sistema de servo con caja reductora incluido del mismo fabricante que el motor SPG7955A. La Tabla 65 muestra el detalle de dicho servo motor.

Tabla 65. Especificaciones Motor SPT400

Reducción	Fuerza axial máxima.	Fuerza radial máxima.	Servo motor
5:1	7lb	7 lb	HS-7985MG

La Figura 85, muestra el diseño final del sistema de nivelación del asiento. Los planos se encuentran en la sección de anexos.

Figura 85. Diseño del sistema de nivel del asiento



## 6. Diseño del prototipo final.

Figura 86. Verificación de interferencia diseño final

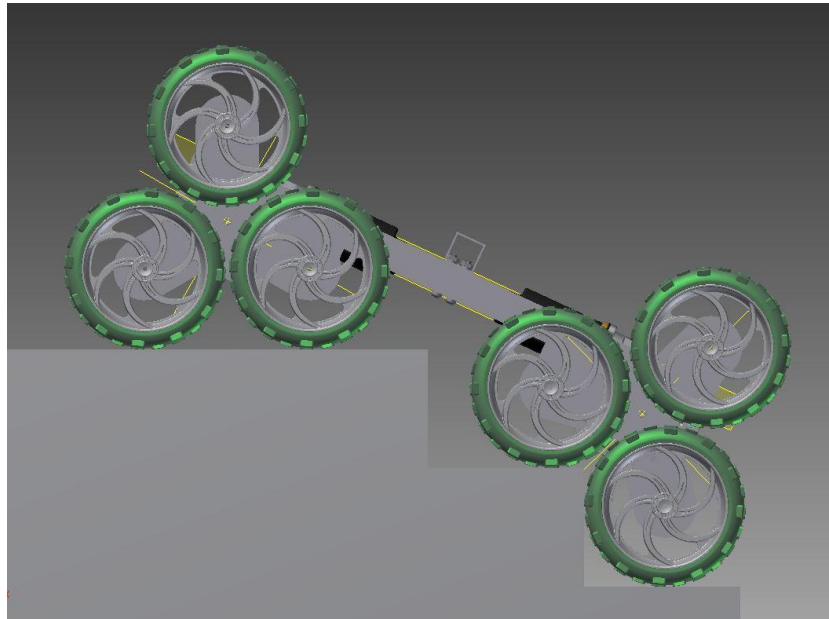


Figura 87. Detalle del ensamblaje final de los motores dentro del chasis

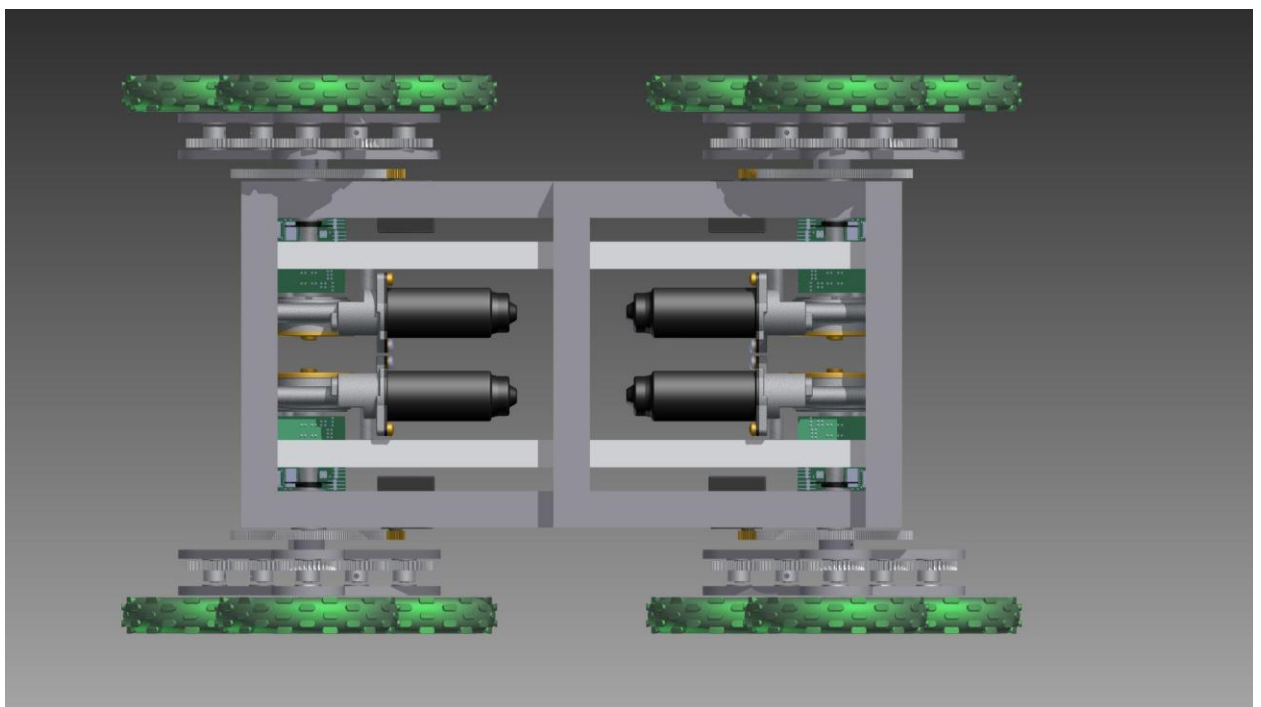
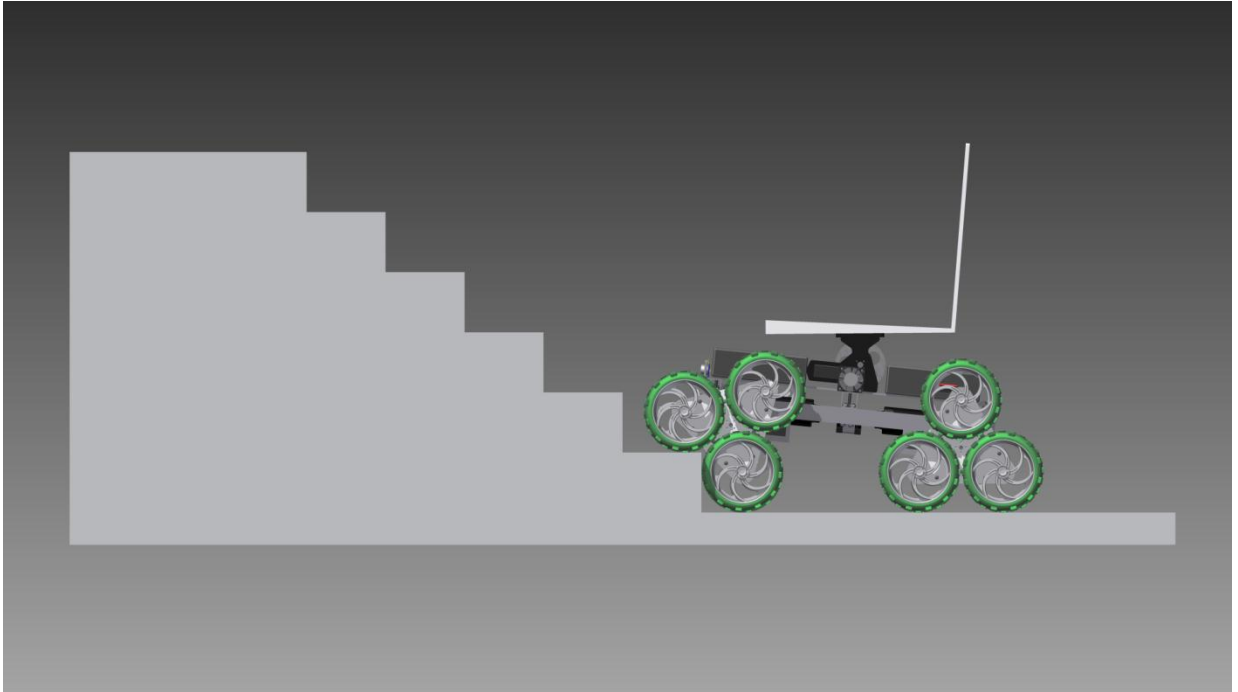


Figura 88. Imagen 3D subiendo primer escalón



En la Tabla 66, se muestran las dimensiones generales del diseño final, las cuales otorgan una idea general del área que ocupa. Los planos con acotaciones detalladas se encuentran en la sección de planos, en anexos.

Tabla 66. Características diseño final

Peso Final aproximado	# ruedas en contacto	Ancho	Distancia entre ejes 1	Distancia entre ejes 2	Condición de giro
33.31 lb	4	14.57 in	14.42 in	-	14.57 > 14.43
	8	14.57 in	9.224 in	19.63 in	29.14 > 28.85

### C. Discusión

La distancia entre ejes se seleccionó, verificando que la distancia entre centros no creara conflicto con las gradas y la geometría simple. Para facilitar este cálculo se diseñó un programa que permite verificar este fenómeno de manera sencilla, ver Figura A 9. Luego de haber terminado la construcción del diseño tridimensional del chasis se realizó una simulación de la posición más crítica de subida, ver Figura 86, y se comprobó que no mostrara ningún problema.

En la selección de motores se tuvo que realizar la curva de motor para el motor DC de Parallax, ya que este en su hoja de fabricante [22] no las incluía. Investigando en los foros de la compañía se encontró el torque de agarrotamiento o torque máximo de sujeción de estos motores para 15 y 12 voltios. Luego se realizaron las curvas de motor ya que para cada voltaje el fabricante indicaba las revoluciones máximas sin carga. Con esta información se obtuvieron las Figuras 76 y 77. Luego utilizando el mismo procedimiento utilizado en la memoria de cálculo 1, se graficó la fuerza de transmisión máxima permisible para los voltajes de 15 y 12 V a distintas rpm, obtenido la Figura 78. En esta figura se puede apreciar que para todas las fuerzas por debajo de las gráficas de las fuerzas permisibles el engranaje las podrá soportar. Es importante notar que en el voltaje máximo de 15 voltios el engrane ya no podrá soportar la fuerza transmitida.

El diseño del asiento se hizo tomando en consideración que tuviera 95 grados el respaldo de inclinación respecto a la horizontal. Posteriormente se optó por implementar un servo motor con caja reductora, utilizados para controlar inclinación de cámaras de video, para el nivel de la silla. Esto se hizo pensando en un sistema fácil de construir y de fácil desmontaje ya que por debajo de esto se encuentran las baterías.

El chasis de la estructura fue construido que fuera sencillo de fabricar, liviano y con el espacio suficiente para albergar a todos los componentes necesarios. Se optó por utilizar perfiles de aluminio cuadrados, ya que estos además de ser livianos permiten un mejor ordenamiento del cableado interno. Luego de haber diseñado el chasis principal este fue sometido a un análisis estático utilizando la herramienta de análisis de elementos finitos de Autodesk Inventor [2], ver Figura A 15.

Finalmente se agregaron al diseño los soportes triangulares con sus motores correspondientes, sensores ultrasónicos, baterías, control de posición y encoders, obteniendo el diseño mostrados en la Figura 88 y con más detalle en la sección de planos, en anexos.

## CONTROL DE NIVELACIÓN DE ASIENTO

### A. Metodología

1. Finalizado el diseño de prototipo, se continuó con la programación del control de nivelación del asiento. El objetivo principal en esta parte era poder compensar la inclinación que sufre la estructura al subir o bajar escalones y poder ajustar el asiento, para que siempre este paralelo al suelo.

2. Esta etapa comprendió en seleccionar un sensor que permitiera medir un ángulo de inclinación. Para esto se realizó una investigación sobre el dispositivo más adecuado para esta aplicación.

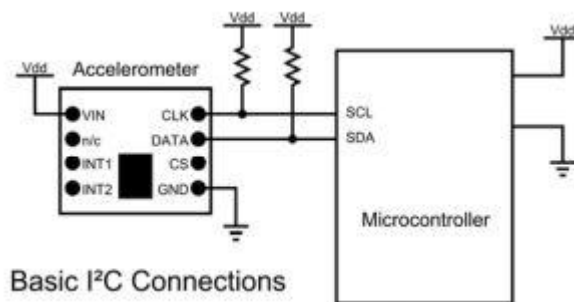
3. Posteriormente se definieron los anchos de pulso del servo motor para los ángulos comprendidos entre -45 y 45 grados, ya que las gradas no pueden tener un ángulo más grande que este, ver marco teórico.

4. La última parte fue definir un control PID (proporcional, integrativo y derivativo) y sus constantes correspondientes. Además se implementó un filtro digital pasa bajas y así poder evitar que el sistema tomara pequeñas vibraciones como un ángulo.

## B. Resultados

En la Figura 89, se muestra el circuito de la implementación del protocolo de comunicación I2C. En este tipo de comunicación se requieren solo dos cables y dos resistencias como “pull ups”, las cuales fueron de 4.7 K

Figura 89. [22] Diagrama de conexión del sensor MMA7455 y el micro controlador PIC16F887 utilizando el protocolo de comunicación I2C



Al medir los datos del sensor y leer la hoja del fabricante [22] se determinó que se requería aplicar un offset al eje X y eje Y para tener las lecturas de 0 g en cada eje cuando estos se encontraran paralelos al suelo. Dichos valores se encuentran en la Tabla 67.

Tabla 67. Valores de offset para los ejes del sensor MMA7455

Eje	Offset requerido
X	14
Y	25

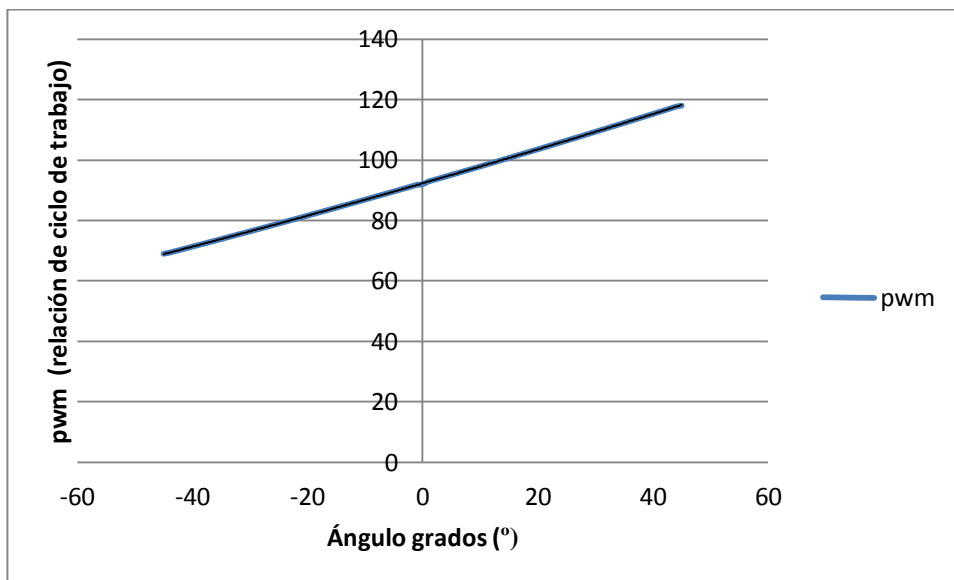
En la Figura 90, se muestra el sensor MMA7455 en una placa de protoboard sobre la bandeja de rotación de servo motor SPT400, en donde se ubicó el sensor en la parte central para tener una mejor lectura del ángulo.

Figura 90. Implementación del sensor MMA7455 sobre el servomotor, para el inicio de pruebas



Con el sensor instalado se inició una serie de mediciones con un transportador para obtener ángulos de 45, 30,0, -30, y -45 grados y determinar qué valor del parámetro del método de duty cycle de mikroC [22] correspondía a los ángulos. Luego se realizó una tabla y para los valores restantes, se realizó una aproximación exponencial y se obtuvo la Figura 91,

Figura 91. Ángulo vs. Parámetro PWM



Luego con una relación entre el porcentaje del ancho de pulso del servo y el ángulo, se hizo una prueba en donde se enviaban los pulsos calculados para

cada grado unitario entre -45 y 45 y se tomaron los valores de cada fuerza g medida en cada eje para cada ángulo.

Figura 92. Ángulo vs. Fuerza g en Eje X

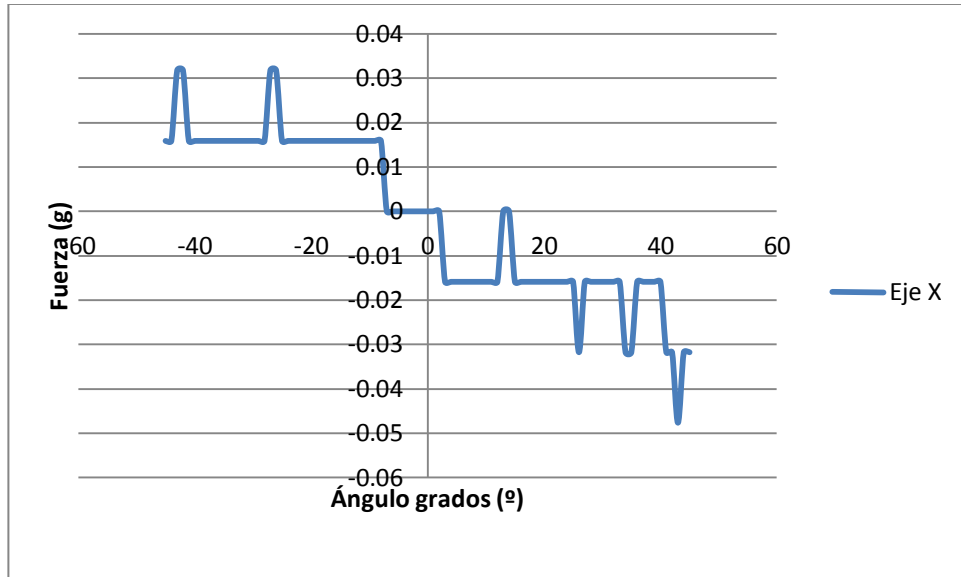


Figura 93. Ángulo vs. Fuerza g en Eje Y

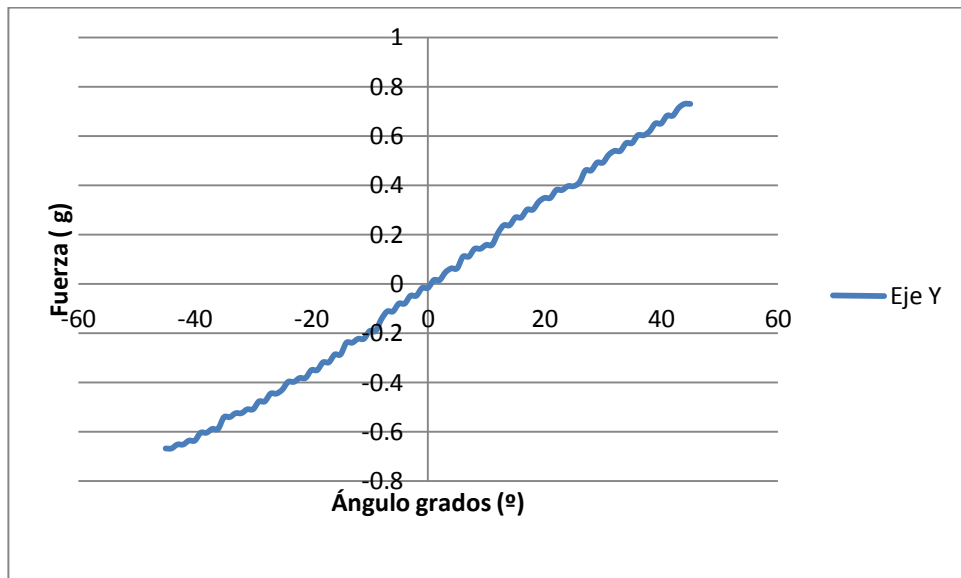
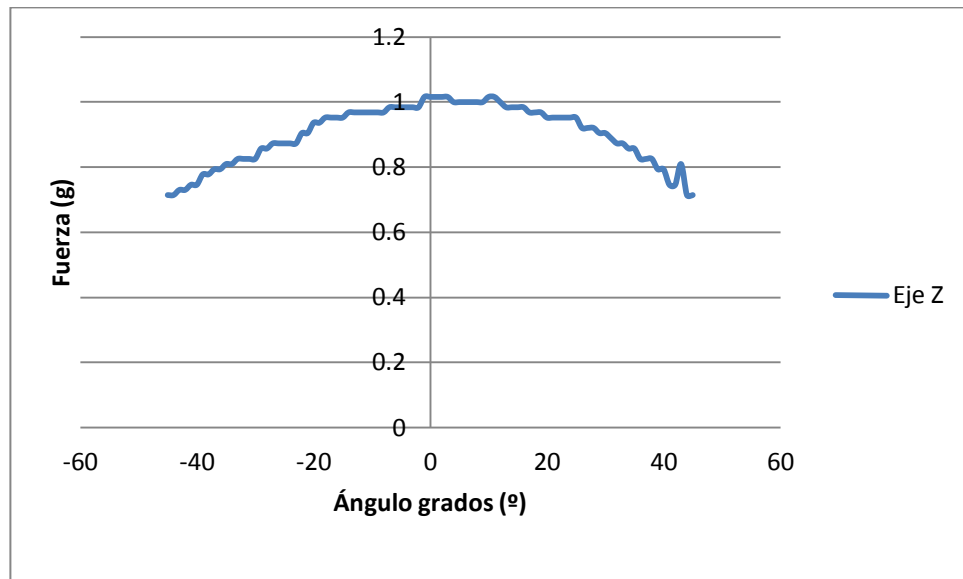


Figura 94. Ángulo vs. Fuerza g en Eje Z



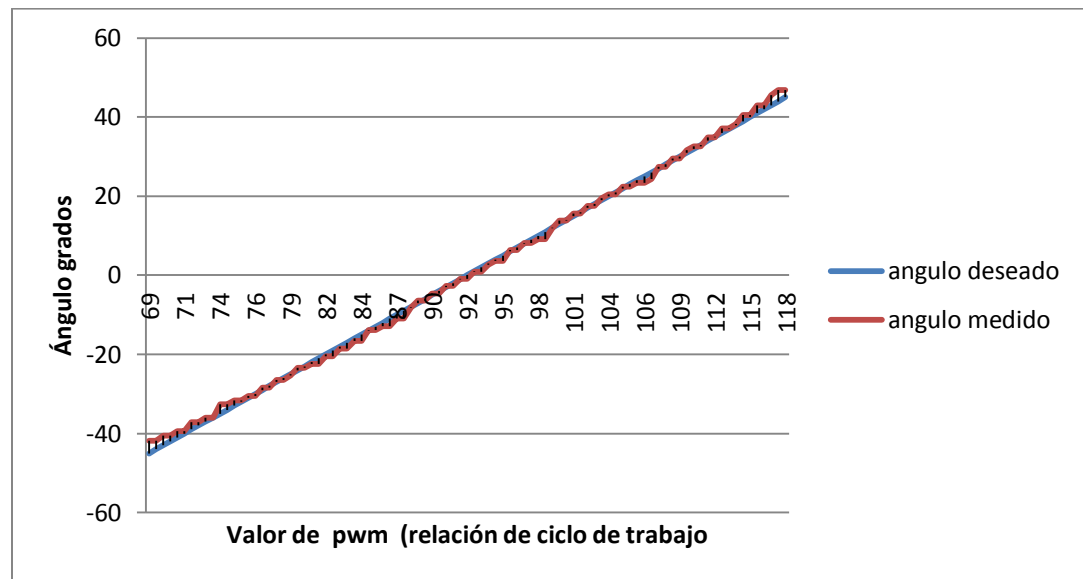
Luego con los tres ejes medidos a distintos ángulos, se determinó que el eje Y sería el utilizado para calcular el ángulo de inclinación utilizando la ecuación 16.

$$angulo = \sin^{-1} \frac{y_g}{1g}$$

( 8 )

La ecuación 8, se implementó en el código del micro controlador para luego ser desplegado el ángulo en una pantalla LCD. Estos datos luego fueron graficados y comparados con el ángulo deseado para determinar el porcentaje de error que se tenía respecto al ángulo deseado mediante la aproximación exponencial y el ángulo real obtenido mediante el sensor, ver la Figura.

Figura 95. Ángulo vs. PWM, comparación del ángulo deseado y el medido por el sensor



Debido a que el sensor tomaba cualquier perturbación mínima como ángulo se decidió implementar el siguiente filtro pasa bajas.

Figura 96. Filtro pasa bajas

$$anguloY_n = 0.9 * (anguloY_{n-1}) + 0.1(angulo_{nuevo})$$

Figura 97. Control PID implementado en el código del micro controlador

```
// PID

errorP = -anguloY; //proporcional
errorI+= errorP; //integrador
errorD = errorP-errorAnt;// derivativo

errorAnt=errorP;

pwm = Kp*errorP+Ki*errorI+Kd*errorD +92;

PWM1_Set_Duty(pwm) ;
```

Tabla 68. Constantes del Control PID

K proporcional	K integrador	K derivativo
60	0.05	0.05

### C. Discusión

Originalmente se utilizaría el protocolo de comunicación SPI para la conexión entre el sensor MMA7455 y el micro controlador PIC 16F88. Sin embargo esto presentaba ciertas complicaciones en la implementación, ya que el SPI que utilizaba era de tres cables, es decir la salida y entrada de datos utilizaban la misma terminal, y la librería en mikro C solo era para SPI de 4 cables. Debido a lo que se buscaba era que la implementación de la comunicación a nivel de programación y de hardware fuera lo más simple y sencilla se prefirió utilizar el otro protocolo de comunicación que ofrecía el sensor MMA7455. La Figura 89 muestra la conexión del protocolo I2C entre el micro controlador y el sensor.

Una de las ventajas del sensor MMA7455 era el hecho de poder configurar el tipo de resolución deseada. En esta aplicación se optó por la resolución de 2g lo que limitaba el valor máximo de aceleración a medir, pero daba una mayor resolución en los valores bajos. Esto resulto ser práctico en el diseño que se buscaba, ya que la única aceleración que interesaba medir era un 1g correspondiente a la gravedad. Las figuras A 10, A 11 y A 12 en la sección de anexos, muestran la implementación en código de la inicialización del sensor, escritura y lectura, respectivamente. Al inicio existieron complicaciones al configurar el sensor debido a un error en la hoja del fabricante en donde no se

especificaba que al momento de leer o escribir el registro se debía de correr un bit y no realizar una suma de un bit.

Al realizar la comunicación por primera ocasión con el sensor y obtener los valores de gravedad en cada uno de los ejes, se observó que para los componentes paralelos al suelo, X y Y, marcaban valores distintos de 0. Debido a las necesidades de la aplicación, se buscaba tener que en dichos ejes, al estar alineados con el suelo, detectaran 0 g por lo que se implementaron offsets para dichos ejes, Tabla 64. Utilizando la ecuación 8 y el valor de aceleración del eje Y se obtuvo el ángulo de giro desplegándolo en una pantalla LCD..

Luego con una relación entre el porcentaje del pwm y el ángulo, se realizó una prueba en donde se enviaban los pulsos calculados para cada grado unitario entre -45 y 45. Se tomaron los valores de cada fuerza g medida en cada eje para cada ángulo. En la Figura 92, se aprecia que en la configuración probada, las variaciones en las fuerzas g en el eje X son mínimas, por no decir despreciables por su cercanía a ser cero. En la Figura 93, se puede apreciar que las fuerzas g medidas para cada unidad de ángulo entre -45 y 45 son casi lineales para el eje Y. Además al ser este el eje sobre el que gira el servo posee un amplio rango de fuerzas g. Es importante observar que en la Figura 94, se puede ver claramente la trayectoria que tuvo el sensor, y es evidente la forma cóncava hacia abajo, representando una trayectoria circular del servo.

Al observar la Figura 95, es evidente que se puede lograr un ángulo deseado, simplemente con enviar el porcentaje del pwm correcto, ya que las diferencias entre el medido y el deseado, son mínimas. Debido a esto al realizar el sistema de control de posición se pensó en utilizar la aproximación exponencial encontrada, así dependiendo de un ángulo medido, devolver el pwm que compensaba el ángulo hasta devolverlo a cero. Sin embargo esta

solución mostró dos problemas principales, el primero fue que el sistema lograba compensar el ángulo pero al aproximarse a cero quedaba oscilando. El segundo era que a cualquier perturbación por mínima que fuera el control se veía afectado.

A causa de lo discutido anteriormente se optó por diseñar un control PID junto con un filtro pasa bajas para poder eliminar las perturbaciones. El filtro resulta ser necesario ya que al tener la silla movimiento lineal y por la simple naturalidad del movimiento y de las superficies, habrá pequeñas vibraciones que no necesariamente implicaran un cambio significativo en el ángulo de inclinación de la silla.

El filtro mostrado en la Figura 96, básicamente lo que hace es darle prioridad al valor anterior en un 90 por ciento mientras que a un valor nuevo le da una importancia del 10 por ciento, por lo que sí existe una perturbación súbita, el valor del ángulo variara poco. Por otro lado esto hace que el sistema pueda llegar a comportarse más lento, sin embargo en el ascenso y descenso de gradas no se busca hacer con una gran velocidad por lo que el cambio de giro es lento. Lo siguiente fue implementar el PID en el código, ver Figura A 14 en anexos.

Las constantes del control proporcional, integrador y derivativo son  $K_p$ ,  $K_i$  y  $K_d$  respectivamente, y se pueden observar en la Figura A 14. El error proporcional se implementó simplemente igualándolo al ángulo equivalente de compensación para llegar a tener 0 grados, este es el motivo del negativo antes de la variable "ángulo Y". Luego la constante integradora se hizo sumando todas las mediciones de compensación anteriores. Finalmente el derivativo se realizó haciendo la resta del dato actual con el anterior. En la Tabla 65 se muestran las constantes utilizadas, estas fueron determinadas haciendo varias pruebas.

## CONSTRUCCIÓN DE PROTOTIPO

### A. Metodología

1. Con los diseños finalizados de los componentes principales, se inició la construcción del chasis principal.
2. Posteriormente se realizó la instalación de los motores DC, junto con sus monturas y encoders.
3. Luego los cuatro motores DC se instalaron en el chasis principal.
4. Se instalaron los cuatro servomotores en la estructura.
5. Implementación del sistema de control de nivel.
6. Finalmente se instalaron las cuatro estructuras triangulares.

### B. Resultados

1. Construcción del chasis principal.

Figura 98. Chasis principal construido



## 2. Instalación de los motores DC

Figura 99. Motor DC parallax junto con encoder desarmado

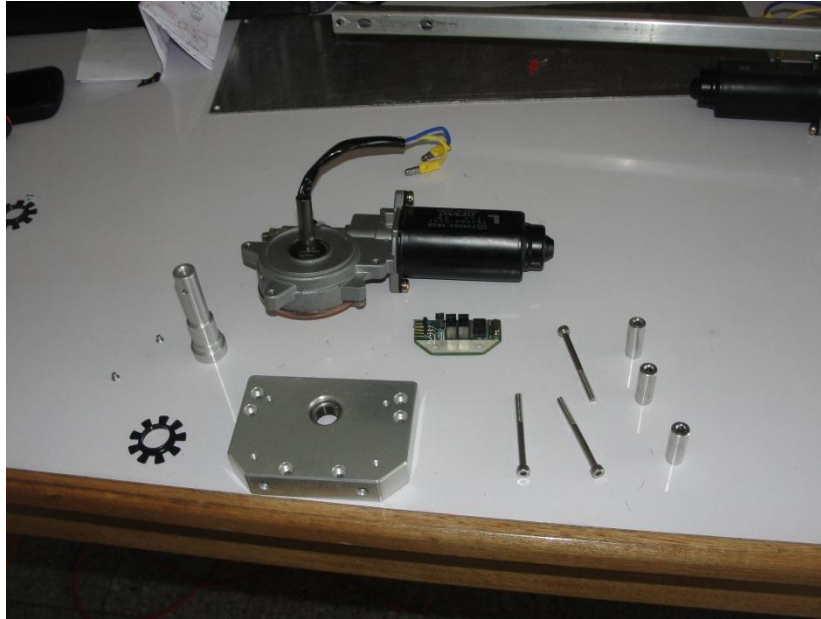


Figura 100. Separadores para bloque del motor

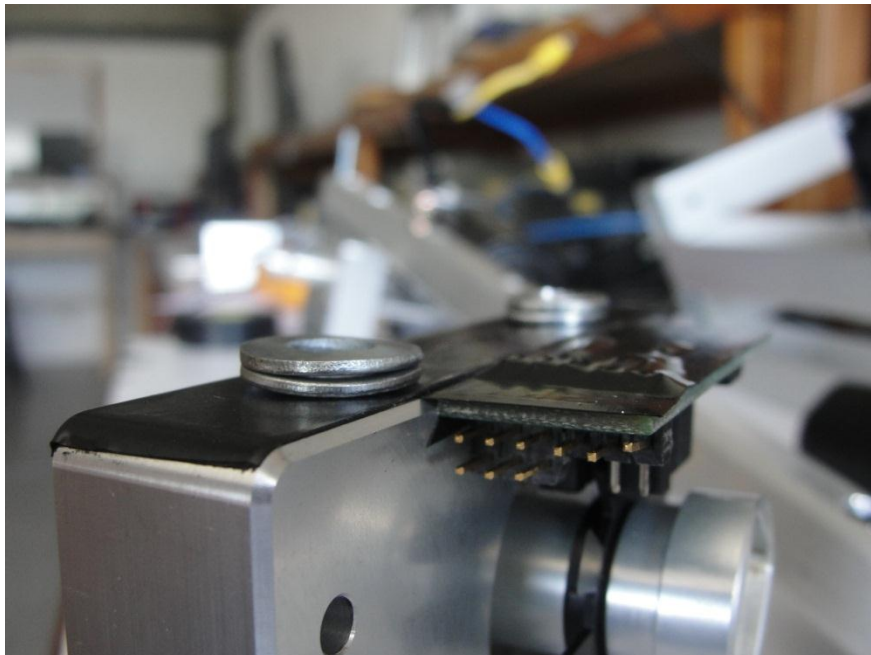


Figura 101. Módulo lateral de motores acoplados

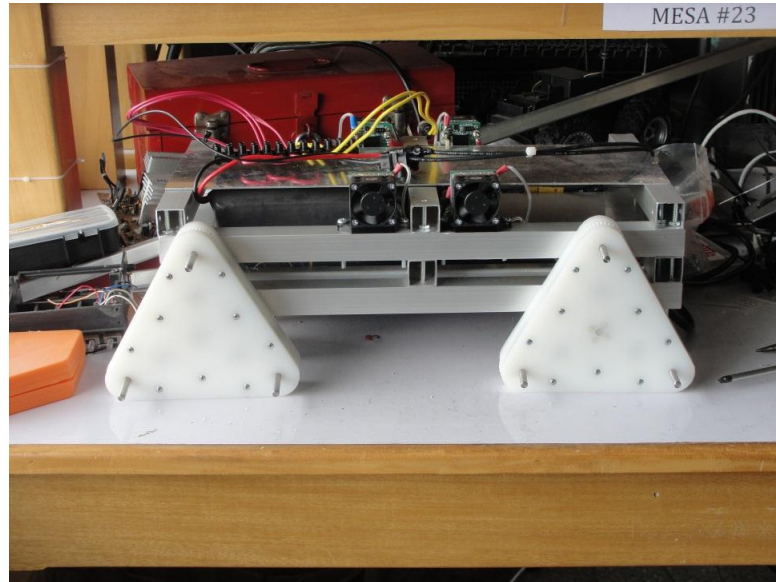


Figura 102. Instalación completa de motores



### 3. Instalación de los soportes triangulares.

Figura 103. Triángulos instalados

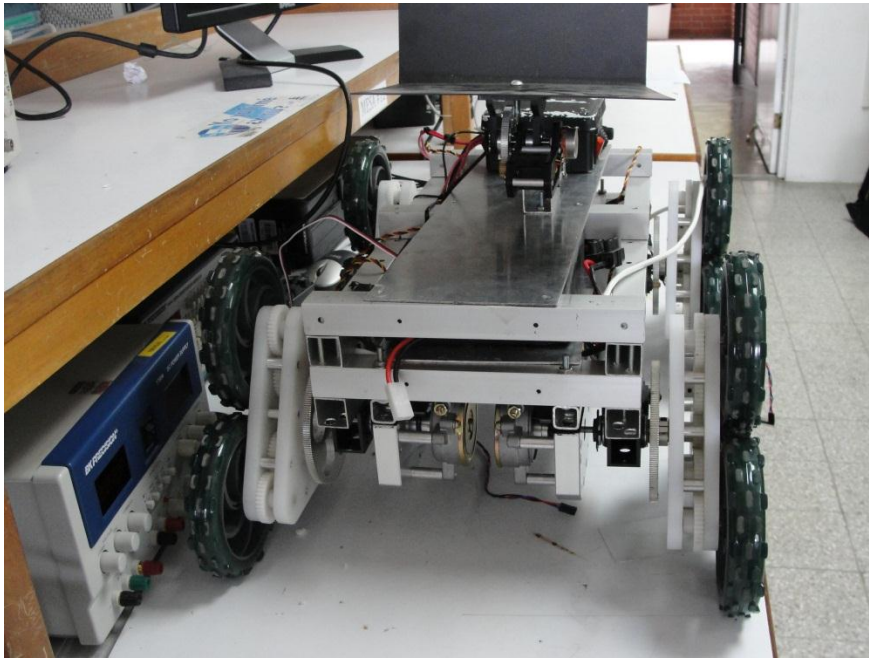


### 4. Ensamblaje finalizado

Figura 104. Vista lateral del prototipo finalizado



Figura 105. Vista frontal del prototipo finalizado



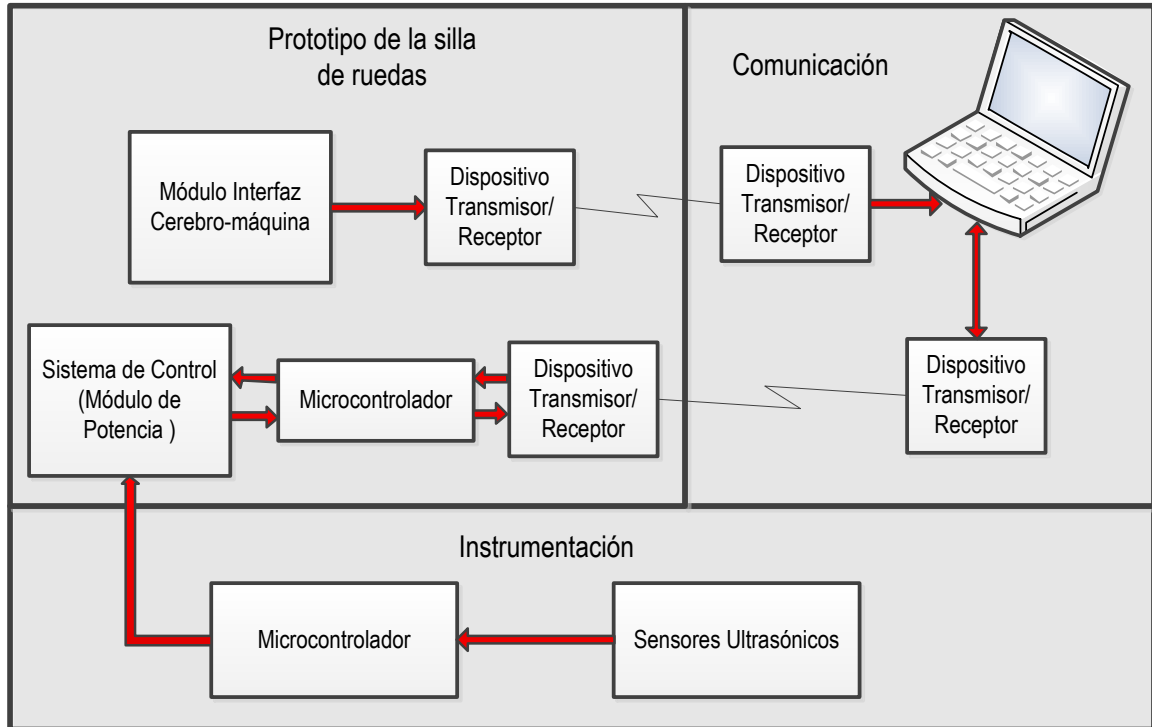
### C. Discusión

Al inicio de la construcción del chasis principal fue necesario realizar algunas modificaciones. La primera de ellas fue la necesidad de utilizar menor cantidad de tornillos en las uniones, ya que el tener cuatro por intersección resultó ser excesivo y más difícil de atornillarlos. En relación a las estructuras triangulares se utilizó sellante de tornillos para ajustarlos de mejor forma a los tornillos de sujeción de los servos.

La construcción de las estructuras triangulares involucro enviar los planos a una empresa con la maquinaria especializada para realizar la geometría deseada. Además de entregarles los engranes, cojinetes, ejes y ruedas para que realizaran el ensamblaje final con los perfiles.

## XIV. APÉNDICE D. MÓDULO DE COMUNICACIÓN INALÁMBRICA

Figura 16. Diagrama de bloques Módulo de comunicación inalámbrica



El desarrollo del Módulo de comunicación inalámbrica, se subdivide en tres secciones, las cuales se pueden observar en el diagrama de bloques de la Figura 10. Para facilitar la comprensión del lector, cada experimento incluye un diseño experimental. La primera sección cubre las pruebas relacionadas a la comunicación inalámbrica entre el módulo de interfaz cerebro-máquina y la computadora. En ella se tratan dos tipos de comunicación serial: SPI y UART. La segunda sección comprende las pruebas realizadas entre la computadora y el sistema de control. Ambas secciones están relacionadas, debido a la naturaleza de los experimentos, por lo que se utilizan microcontroladores para simular datos en ambos casos. Cabe mencionar que para las dos secciones son esenciales las pruebas de distancia con los Módulos inalámbricos.

La tercera sección constituye la parte de instrumentación, en la que se miden distancias por medio de los sensores ultrasónicos y con estas mediciones, se logra realizar la detección de gradas y obstáculos.

Adicionalmente, se incluyen otras dos secciones extras, siendo estas el diseño y construcción de circuitos impresos y la selección de baterías; la primera se ejecuta con la utilización de herramientas de software, como Altium Designer [6], en donde se diseña a nivel esquemático y PCB, los circuitos requeridos con los componentes necesarios. La tarea siguiente es construir los PCB's diseñados en placas de cobre, haciendo uso de la fresadora T-Tech Quick Circuit 7000, disponible en la Universidad del Valle de Guatemala. Por último, se sueldan todos los elementos que conforman dichas placas.

En cuanto a la selección de baterías y debido a factores externos, el presente módulo se vio en la tarea de definir qué batería se utilizaría como medio de alimentación para los circuitos del prototipo de la silla de ruedas.

## **PROGRAMACIÓN DE COMUNICACIÓN SPI Y RS-232**

### **A. DISEÑO**

Debido a que los módulos inalámbricos MRF24WB0MA pueden utilizarse con microcontroladores utilizando la interfaz SPI, entonces la primera prueba consiste en realizar una comunicación serial entre dos microcontroladores. El objetivo de esta prueba fue familiarizarse con el lenguaje mikroC [6] y a su vez realizar una comunicación serial por SPI y RS-232 satisfactoria. Para ello fue necesario configurar en dos microcontroladores PIC18F4685 la interfaz SPI, para que se intercomunicen entre ellos de forma serial y por último enviar a la computadora los resultados. Los pasos realizados para dicha prueba se presentan a continuación:

1. Configurar un microcontrolador como maestro y el otro como esclavo a una determinada frecuencia.
2. Habilitar la interfaz SPI en ambos microcontroladores.
3. Habilitar la interfaz UART en el Esclavo.
4. Desde el maestro, enviar una byte de datos al esclavo.
5. El esclavo recibe el byte y realiza tres operaciones: Lo despliega en el puerto B, lo manda vía RS-232 a la computadora y luego lo reenvía al maestro.
6. El maestro recibe dicho byte y lo incrementa en uno hasta llegar a un número determinado.
7. Luego, se repite el ciclo (pasos 4 al 6).

Los diagramas de flujo implementados para ambos microcontroladores se puede observar en las Figuras 107 y 108.

Figura 107. Diagrama de Flujo para microcontrolador operando como maestro para uso en Hyperterminal

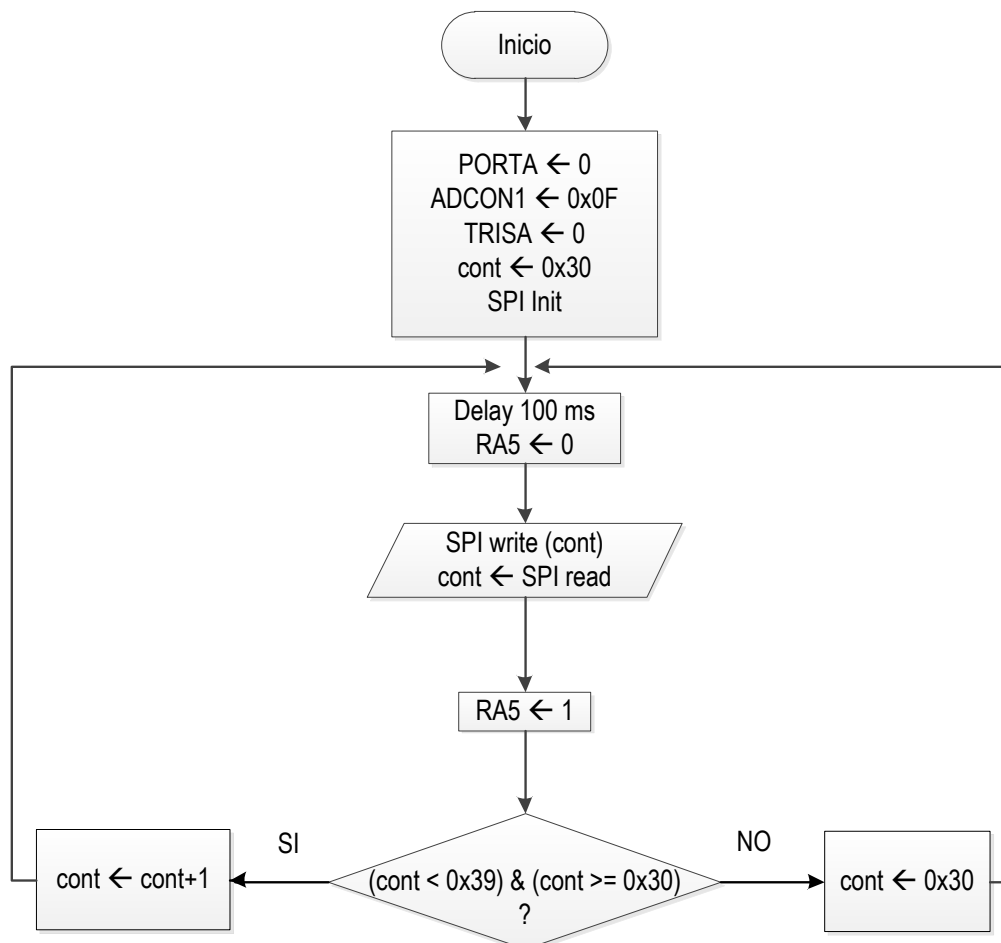
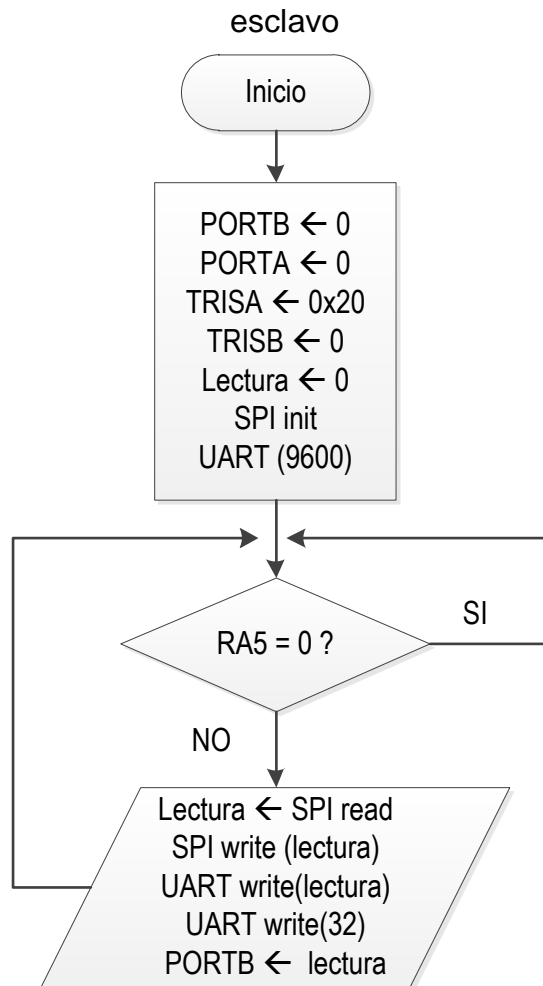


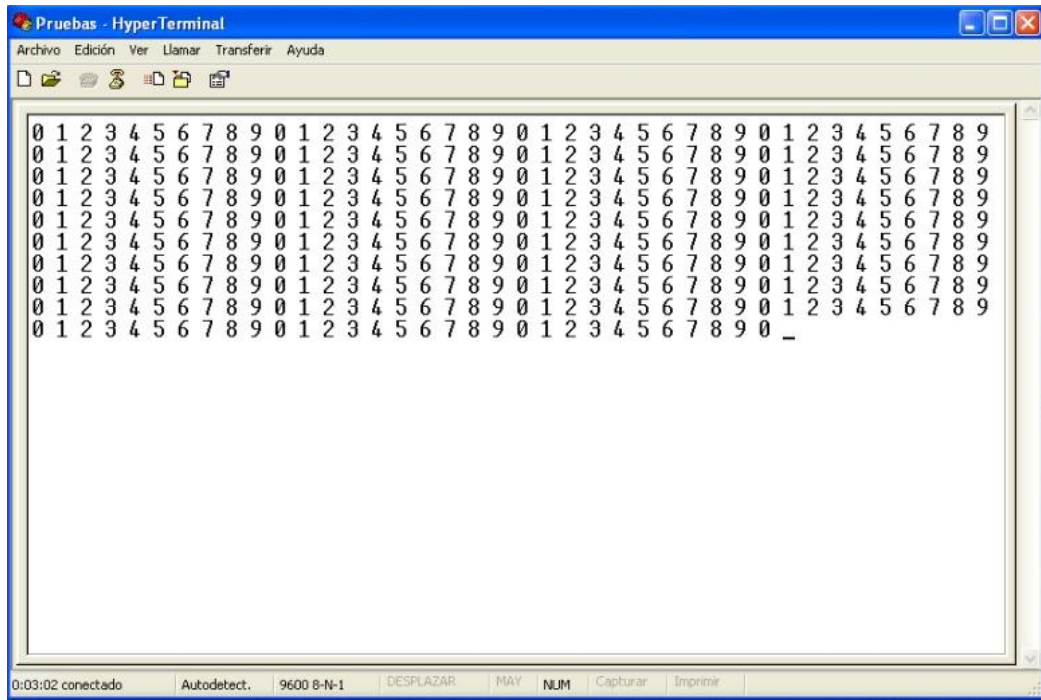
Figura 108. Diagrama de Flujo para microcontrolador operando como esclavo



## B. RESULTADOS

Para esta prueba se utilizaron dos microcontroladores, uno con función de Maestro y el otro de Esclavo. El programa despliega en la Hyperterminal los caracteres del 0 al 9, por medio del uso de las interfaces RS-232 y SPI. En la Figura 109 puede observarse la ventana de la Hyperterminal, mostrando el conteo de forma correcta. Cada número se encuentra separado por un espacio, para poder apreciar de mejor forma los datos recibidos.

Figura 109. Datos recibidos en la computadora por medio de la Hyperterminal



### C. DISCUSIÓN

Una observación importante a esta prueba es que en ella se mencionan unos microcontroladores de la familia PIC18 de Microchip [6]. Se utilizan de esta familia debido a cuestiones de compatibilidad, ya que en la hoja de datos de los módulos inalámbricos se indica que son diseñados para las familias PIC18, PIC24, dsPIC33 y PIC32 de Microchip. [6]

Entre los problemas que surgieron fue que no se habían configurado todas las entradas/salidas como digitales y tampoco se había colocado un tiempo de espera después de inicializar el módulo UART, ya que de esta forma se asegura la estabilidad del mismo antes de poder utilizarlo. Otro factor que influyó fue el uso de las variables adecuadas para el manejo de los bytes, ya que en un principio, se estaba utilizando el tipo *short* (-128 a 127), pero para el manejo de bytes sin signo, se utiliza el tipo *char* o *unsigned short* (0 a 255).

## COMUNICACIÓN ENTRE MÓDULOS MRF24WB0MA Y MICROCONTROLADORES

### A. DISEÑO

Al concluir el experimento del Capítulo VII, relacionado con el uso de las interfaces SPI y RS-232 (en mikroC) con dos microcontroladores (uno como Maestro y uno como Esclavo), se procedió a ejecutar la prueba de comunicación inalámbrica, agregando los módulos *transceivers* MRF24WB0MA.

En este caso, dichos módulos funcionan como esclavos y los microcontroladores como maestros. La prueba consistió de los siguientes pasos:

1. Configurar interfaz SPI en ambos microcontroladores.
2. Enviar bytes desde un microcontrolador hacia un *transceiver* por medio de la interfaz SPI (Transmisor).
3. Recibir los datos en el otro *transceiver* y enviarlos al segundo microcontrolador (Receptor).
4. Verificar las señales en el osciloscopio.

### B. RESULTADOS

Al llevar a cabo las conexiones necesarias para la presente prueba, se obtuvo siempre en la salida serial (SDO) del receptor, la señal mostrada en la Figura 110. Es decir, no importaba qué señal se introdujera en la entrada serial SDI del transmisor, ya que la señal de salida no presentaba cambios. La frecuencia del reloj (SCK) fue configurada a 7.75 KHz.

Luego, se cambió la frecuencia del reloj (SCK) a 2 MHz y se obtuvo una señal similar, solamente que a una frecuencia distinta, *i.e.*, un pulso con un

ancho de  $0.5 \mu\text{s}$ . La señal obtenida en dicha configuración se muestra en la Figura 111.

Figura 110. Señal obtenida en el pin SDO de un módulo *transceiver*, utilizando una frecuencia de reloj (SCK) de 7.75 KHz

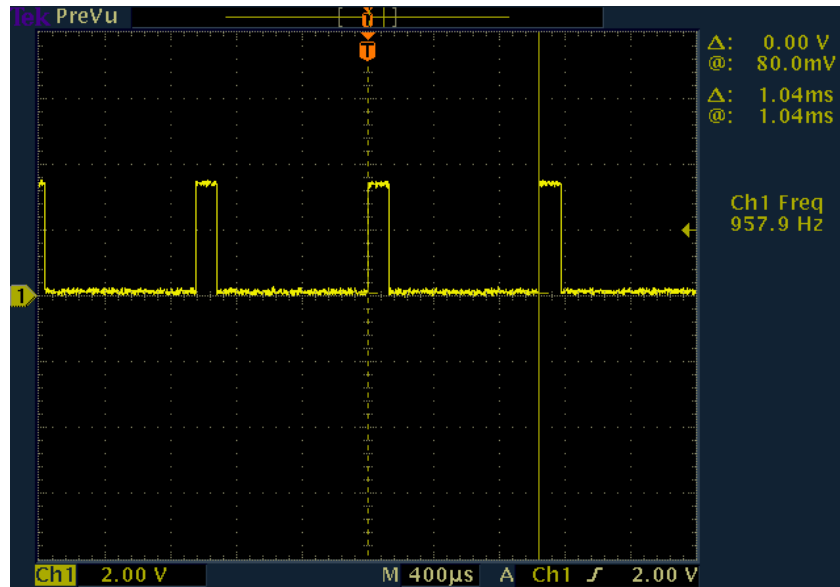
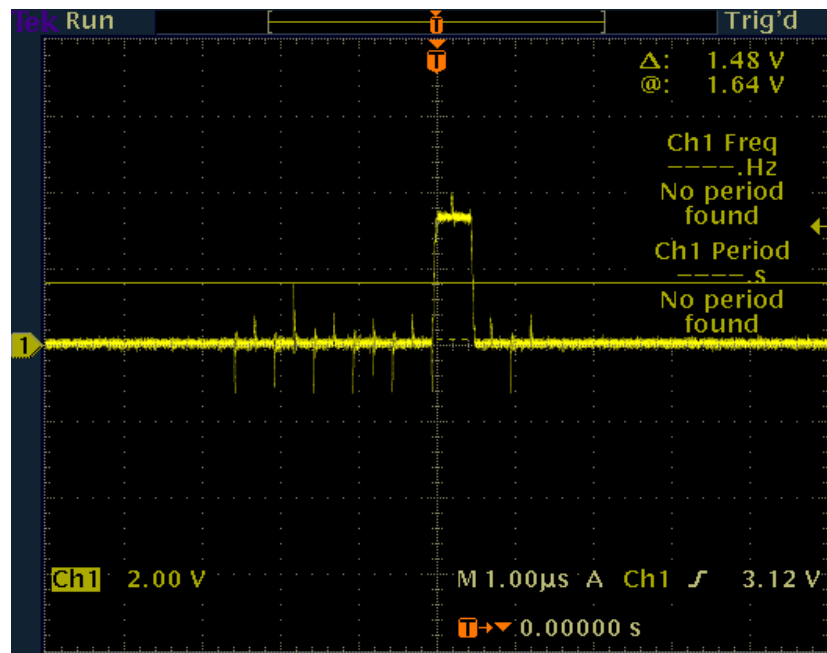


Figura 111. Señal obtenida en el pin SDO del módulo *transceiver* en el lado del receptor, utilizando una frecuencia de reloj (SCK) de 2 MHz



## C. DISCUSIÓN

Esta prueba reflejó que se deben realizar algunas configuraciones específicas a los módulos Wi-Fi para poder utilizarlos como se requiere, ya que al conectarlos con los microcontroladores, no respondían de la forma esperada. De hecho, se obtuvieron señales en la salida serial SDO de los módulos, en la cual, independientemente de las señales de entrada (SDI), no variaba la respuesta. Además, en la señal INT de los módulos (interrupción de datos disponibles), no hubo ningún cambio en el momento en que se intentaba transmitir datos, corroborando aún más lo mencionado anteriormente, es decir, la inexistencia en el cambio de la respuesta de uno de los módulos.

## PRUEBA DE CONFIGURACIÓN DE LOS MÓDULOS MRF24WB0MA

### A. DISEÑO

A partir de las pruebas realizadas en el capítulo VIII, se concluyó que era necesario llevar a cabo una configuración inicial de los módulos *transceiver* MRF24WB0MA, motivo por el cual se utilizó el apoyo de una librería API del software TCP/IP Stack gratuito de la familia Microchip, la cual se menciona en la hoja de datos. [6]

Esta prueba se subdividió en dos partes:

#### 1. Programación de microcontroladores basándose de la librería API.

Para el efecto, se llevaron a cabo los pasos siguientes:

- a. Buscar en la librería API y la Web un programa de ejemplo o Demo que utilizara comunicación vía interfaz SPI.
- b. Descargar el compilador C18 [6] para poder programar en C desde el software MPLAB IDE. [6] Dicho compilador se utiliza especialmente para la familia de microcontroladores PIC18 de Microchip. [6]
- c. Configurar uno de los programas de ejemplo del compilador C18, con el fin de asegurar un buen funcionamiento en la compilación.
- d. Realizar un programa sencillo que utilizara las funciones esenciales para poder inicializar al *transceiver* y permitir el envío y recepción de datos en los respectivos pines de entrada y salida.

2. Programación de microcontroladores y búsqueda de ejemplos. Con asesoría del Ing. Luis Fernando Reina, se llevaron a cabo los siguientes pasos:

- a. Realizar un programa en C, con el objetivo de configurar los módulos *transceivers* y a su vez intentar el envío y recepción de datos en ambos.
- b. Realizar pruebas con los programas en C.
- c. Búsqueda exhaustiva acerca de dichos módulos, con el fin de encontrar algún ejemplo funcional o alguna guía que llevara a la solución del problema.

## B. RESULTADOS

1. Programación de microcontroladores basándose de la librería API. Los programas de ejemplo o demos encontrados para los módulos MRF24WB0MA fueron realizados en MPLAB IDE, por lo que se utilizó el compilador C18 para intentar compilar dichos programas, pero al hacerlo, se obtuvo un error en común, el cual indicaba que no se encontró el archivo apropiado para el proyecto: `HardwareProfile.h`. Al revisar lo que incluía este archivo Header, se pudo observar que en él se define el kit de desarrollo a utilizar. En la figura 112 se observa una captura de imagen del error desplegado por MPLAB IDE, al realizar el intento de compilación.

Figura 112. Captura de error al compilar

```
Error [1099] "No extended HardwareProfile .h included.  
Add the appropriate compiler macro to the MPLAB project."
```

2. Programación de microcontroladores y búsqueda de ejemplos. En esta prueba se obtuvo una compilación exitosa. Sin embargo, se obtuvieron nuevamente los mismos resultados de pruebas anteriores, en los cuales, al medir la señal SDO del *transceiver*, simplemente se mostró un pulso con un ancho de 0.5  $\mu$ s, tal y como se indica en la Figura 15 del capítulo VIII.

### C. DISCUSIÓN

1. Programación de microcontroladores basándose de la librería API. Al revisar la documentación del archivo de ayuda del software TCP/IP STACK, lo primero que se menciona en la librería Wi-Fi API [27] es la configuración del microcontrolador, el cual debe cumplir con ciertas características.

Se realizó el programa típico de "Hola Mundo", para asegurar la compilación satisfactoria. Una vez ejecutado lo anterior, se pudo proseguir con el desarrollo del programa para intentar configurar los módulos inalámbricos, haciendo uso de las funciones del archivo *WF\_Spi.c* de la librería API. Sin embargo, se obtuvo el error de compilación descrito en los resultados. En razón de lo anterior, no se logró realizar ninguna prueba con el hardware, por lo que se consultó con el Ing. Luis F. Reina.

2. Programación de microcontroladores y búsqueda de ejemplos. Con el apoyo del Ing. Luis Fernando Reina, se desarrolló un programa similar al indicado en la parte 1, el cual fue más completo que el presentado oportunamente, ya que en éste se omitieron ciertas secciones de código que posiblemente no se iban a necesitar.

También se hizo necesario agregar algunos archivos "*Header*" para poder inicializar variables y realizar una compilación exitosa del programa implementado. Luego de conectar el hardware y obtener los resultados, se inició una búsqueda en reiteradas oportunidades a través de Internet (foros de

discusión, videos, etc.) con el objetivo de lograr configurar y hacer funcionar de forma correcta a los dispositivos inalámbricos; no obstante, no se encontró una respuesta positiva.

## PROGRAMACIÓN PARA LA COMUNICACIÓN ENTRE LA COMPUTADORA Y EL SISTEMA DE CONTROL

### A. DISEÑO

1. Comunicación desde la computadora hacia el sistema de control. Para la presente prueba, se diseñaron dos programas con microcontroladores diferentes: PIC16F887 y dsPIC30F4011.

El programa para el PIC16F887 tiene la función de transmisor. Se construyó en *protoboard* un circuito que contiene cuatro pulsadores que representan cuatro de los comandos a implementar en el prototipo de la silla de ruedas. En la Figura 18 se muestra el diagrama de flujo del programa transmisor, en donde se puede observar que el mensaje transmitido se repite en cinco ocasiones.

El programa para el dsPIC30F4011 tiene la función de receptor. Dicho microcontrolador posee dos interfaces seriales UART. Una de ellas se utiliza para comunicarse con un XBee PRO y la otra se emplea para intercambiar datos con el sistema de control. El diagrama de flujo para la interrupción del receptor se muestra en la Figura 19.

La prueba consiste en los siguientes pasos:

- En el microcontrolador PIC16F887 se lee si se presionó alguno de los cuatro pulsadores.
- De ser positivo el paso 1, se envía la información por medio de la interfaz serial RS-232 a uno de los módulos XBee PRO para que sea transmitida.

- Otro XBee PRO recibe la información y se analiza en el microcontrolador dsPIC30F4011 por medio de la interrupción de recepción de UART1.
- Este último envía por UART2 a Hyperterminal los mensajes recibidos.

Lo descrito anteriormente se resume en el diagrama de bloques de la Figura 113.

Figura 113. Diagrama de bloques del transmisor y receptor

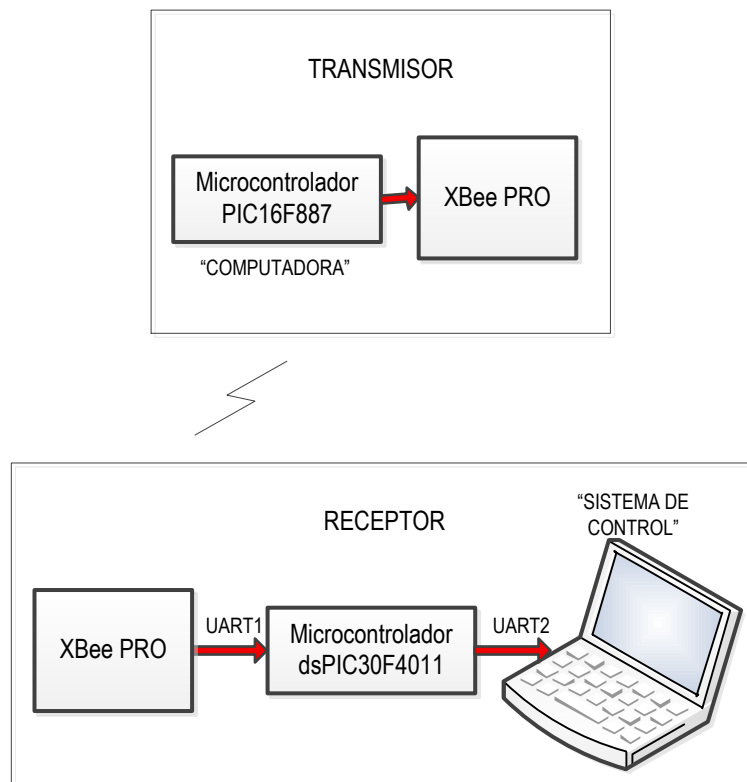


Figura 114. Diagrama de flujo del transmisor con PIC16F887

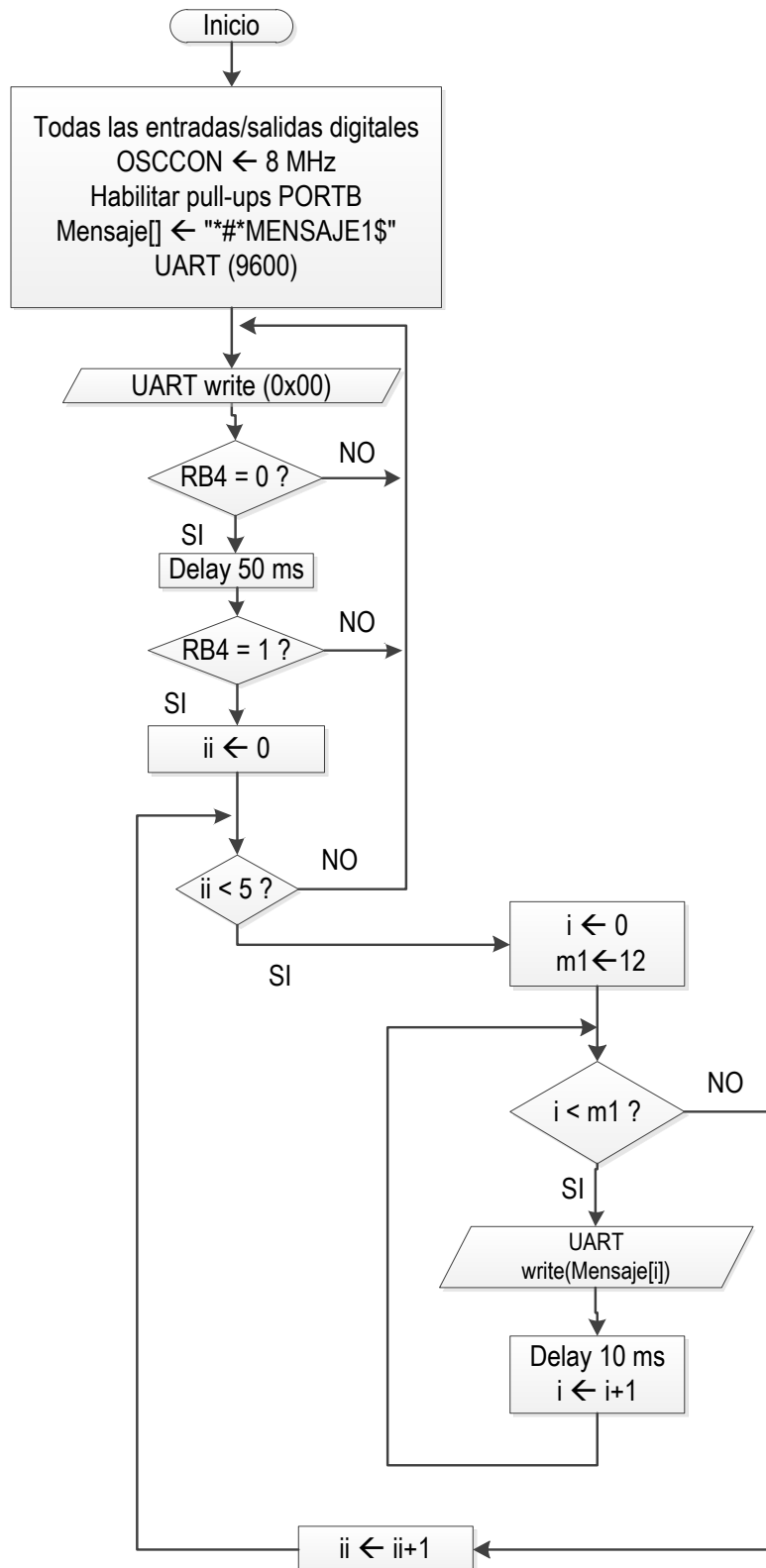
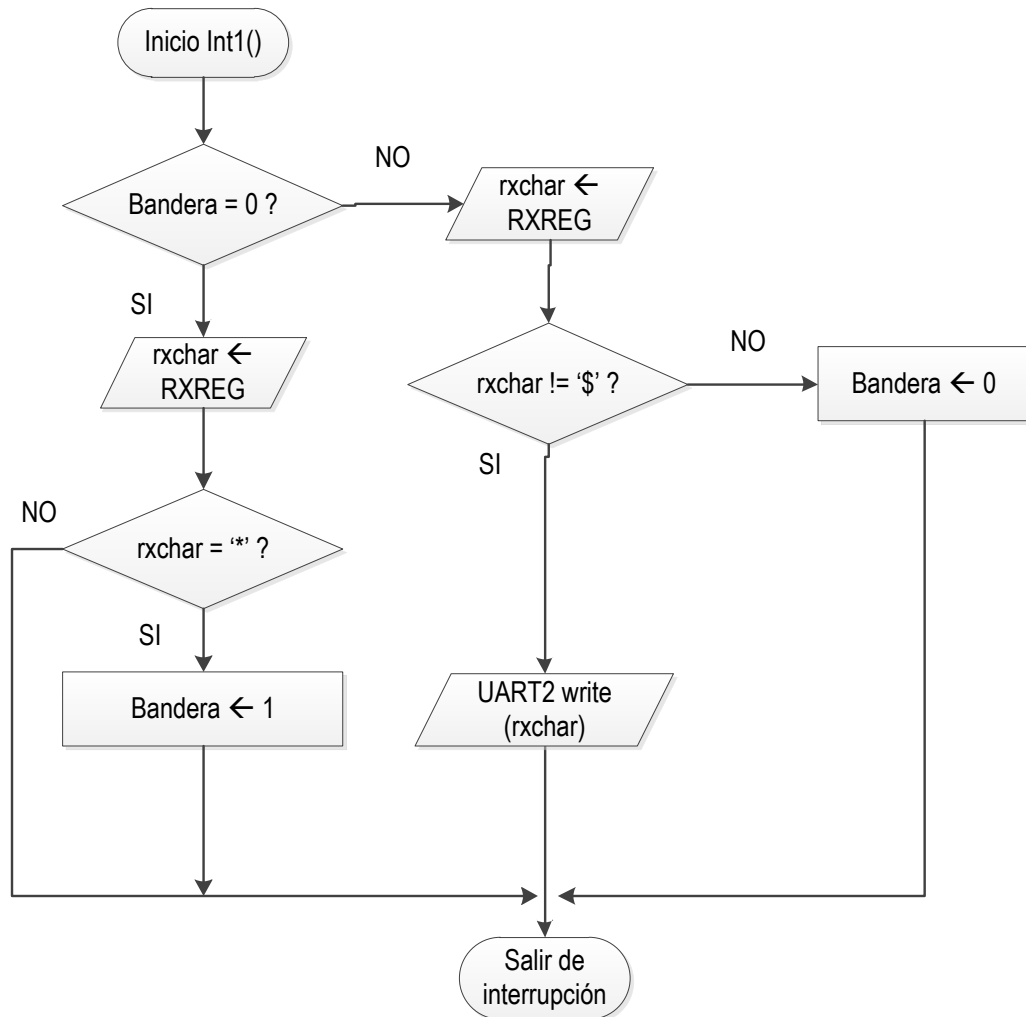


Figura 115. Diagrama de flujo de la interrupción del receptor



2. Comunicación desde el sistema de control hacia la computadora. La segunda parte de la comunicación que se pretende implementar es el envío de información de sensores desde el sistema de control hacia la computadora. Para el efecto, se programó en el mismo microcontrolador dsPIC30F4011 una rutina de interrupción de recepción UART2. La diferencia con la anterior, está en que se transmite una trama de datos con  $n+2$  bytes, en donde  $n$  indica el

número de bytes a transmitir (información útil). Los otros dos pertenecen a un encabezado.

La información útil de los sensores (simulada) se procesa en el microcontrolador, en el sentido de realizar una conversión de los datos a su representación en unidades de millar, centenas, decenas y unidades. Por último, se envía el resultado de dicha conversión como una nueva trama de datos.

## B. RESULTADOS

1. Comunicación desde la computadora hacia el sistema de control. Se utiliza una trama de datos para enviar la información desde el transmisor hasta el receptor. Dicha trama consiste de un encabezado, los datos a transmitir y un fin de trama. Se definió de la forma como se observa en la Tabla 69.

Tabla 69. Trama de datos implementada para comandos del prototipo de la silla de ruedas.

<b>Encabezado</b>	*#*
<b>Datos</b>	DATA
<b>Fin de trama</b>	\$

Se transmitieron tramas de datos al presionar los pulsadores en diferentes ocasiones, con el fin de observar que fueran recibidos de forma correcta, tal y como se muestra en la Figura 20.

Figura 116. Mensajes transmitidos en Hyperterminal

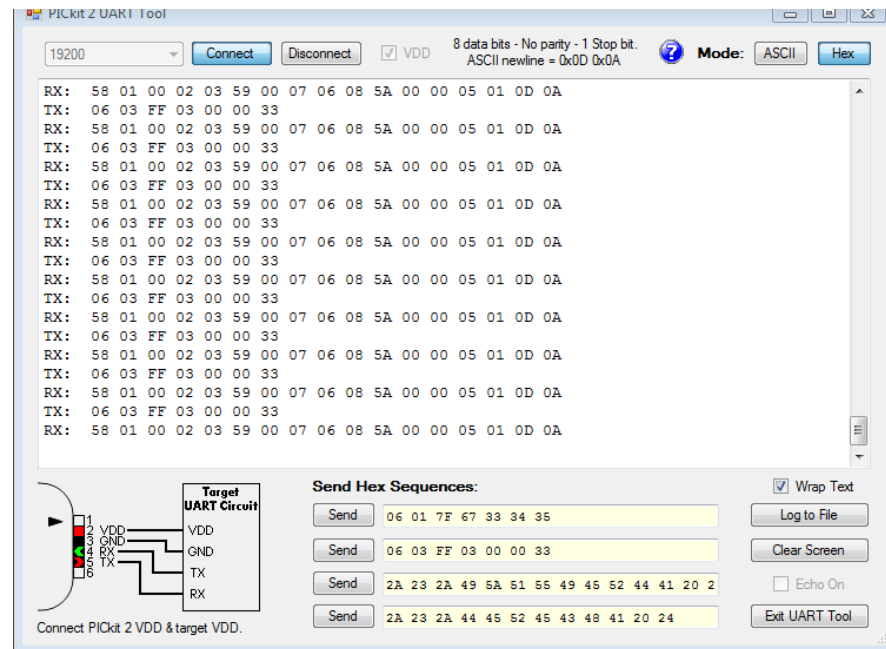
```

BA2PRUEBA2PRUEBA2PRUEBA2MENSAJE4MENSAJE4MENSAJE4MENSAJE4MENSAJE1MENSAJE1
MENSAJE1MENSAJE1MENSAJE1PRUEBA2PRUEBA2PRUEBA2PRUEBA2PRUEBA2MENSAJE4MENSAJE4MENSA
JE4MENSAJE4MENSAJE4MENSAJE1MENSAJE1MENSAJE1MENSAJE1MENSAJE1TEST3TEST3TEST3TEST3T
EST3PRUEBA2PRUEBA2PRUEBA2PRUEBA2PRUEBA2PRUEBA2MENSAJE4MENSAJE4MENSAJE4MENSAJE4P
RUEBA2PRUEBA2PRUEBA2PRUEBA2PRUEBA2PRUEBA2TEST3TEST3TEST3TEST3TEST3MENSAJE1MENSAJE1MENSA
JE1MENSAJE1MENSAJE1PRUEBA2PRUEBA2PRUEBA2PRUEBA2PRUEBA2PRUEBA2MENSAJE4MENSAJE4MENSAJE4ME
NSAJE4MENSAJE4MENSAJE1MENSAJE1MENSAJE1MENSAJE1MENSAJE1TEST3TEST3TEST3TEST3TEST3P
RUEBA2PRUEBA2PRUEBA2PRUEBA2PRUEBA2PRUEBA2MENSAJE4MENSAJE4MENSAJE4MENSAJE4MENSAJE4MENSAJ
E1MENSAJE1MENSAJE1MENSAJE1MENSAJE1TEST3TEST3TEST3TEST3TEST3PRUEBA2PRUEBA2PRUEBA2
PRUEBA2PRUEBA2MENSAJE4MENSAJE4MENSAJE4MENSAJE4MENSAJE4MENSAJE1MENSAJE1MENSAJE1MENSAJE1ME
NSAJE1MENSAJE1PRUEBA2PRUEBA2PRUEBA2PRUEBA2PRUEBA2PRUEBA2MENSAJE4MENSAJE4MENSAJE4MENSAJE4
MENSAJE4MENSAJE1MENSAJE1MENSAJE1MENSAJE1MENSAJE1TEST3TEST3TEST3TEST3TEST3PRUEBA
2PRUEBA2PRUEBA2PRUEBA2PRUEBA2MENSAJE4MENSAJE4MENSAJE4MENSAJE4MENSAJE4MENSAJE1MEN
SAJE1MENSAJE1MENSAJE1MENSAJE1TEST3TEST3TEST3TEST3TEST3PRUEBA2PRUEBA2PRUEBA2PRUEB
A2PRUEBA2MENSAJE4MENSAJE4MENSAJE4MENSAJE4MENSAJE4MENSAJE1MENSAJE1MENSAJE1MENSAJE1
MENSAJE1TEST3TEST3TEST3TEST3TEST3TEST3PRUEBA2PRUEBA2PRUEBA2PRUEBA2PRUEBA2MENSAJE4MEN
SAJE4MENSAJE4MENSAJE4MENSAJE4MENSAJE1MENSAJE1MENSAJE1MENSAJE1MENSAJE1PRUEBA2PRUE
BA2PRUEBA2PRUEBA2PRUEBA2MENSAJE4MENSAJE4MENSAJE4MENSAJE4MENSAJE4MENSAJE1MENSAJE1
MENSAJE1MENSAJE1MENSAJE1TEST3TEST3TEST3TEST3TEST3TEST3PRUEBA2PRUEBA2PRUEBA2PRUEBA2PRU
EBA2MENSAJE4MENSAJE4MENSAJE4MENSAJE4MENSAJE4MENSAJE1MENSAJE1MENSAJE1MENSAJE1MENS
AJE1TEST3TEST3TEST3TEST3TEST3TEST3PRUEBA2PRUEBA2PRUEBA2PRUEBA2PRUEBA2MENSAJE4MENSAJE4
MENSAJE4MENSAJE4MENSAJE4MENSAJE1MENSAJE1MENSAJE1MENSAJE1MENSAJE1PRUEBA2PRUEBA2PR
UEBA2PRUEBA2PRUEBA2PRUEBA2PRUEBA2PRUEBA2PRUEBA2PRUEBA2PRUEBA2PRUEBA2PRUEBA2PRUEB
A2PRUEBA2PRUEBA2PRUEBA2PRUEBA2PRUEBA2PRUEBA2PRUEBA2PRUEBA2PRUEBA2PRUEBA2PRUEBA2

```

2. Comunicación desde el sistema de control hacia la computadora. La Figura 117 muestra una simulación de datos (en formato hexadecimal) de sensores que se encuentran en el sistema de control (sensor de corriente, acelerómetro) [6].

Figura 117. Simulación de datos referente a sensores (transmitidos y recibidos)



## C. DISCUSIÓN

1. Comunicación desde la computadora hacia el sistema de control. El diagrama de flujo mostrado en la Figura 114 equivale a tener disponible solamente un pulsador en RB4. La misma idea aplica para los tres restantes, por lo que no fue necesario incluir todos. En el diagrama de flujo de la Figura 115 se revisa si la trama de datos contiene un encabezado de un byte ('\*') únicamente, mientras que el implementado posee tres bytes('\*#\*'). Esto se realizó para fines prácticos. Asimismo, se revisa el fin de trama (\$) para volver a leer una nueva.

La implementación de tramas de datos permite dar validez a la información que se pretende enviar, ya que se realiza una verificación en el receptor de las tramas recibidas. Para asegurar que los datos llegaron al receptor se añadió una instrucción de contestación al transmisor (conocida como *ACKNOWLEDGMENT*), lo cual consiste en reenviar los mensajes recibidos.

2. Comunicación desde el sistema de control hacia la computadora. Se utilizó el programador PICkit 2 [6] para escribir el programa en el microcontrolador dsPIC30F4011. En su interfaz, se encuentra una herramienta que sirvió para realizar pruebas de comunicación serial: *UART tool*. En la Figura 17 se puede observar que se cuenta con botones para enviar secuencia de datos y en la pantalla se muestran los datos transmitidos (TX) y recibidos (RX).

Con el encabezado de la trama de  $n+2$  bytes descrita anteriormente, es posible realizar una resincronización en caso de que se pierda la sincronía en el momento de la transmisión de datos. Para la presente prueba se trabajó con  $n=6$  bytes que representan tres números de 16 bits cada uno. El encabezado de 2 bytes consiste en el carácter \* (asterisco) seguido por el número  $n$  (en este caso 6). La trama que se envía una vez convertidos los datos en unidades de millar, centenas, decenas y unidades, se puede observar en la Tabla IV, en donde D0 a D3 representan los números de 16 bits convertidos, en el orden como se mencionan. Los números en hexadecimal marcados en negrita corresponden a los caracteres en representación ASCII X, Y y Z. Los últimos dos bytes corresponden a un Enter.

Tabla 70. Trama para datos convertidos en su representación de unidades de millar, centenas, decenas y unidades

<b>58</b>	D0	D1	D2	D3	<b>59</b>	D0	D1	D2	D3	<b>5A</b>	D0	D1	D2	D3	0D	0A
-----------	----	----	----	----	-----------	----	----	----	----	-----------	----	----	----	----	----	----

Dicha conversión se realizó para facilitar el manejo en la computadora en el momento en que el sistema de control se encargue de realizar sus respectivas gráficas. La comunicación hacia la computadora probablemente no se implementará en el prototipo de la silla de ruedas, ya que dichos sensores no estaban contemplados inicialmente (Para mayor detalle referirse a la tesis de Carlos Castillo, módulo de Potencia [6]).

Nótese que para las pruebas realizadas en el presente capítulo, los módulos XBee PRO fueron configurados para utilizar el canal 0x10, con una frecuencia central de 2.425 GHz [6], y una velocidad de datos serial de 19200 bps.

## **PRUEBA DE DISTANCIA CON LOS MÓDULOS XBEE PRO**

### **A. DISEÑO**

Se llevaron a cabo dos tipos de pruebas de comunicación inalámbrica entre los módulos XBee PRO. Para el primer tipo de pruebas se utilizó el software X-CTU (Configuration & Test Utility Software) [6], el cual muestra en una ventana la cantidad de datos recibidos y perdidos. Para el segundo tipo de pruebas se utilizó el programa transmisor y receptor del Capítulo X.

El primer tipo de pruebas se realizó en los tres niveles del edificio A de la Universidad del Valle de Guatemala, estando en constante movimiento.

El segundo tipo de pruebas consistió en ubicarse en diferentes puntos a distancias determinadas, es decir, permanecer estático y realizar transmisión de datos desde dichas ubicaciones.

### **B. RESULTADOS**

La Figura 118 muestra dos de las pruebas realizadas en el edificio A de la Universidad del Valle de Guatemala, estando en movimiento.

En la Figura 119 se muestran los datos recibidos en el receptor a una distancia aproximada de 30 m. con línea de vista. La Figura 120 muestra los datos recibidos (con diferente encabezado) a una distancia de 12 m. aproximadamente sin existir línea de vista.

Figura 118. Paquetes de datos recibidos y perdidos para pruebas en edificio A

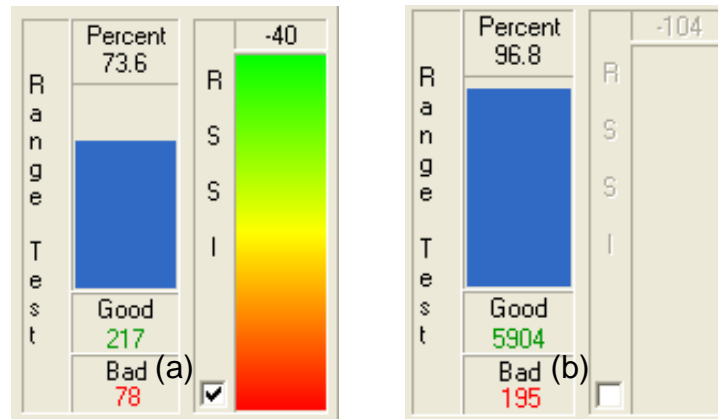


Figura 119. Datos en hyperterminal de comunicación inalámbrica a 30 m. en línea de vista

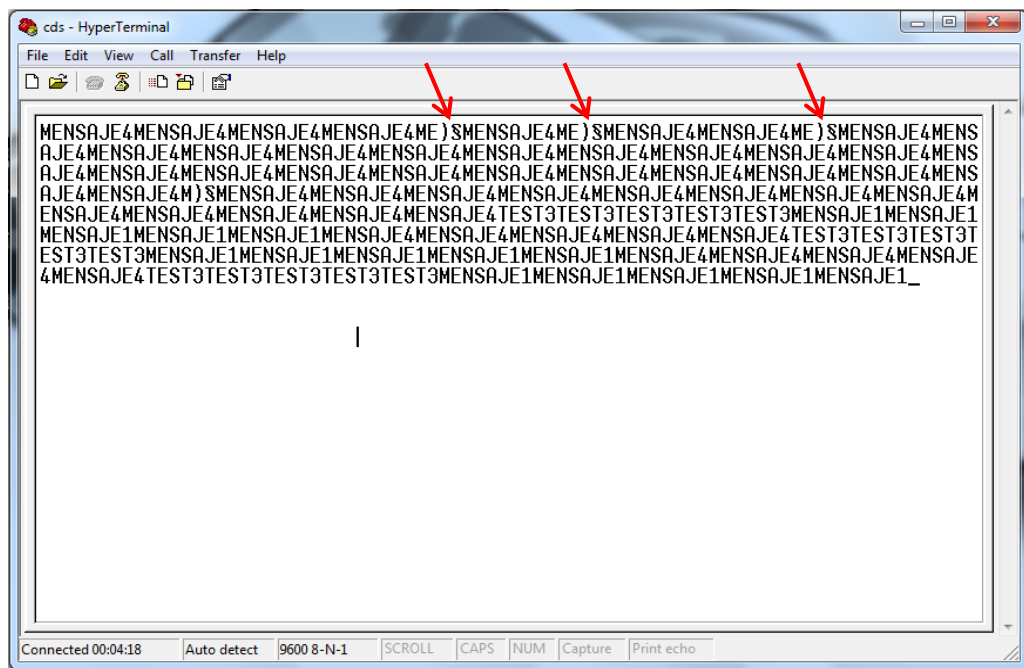
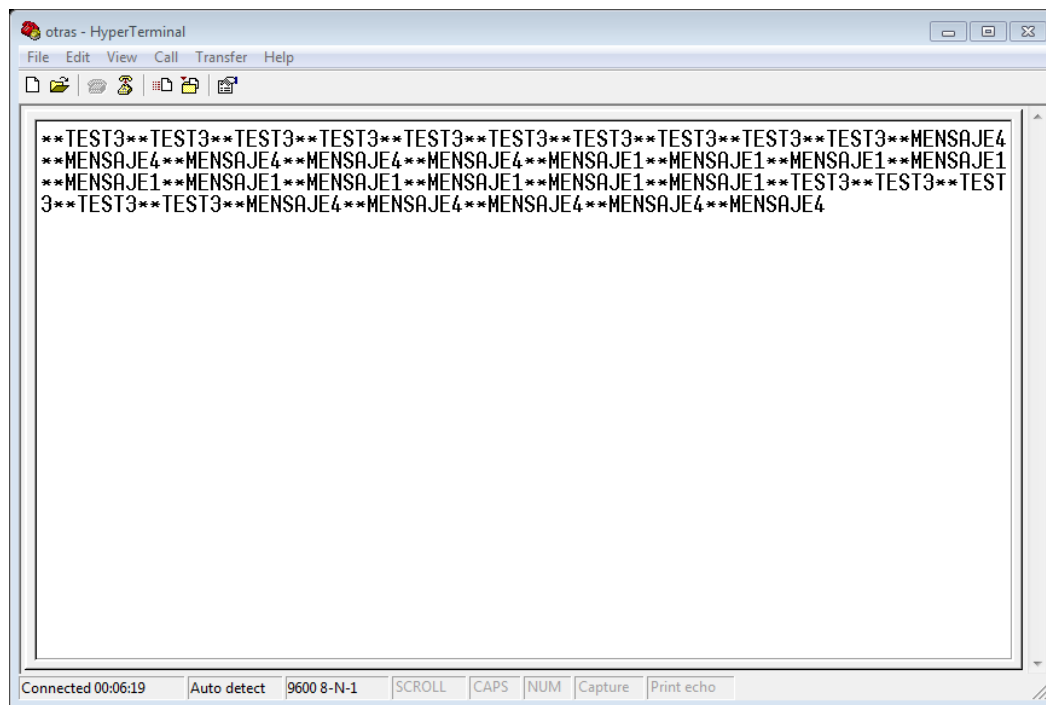


Figura 120. Datos en hyperterminal de comunicación inalámbrica a 12 m



### C. DISCUSIÓN

Con el software X-CTU se realizaron varias pruebas en el edificio A de la Universidad del Valle de Guatemala. En la Figura 118 se pueden observar dos de ellas. La diferencia entre las mismas fue que en la primera se habilitó la opción de observar la intensidad de la señal, en la cual, la velocidad de transmisión/recepción disminuyó significativamente en relación con la opción deshabilitada, debido al funcionamiento del software.

Se puede observar en la Figura 118(a) que fueron perdidos 78 de 295 paquetes, lo cual representa un 26% (primera prueba). La Figura 22(b) (segunda prueba), fueron perdidos 195 de 6099 paquetes, un 3.1%. Esta última prueba parece ser aceptable, pero el mayor problema fue que la señal se atenuaba a tal grado que se perdía por completo la comunicación en ciertos puntos (detrás de paredes y columnas), por lo que se requiere que ambos

módulos se encuentren en un lugar suficientemente abierto para evitar la pérdida de comunicación.

En la Figura 119 se puede observar que hubo ciertos errores en la recepción de algunos de los mensajes transmitidos. Las flechas señalan los caracteres que no pertenecen a la trama de datos enviada, la cual consiste de un encabezado (\*), los datos de interés (tamaño variable) y un fin de trama (\$).

La Figura 120 muestra los datos recibidos en Hyperterminal a 12 m. de distancia. Para esta prueba, se realizó un cambio en el programa del transmisor, en el que se añadieron dos asteriscos (\*\*) al encabezado. No se presentó ningún error en la recepción de los datos. Sin embargo, para otras pruebas de este tipo, no hubo comunicación entre dispositivos inalámbricos debido a paredes y estructuras.

Cabe mencionar que en el software X-CTU se pueden programar distintos parámetros, como el canal de comunicación, la velocidad de datos serial, las direcciones de las comunicaciones punto a punto, entre otros. Para las pruebas del presente capítulo se utilizó el canal 0x0C, con una frecuencia central de 2.410 GHz [45], y una velocidad de datos serial de 57600 bps. Advertencia: Se debe evitar utilizar el prototipo en lugares que puedan causar interferencia debido a los canales de comunicación que se empleen.

## MEDICIÓN DE LA DISTANCIA CON SENSOR ULTRASÓNICO PING)))

### A. DISEÑO

Para la prueba de medición de la distancia, se utilizó un sensor ultrasónico y un microcontrolador PIC16F887. Para determinar la distancia se emplea la interrupción del TIMER1 y se realiza el cálculo al utilizar la ecuación de una recta, ya que se tienen dos puntos de referencia. (Ver ecuación No. 1). Los pasos a realizar para dicha medición, se presentan a continuación:

1. Utilizar la interrupción de TMR1, que posee un contador de 16 bits (TMR1H:TMR1L) del microcontrolador.
2. Enviar la distancia (unidades, decenas y centenas) por puerto serial RS-232.
3. Verificar flanco de subida para habilitar TMR1 y de bajada para deshabilitarlo.
4. Deshabilitar y habilitar interrupciones para detectar un cambio en alguno de los pines de PORTB.
5. Generar y enviar un pulso de 3  $\mu$ s a pin de entrada/salida del sensor.
6. Detectar cambio en PORTB e inicializar el TMR1.
7. Detectar un nuevo cambio en PORTB y detener TMR1.
8. Calcular distancia a partir de TMR1.

En la Figura 121 se puede apreciar el diagrama de flujo que se llevó a cabo para la medición de la distancia a partir del microcontrolador y el sensor ultrasónico. En la Figura 122 se muestra el diagrama de flujo que representa la interrupción implementada en el momento de detectar un cambio en la entrada RB1.

Figura 121. Diagrama de Flujo del programa principal para la medición de distancia

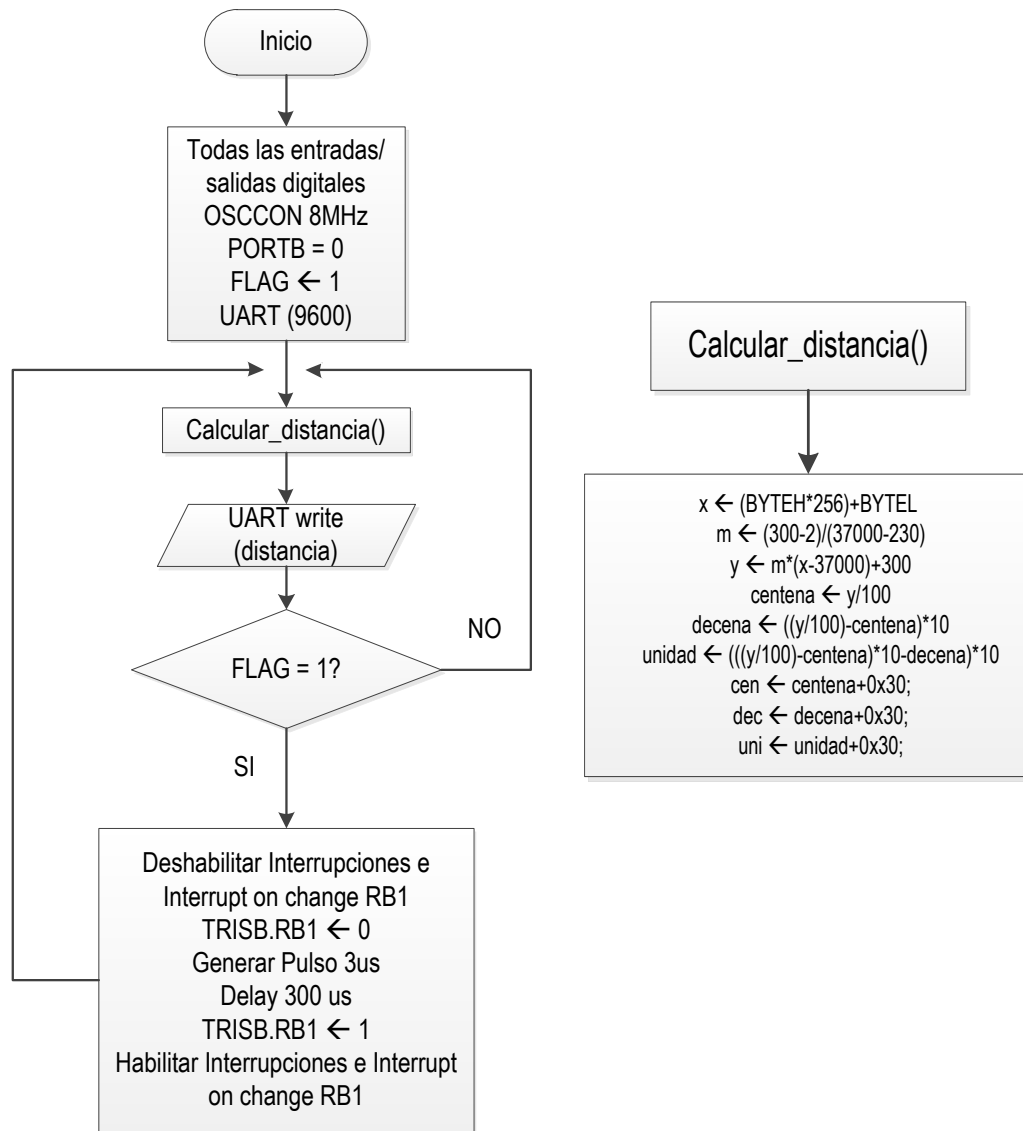
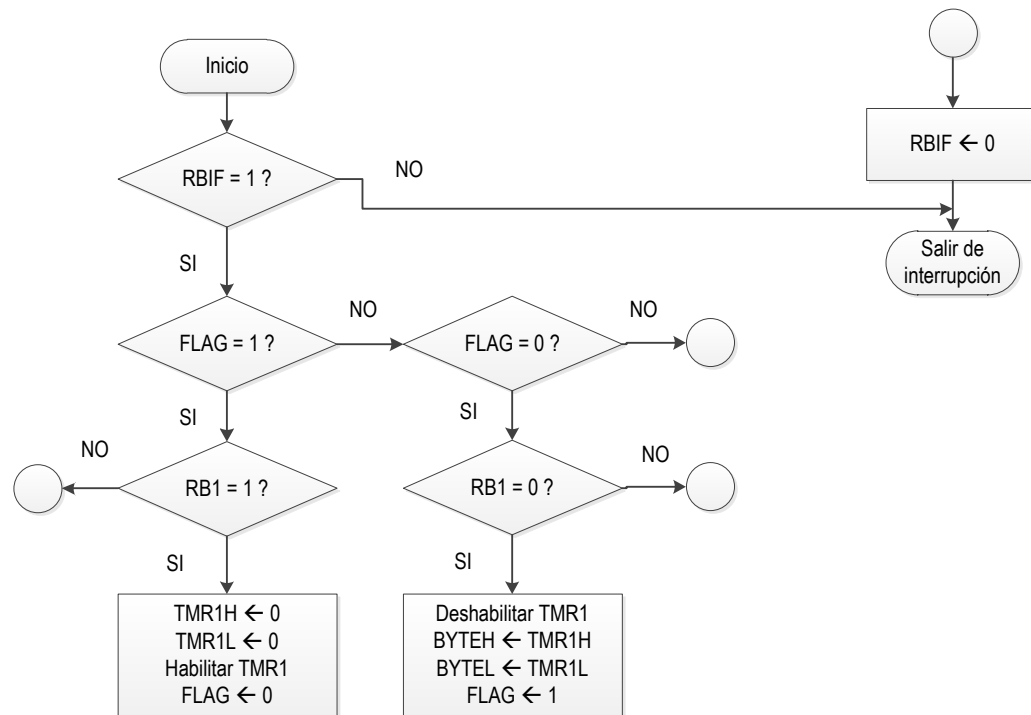


Figura 122. Diagrama de Flujo de la interrupción para la medición de distancia.



## B. RESULTADOS

Al efectuar el programa anteriormente descrito, se observaron en el osciloscopio las señales de entrada y salida por parte del sensor. En la Figura 123 puede apreciarse una de las mediciones realizadas en el osciloscopio a una distancia aproximada de 7 cm, la cual está representada por un pulso de ancho de 475.9  $\mu\text{s}$  (derecha). Asimismo, se puede observar un pulso de un tiempo de duración bastante corto (izquierda), el cual representa el pulso de entrada al sensor que tiene un tiempo de duración de 3  $\mu\text{s}$ . En la Figura 124 se muestra el resultado de la conversión de conteo del TIMER1 a distancia en centímetros, implementada en el microcontrolador.

Figura 123. Pulso de entrada de 3  $\mu\text{s}$  y pulso de salida de 475.9  $\mu\text{s}$ , medido en el osciloscopio

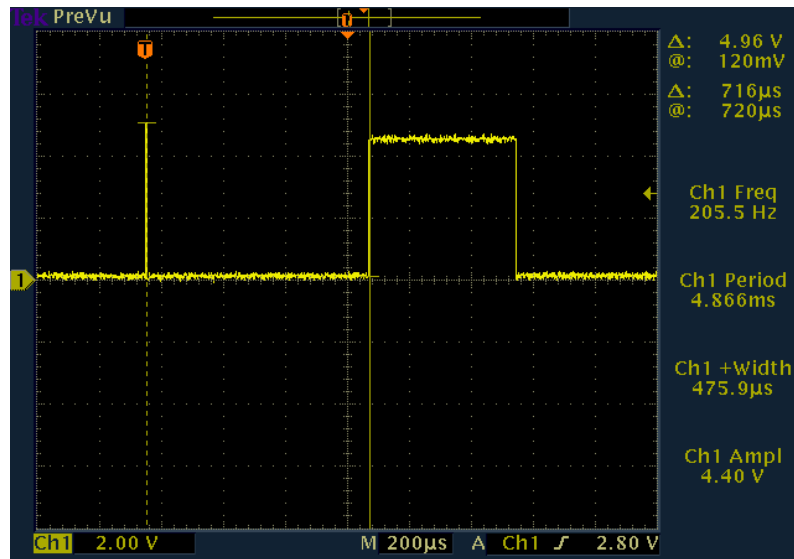
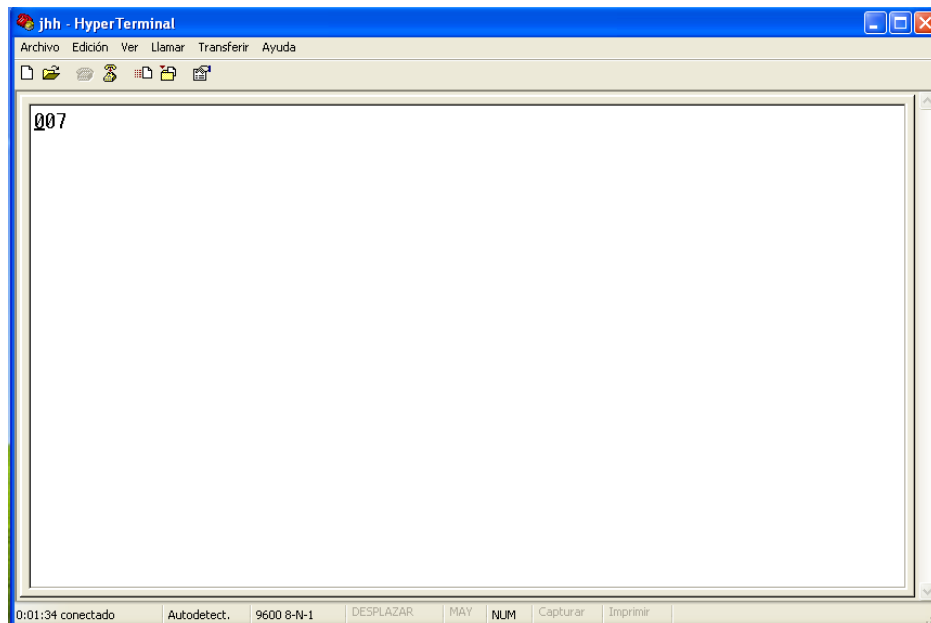


Figura 124. Ventana de la Hyperterminal mostrando un valor de 7 cm. para la medición de un pulso de ancho de 475.9  $\mu\text{s}$



### C. DISCUSIÓN

Para realizar el cálculo de la distancia a partir del tiempo obtenido, se planteó la ecuación de una recta, ya que se tienen los puntos extremos (115  $\mu$ s, 2 cm), (18500  $\mu$ s, 300 cm). Debido a que en el microcontrolador no se tiene una variable de tiempo, ésta puede representarse en el número de veces que cuenta el TIMER1, ya que se conoce el número de ciclos por instrucción y la frecuencia.

Por lo tanto, al tener una frecuencia de 8 MHz y sabiendo que cada instrucción representa 4 ciclos de reloj, entonces, 115  $\mu$ s representan 230 cuentas en el TIMER1 y 18500  $\mu$ s representan 37000 cuentas. Con estos datos, se planteó la ecuación de la recta:

$$y = (8.1044x + 135.989) * 10^{-3} \quad (9)$$

Donde  $y$  está en centímetros y  $x$  es el número de cuentas del TIMER1.

Al utilizar la ecuación 9, la distancia calculada es de 7.849 cm. A pesar de que se realiza el cálculo en el microcontrolador con formato de punto flotante, el resultado en Hyperterminal se presenta con los decimales truncados, ya que no se necesita tanta exactitud, por lo que se despliegan 3 cifras enteras en centímetros. El resultado (7 cm.) es bastante cercano al valor teórico, presentando un error de 12%, que resulta un dato aceptable para la presente aplicación, ya que la detección de objetos se obtendrá en un rango de valores.

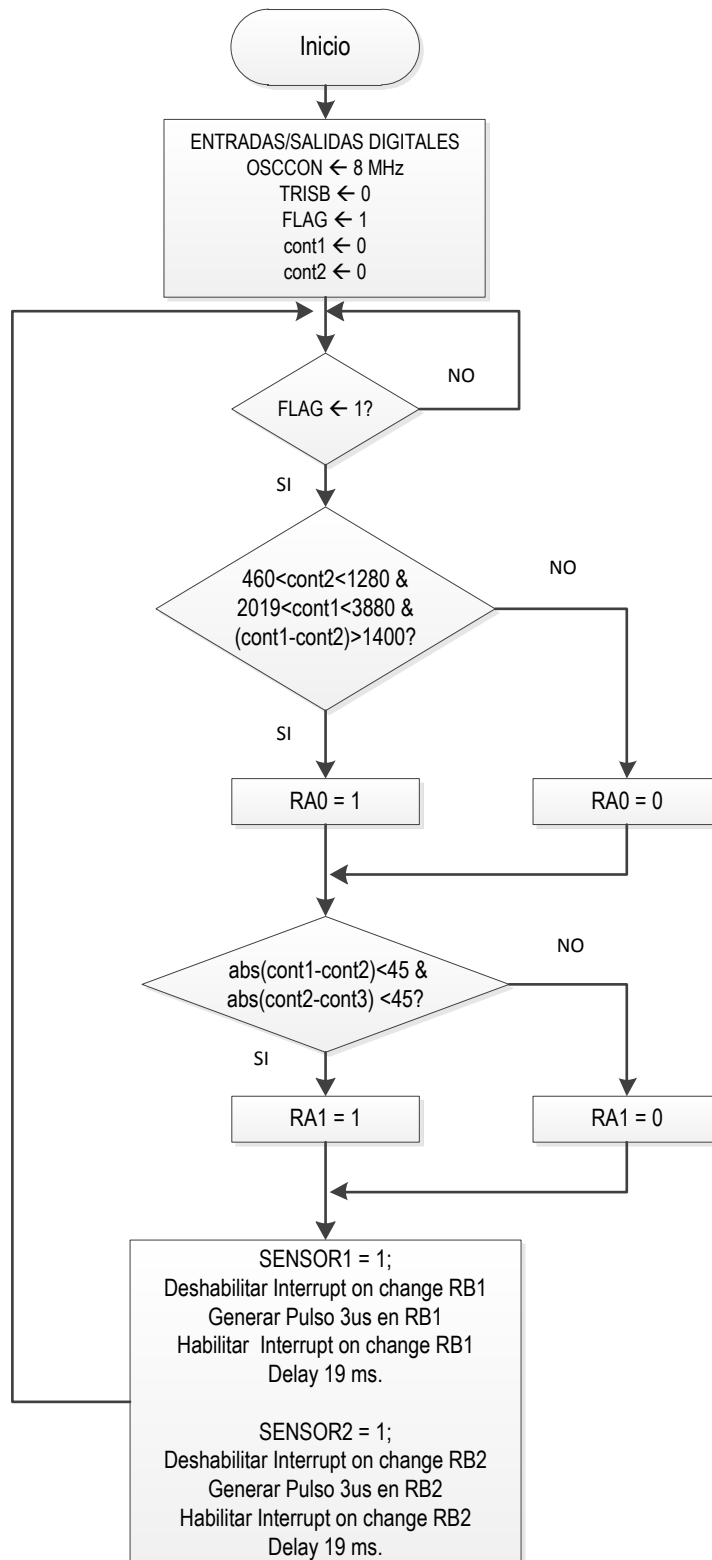
## **PROGRAMACIÓN DE LA RED DE SENSORES ULTRASÓNICOS PARA LA DETECCIÓN DE GRADAS Y OBSTÁCULOS.**

### **A. DISEÑO**

Al realizar la programación de la red de sensores, se utilizó la misma idea del Capítulo XIII, en la que se utiliza la interrupción del TIMER1 del microcontrolador para medir la distancia, solamente que en esta ocasión, trabajando directamente con el contador TIMER1. En variables separadas, se guardan los contadores correspondientes de cada sensor. Entonces, al tener disponibles las mediciones (en este caso, los contadores), se realizan operaciones de diferencia entre ellos para poder indicar en dos bits si se detecta algún objeto, ya sea grada u obstáculo.

El diagrama de flujo implementado para el programa de detección de gradas y obstáculos, se puede observar en la Figura 125.

Figura 125. Diagrama de flujo para detección de una grada y obstáculos



## B. RESULTADOS

Las diferentes mediciones en las salidas de los sensores permitieron completar una tabla, para definir un criterio en el momento de encontrar una grada, lo cual se muestra en la Tabla V. Cabe mencionar que se definió la cercanía de un objeto si se encuentra a una distancia menor o igual que 45 cm.

Los resultados obtenidos mostraron cierta inestabilidad en el momento de detección de gradas u obstáculos, debido al movimiento.

Tabla 71. Mediciones de tiempo en salida de sensores ultrasónicos y cálculo de la diferencia en conteo para cada medición

<b>Ancho del pulso (<math>\mu</math>s)(Sensor arriba)</b>	<b>Ancho del pulso (<math>\mu</math>s)(Sensor abajo)</b>	<b>Diferencia de tiempos (<math>\mu</math>s)</b>	<b>Diferencia en Conteo</b>
234	980	746	1492
524	1280	756	1512
688	1390	702	1404
694	1400	706	1412

En la Figura 125 se puede observar la medición de las señales de salida para dos de los sensores ultrasónicos colocados a distancias similares a como se encontrarán ubicados en el prototipo de la silla de ruedas, lo cual se muestra en la Figura 126. Es oportuno indicar que la señal en amarillo representa el sensor colocado en la parte de arriba y la señal en azul, el sensor en la parte de abajo.

Figura 126. Señales de salida de dos sensores ultrasónicos para la detección de grada y obstáculos

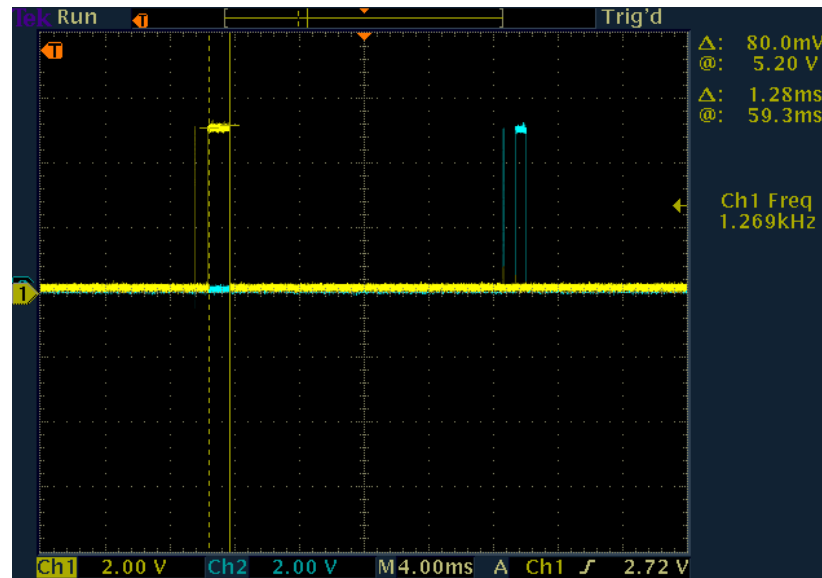
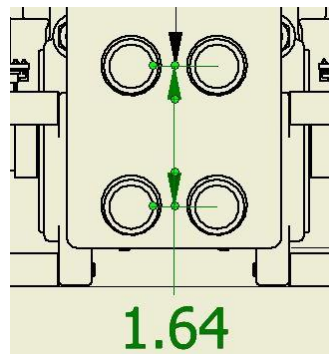


Figura 127. [6] Medidas (en pulg.) de una posible ubicación horizontal de los sensores ultrasónicos en el prototipo

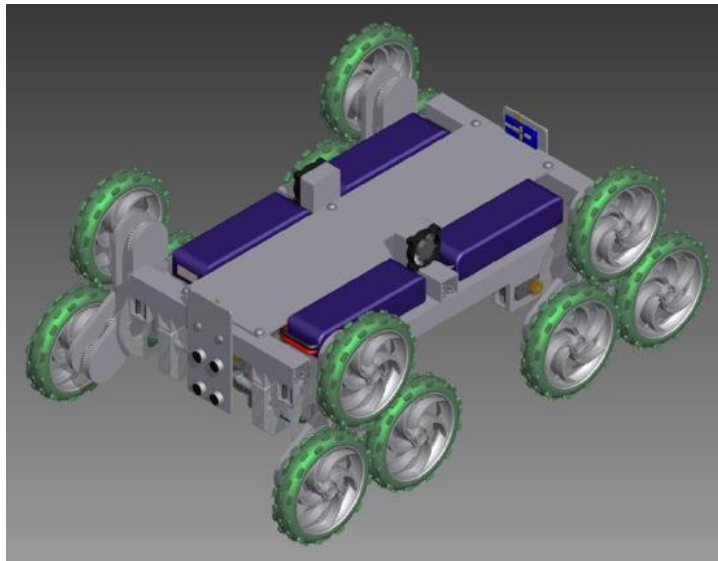


### C. DISCUSIÓN

Se trabajó directamente con el contador TIMER1 para hacer más eficiente la medición de distancia, ya que de esta forma no se implementan operaciones de punto flotante en el microcontrolador. Como se mencionó en el Capítulo XIII, se puede determinar el número de veces que debe contar el TIMER1 para llegar a

una distancia determinada, utilizando la frecuencia del reloj y el número de ciclos por instrucción. La red consta de seis sensores: dos ubicados en la parte frontal y dos en la parte posterior, de forma horizontal. Los dos restantes están colocados en la parte frontal de forma vertical. En la Figura 128 se muestran únicamente los dos que están colocados en la parte frontal de forma horizontal.

Figura 128. [6] Prototipo de la silla de ruedas con sensores ultrasónicos



La diferencia entre tiempos de ambos sensores es similar en el momento de la detección de la grada, y por lo tanto, también en la diferencia en el conteo de cada uno. Las diferencias más significativas se dan por el hecho de que no se tenía para esta prueba una grada como tal, sino que se utilizaron dos cajas, una encima de la otra, separadas a lo largo una distancia aproximada de 12 cm, para simular la profundidad de las gradas estándar para las que fue diseñado el prototipo. [6]

El movimiento provocó que se detectara el objeto de interés, pero con cierta inestabilidad, lo cual se produce porque se está sensando bastante rápido (cada 100 ms aproximadamente), al tener un ciclo infinito en el programa. Lo anterior

se arregla al sensar en un intervalo de tiempo mayor (cada segundo, por ejemplo).

Se realizó el procedimiento anterior para dos de los sensores ultrasónicos, ya que para los demás se aplica la misma idea. Otro factor que se tomó en cuenta debido a la cercanía de los sensores entre sí, fue el de provocar un retardo de 19 ms después de haber sido generada la señal ultrasónica; con esto se asegura que dicha señal haya regresado al sensor y así evitar interferencia.

## RED DE SENSORES ULTRASÓNICOS MEJORADA

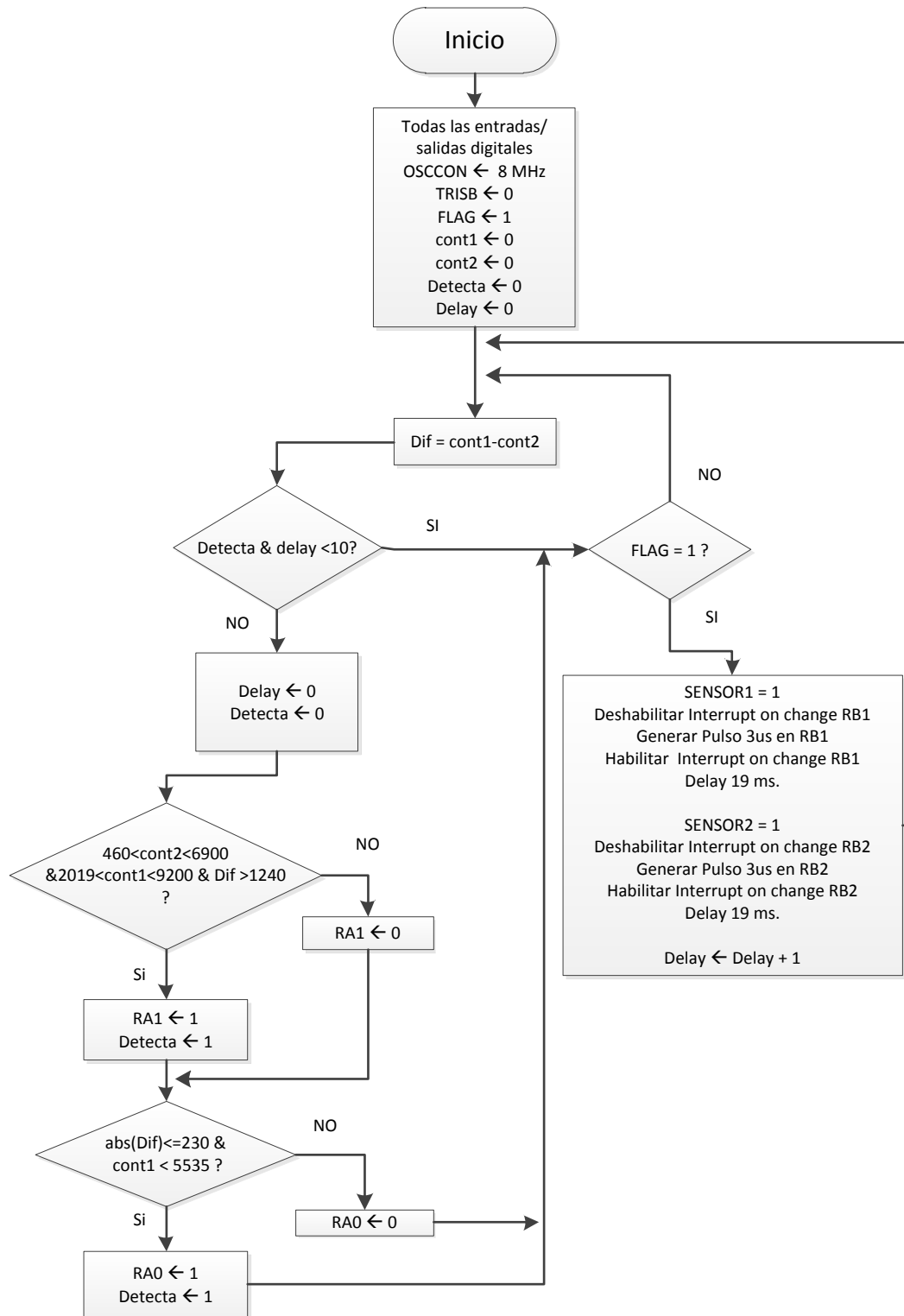
### A. DISEÑO

Se realizaron ciertos cambios a la parte de sensado de distancia para evitar inestabilidad en la medición y por otra parte, ampliar el rango de distancia para la detección de las gradas (ventana de distancia). Para ello se efectuaron los siguientes pasos:

1. Cambiar la “ventana de distancia”.
2. Utilizar banderas que permitan realizar mediciones cada cierto tiempo.
3. Realizar las operaciones condicionales que permiten detectar la grada o el obstáculo en el tiempo indicado para evitar inestabilidad en la medición.
4. Sensar las distancias en todo momento.

El diagrama de flujo implementado para el presente cambio en la red de sensores ultrasónicos, se muestra en la Figura 129.

Figura 129. Diagrama de Flujo para la red de sensores mejorada



## B. RESULTADOS

La Tabla 72 muestra distintas mediciones de tiempo a diferentes distancias, sin utilizar una superficie plana entre los sensores. La Tabla 73 muestra mediciones en las mismas condiciones, sin la superficie plana. Además, en ambas tablas se puede observar la diferencia entre los anchos de los pulsos.

Tabla 72. Mediciones de tiempo de dos sensores ultrasónicos, sin utilizar una superficie plana entre ellos

<b>Distancia aproximada de primer escalón (cm)</b>	<b>Ancho del pulso (ms)(Sensor arriba)</b>	<b>Ancho del pulso (ms)(Sensor abajo)</b>	<b>Diferencia en tiempo (<math>\mu</math>s)</b>
25	1.64	1.48	160
38	2.32	2.24	80
45	2.88	2.64	240
53	3.28	3.12	160
60	3.68	3.52	160

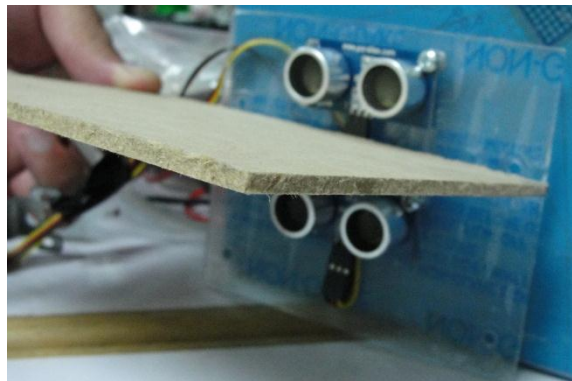
Tabla 73. Mediciones de tiempo de dos sensores ultrasónicos, utilizando una superficie plana entre ellos

<b>Distancia aproximada de primer escalón (cm)</b>	<b>Ancho del pulso (ms)(Sensor arriba)</b>	<b>Ancho del pulso (ms)(Sensor abajo)</b>	<b>Diferencia en tiempo (<math>\mu</math>s)</b>
25	2.2	1.48	720
38	2.88	2.24	640
45	3.36	2.64	720
53	3.76	3.12	640
60	4.22	3.52	700

### C. DISCUSIÓN

Anteriormente, el programa principal de la red de sensores ultrasónicos detectaba una grada si se encontraba lo suficientemente cerca de ella, pero se aumentó la “ventana” de distancia a la cual podría detectarse una grada, considerando el hecho de ser posible detectarla antes o a una distancia mayor. Cabe resaltar que para cambiar el ancho descrito fue necesario colocar entre los sensores una superficie plana, como se observa en la Figura 130, ya que debido al cono de apertura de los mismos, las mediciones resultaron ser indeseadas.

Figura 130. Superficie plana entre dos sensores ultrasónicos



Por otra parte, se revisan las condiciones cada cierto tiempo, ya que previamente, al sensar y verificar en todo momento, el bit de detección de la grada cambiaba de un estado a otro de forma inestable. Al utilizar una variable como contador y una como bandera se pudo realizar la verificación en un tiempo establecido.

La diferencia entre los anchos de los pulsos de las Tablas 72 y 73 representa información útil para modificar una de las condiciones para la detección de la grada, la cual fue permitir la detección si la diferencia es mayor o igual que 700  $\mu\text{s}$ , como se observa en la Tabla 73. En la mayoría de los casos la diferencia resultó ser mayor o igual que 700  $\mu\text{s}$ , por lo que puede suponerse la detección de una grada cuando se cumpla dicha condición.

## DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE CIRCUITOS IMPRESOS

### A. DISEÑO

Después de realizadas todas las pruebas en *protoboard*, se procedió a realizar el diseño de los circuitos impresos utilizando el software Altium Designer. Los pasos que se llevaron a cabo para la construcción de los circuitos impresos son los siguientes:

1. Diseñar en un esquemático los circuitos a fresar.
2. Diseñar el PCB del esquemático del paso 1.
3. Exportar archivos "Gerber" y "Drills" para el programa IsoPro (que utiliza la fresadora).
4. Fresar los PCBs en placas de cobre.
5. Probar continuidad en los circuitos.
6. Soldar los componentes.
7. Repetir el paso 5.
8. Realizar pruebas de los circuitos.

Se desarrollaron tres circuitos, los cuales están relacionados con los Módulos de potencia, interfaz cerebro-máquina y mecánica.

1. Circuito relacionado con el Módulo de potencia (sistema de control). Este circuito está conformado básicamente por un microcontrolador dsPIC30F4011 y un XBee PRO. Como se mencionó en el Capítulo XII, se utilizará una interfaz serial para comunicación con un XBee PRO y la otra se empleará para intercambiar datos con el sistema de control.

2. Circuito relacionado con el Módulo interfaz cerebro-máquina. Este circuito se conforma básicamente de un XBee PRO y un MAX232 para comunicación serial.

3. Circuito relacionado con el Módulo de mecánica. Este circuito contiene la parte de sensores ultrasónicos y un microcontrolador PIC16F887; la parte del Módulo de mecánica involucrada consiste en un acelerómetro de tres ejes.

## B. RESULTADOS

En las Figuras 131, 132 y 133 se muestran los diseños de los PCBs descritos anteriormente. En las Figuras 134, 135 y 136 se observan los PCBs ya construidos con los componentes soldados en sus respectivas placas.

Figura 131. PCB para comunicación con Módulo interfaz cerebro-máquina

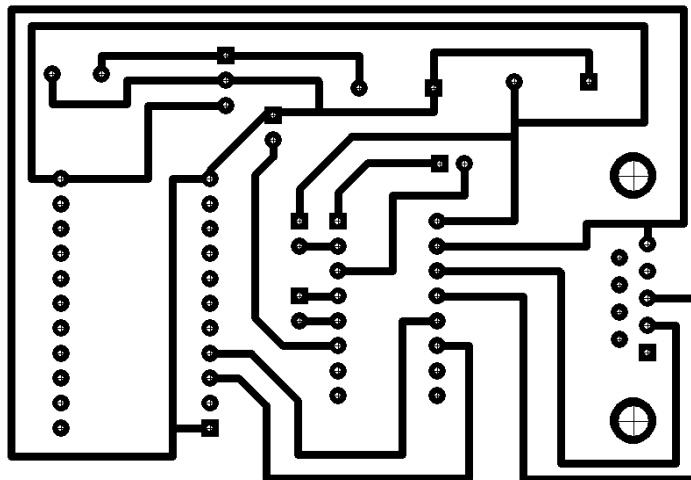


Figura 132. PCB de sensores ultrasónicos y acelerómetro

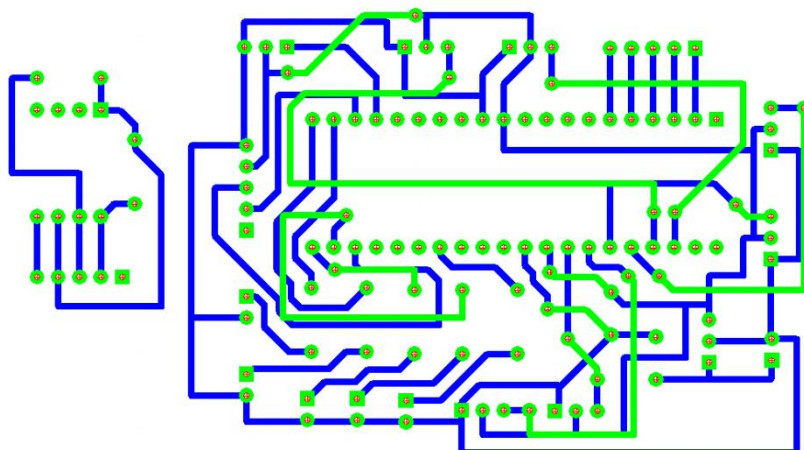


Figura 133. PCB para comunicación inalámbrica con sistema de control

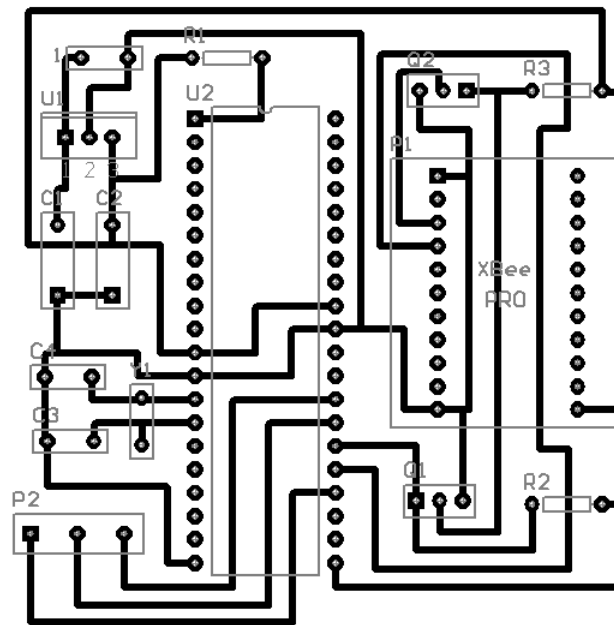


Figura 134. PCB en placa para comunicación con Módulo interfaz cerebro-máquina

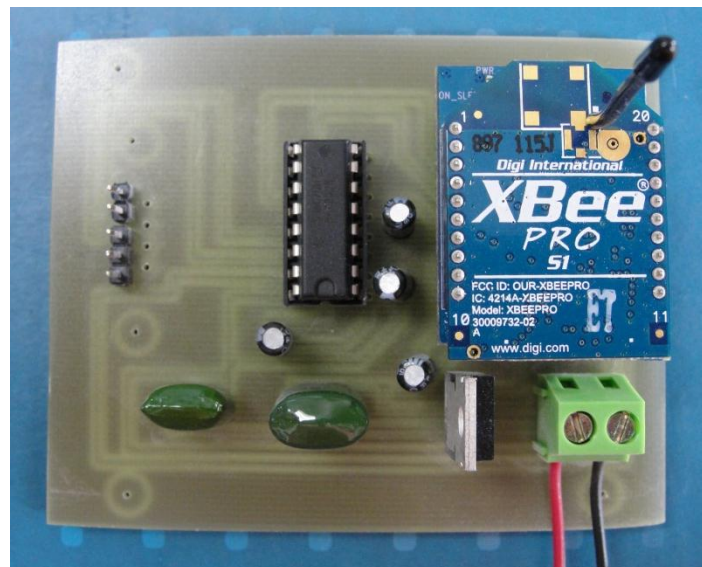


Figura 135. PCB en placa de sensores ultrasónicos y acelerómetro

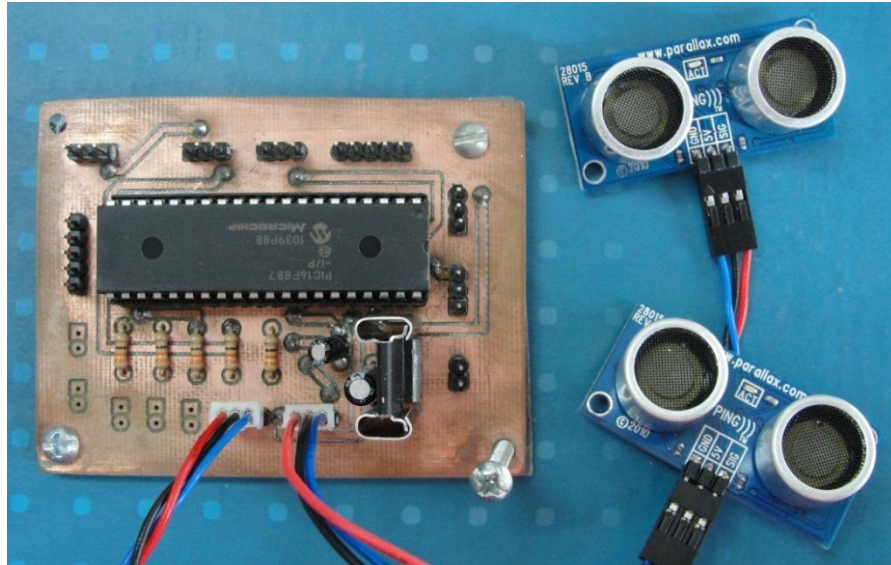
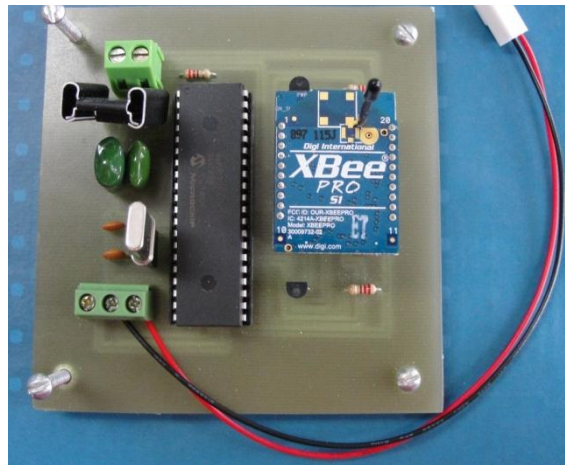


Figura 136. PCB en placa para comunicación inalámbrica con el sistema



### C. DISCUSIÓN

Para el diseño del PCB de la Figura 134 no se hizo necesario utilizar un microcontrolador, ya que los módulos XBee PRO utilizan el protocolo serial RS-232 y se conectan de forma directa. El otro XBee PRO, con el cual se da una

conexión punto a punto, se conecta por medio de un adaptador USB a la computadora, el cual es reconocido como un puerto COM.

Una buena práctica consistió en realizar medición de continuidad antes y después de soldar los componentes. Después de asegurar que todas las conexiones estuvieran correctas, se procedió a alimentar a los circuitos y realizar mediciones de voltaje, sin los componentes que pueden removerse, es decir microcontroladores, XBee PRO, sensores, entre otros; esto, para comprobar que no existiera ningún corto circuito después de realizadas las soldaduras.

La única placa en la que se presentó problema fue la que incluye los sensores ultrasónicos, en la que existían voltajes parásitos en ciertos puntos de conexión. Para resolver el problema, se utilizó una herramienta para “reparar” los caminos y de nueva cuenta se midió el voltaje en donde se presentaba el error.

## **SELECCIÓN DE BATERÍAS**

### **A. DISEÑO**

En esta sección se presenta la tarea de determinar el elemento de almacenamiento de energía que proporcionará la alimentación a los circuitos y motores del prototipo de la silla de ruedas. Para llevar a cabo dicha tarea se tomaron en cuenta los siguientes pasos:

1. Se establecieron ciertos parámetros con los que debía contar la batería a escoger, entre los cuales se encuentran: voltaje nominal, carga eléctrica, tasa de descarga máxima. Cabe mencionar que el peso, las dimensiones y el precio de la misma representan partes importantes a considerar.

2. Tomando como referencia las características del paso 1, se realizó una búsqueda en Internet de diversos proveedores con el fin de proporcionar una lista de candidatos para la tarea.

### **B. RESULTADOS**

Partiendo de los requerimientos ya propuestos, se completó la Tabla 74.

Tabla 74. Baterías a considerar para el megaproyecto

Tipo de Batería	Voltaje (V)	Carga eléctrica (Ah)	Máx. Velocidad de Descarga (A)	Peso (lb)	Dimensiones (LargoxAnchoxAlto) (mm <sup>3</sup> )	Precio
Li-Ion	12	20	4	3.94	176 x 68 x 100	\$ 325.95
Li-Ion	12-13.2	20	4	5.7	200 x 120 x 75	\$ 405.95
Li-Ion	12	20	4	4.62	200 x 125 x 67	\$ 469.00
Li-Ion	14.8	25.2	14	4.18	180 x 150 x 45	\$ 342.45
Li-Ion	14.8	20	15	4.1	205 x 150 x 31.5	\$ 359.99
Li-Ion	14.8	16	6.5	3.21	168 x 152 x 30	\$ 269.99
LiFePO4	12.8	19.8	55	5.4	165 x 110 x 92	\$ 298.95
LiFePO4	12.8	19.8	13	5.4	165 x 110 x 80	\$ 295.95
LiFePO4	12.8	20	30	4.79	208 x 126 x 56	\$ 329.50
Li-Ion	14.8	15.6	21	2.39	150 x 58 x 74	\$ 354.95
Li-Ion	14.8	25.2	14	4.19	180 x 86 x 82	\$ 334.50
LiMnNi	14.8	12	20	3.41	114 x 114 x 88	\$ 225.95

En la Figura 137 se muestra la batería seleccionada a utilizar para los circuitos y motores que se incluirán en el prototipo de la silla de ruedas.

Figura 137. [6] Batería seleccionada para el megaproyecto



### C. DISCUSIÓN

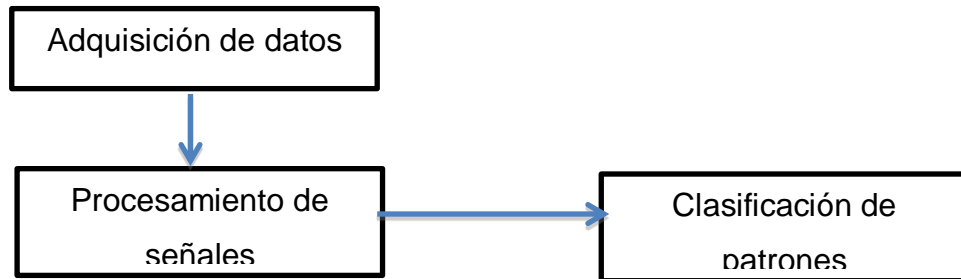
Considerando características entre los diferentes tipos de baterías existentes, se pudo examinar que las de Li-Ion son las que más ventajas presentan en relación a otros tipos investigados, como las de NiMH. Algunas de las ventajas son: mejor rendimiento, mayor relación J/Kg, más ciclos de carga y descarga y son mejores para aplicaciones que requieren el uso constante o recargas frecuentes. [6]. En razón de lo anterior, se discutió con los miembros del grupo del megaproyecto y se establecieron los requerimientos del módulo de potencia, en donde se presenta el mayor consumo de corriente debido a los motores. Al realizar una estimación del consumo de corriente, se determinó que para el módulo de Potencia se demandarán aproximadamente 7 A. Adicionando la corriente que consumirán los demás módulos, se puede especificar un consumo total de aproximadamente 10 A.

Se definió un tipo de batería de forma definitiva, la cual se muestra en la Figura 137 (resaltado en Tabla 74). Ésta presenta un voltaje nominal de 14.8 V, una carga eléctrica de 25.2 AH, una tasa máxima de descarga de 14 A y un peso de aproximadamente 4 lb. Entre todas las opciones mostradas, se eligió la presente por varias razones. Las dos más importantes son la carga

eléctrica y la velocidad de descarga máxima, ya que éstas definirán el tiempo de funcionamiento del prototipo. En cuanto al voltaje nominal, se realizó una búsqueda de baterías de voltajes de entre 12 y 16 V, por lo que cualquiera de ellas podría adaptarse. Por otra parte, las dimensiones y el peso de la batería se adecúan bastante bien para formar parte del prototipo.

## XV. APÉNDICE E. MÓDULO DE INTERFAZ CEREBRO-MÁQUINA

Figura 138. Diagrama de Bloques del Módulo de interfaz cerebro - máquina.



Debido a la naturaleza de los experimentos, no fue posible definir una metodología general que cubriese a todos los casos. De esta cuenta, puede encontrarse un diseño experimental para cada experimento, siendo cada uno, independiente del anterior. El orden de presentación de los experimentos no es cronológico, y busca explicar de mejor forma, como se realizaron los mismos. En la figura 138, se muestra, a grandes rasgos, la división en submódulos llevada a cabo en este Módulo de Megaproyecto.

## SUBMÓDULO DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL: RECONOCIMIENTO DE PATRONES

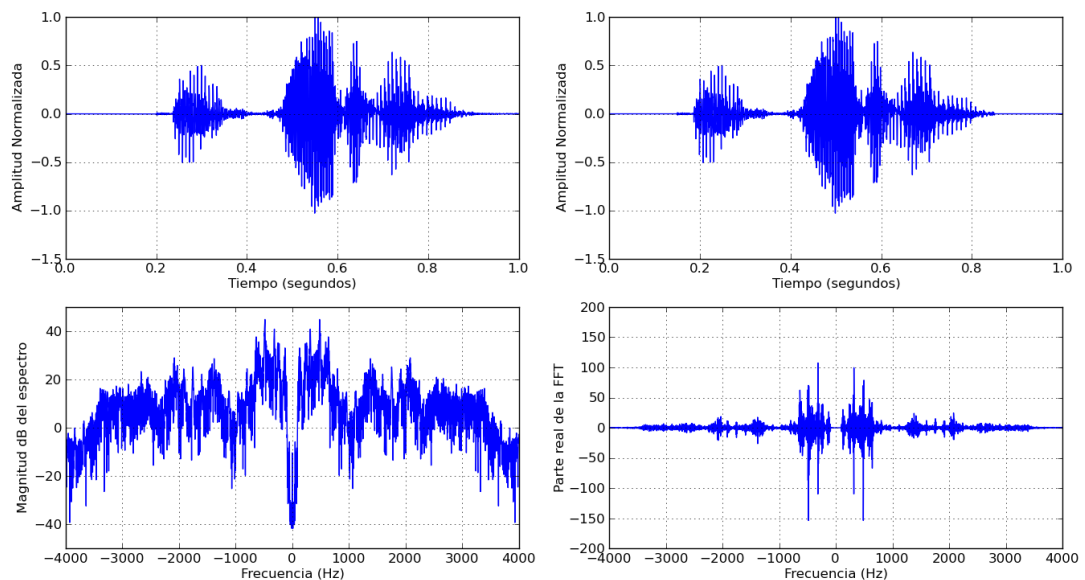
### A. Diseño

1. Se llevó a cabo la lectura de Neural Networks: A Systematic Introduction[6], hasta el Capítulo 8, titulado Fast Learning Algorithms.
2. Utilizando el enfoque de Álgebra Matricial que se le da al algoritmo de aprendizaje de propagación hacia atrás en el libro de Raúl Rojas, se implementó en Python [28] una red neuronal artificial con tres capas de neuronas: una capa de entrada, una capa escondida, y una capa de salida. La cantidad de neuronas en cada capa la especifica el usuario.
3. Se grabó 21 señales de voz para cada una de las palabras “adelante”, “atrás”, “izquierda” y “derecha” con un micrófono en una computadora, para comprobar el desempeño de la red clasificadora al reconocer las mismas.
4. Se intentó entrenar a la red, para que para cada palabra articulada, diera un resultado numérico diferente. Se utilizaron 5 patrones por palabra para esta causa.
5. Se aplicó varias transformaciones a las señales de entrenamiento y luego se entrenó con 5 de estas señales, para cada comando, a la red neuronal, para observar si el desempeño de la red neuronal, reconociendo patrones, era afectado por esta causa.
6. Se comprobó la capacidad de clasificación de la red con el aprendizaje mencionado en el paso 5.
7. Se siguió la metodología descrita en la sección IX del presente trabajo de graduación para procesar las señales de voz, con el fin de comprobar si el desempeño de la red neural clasificadora mejoraba.
8. Con las señales obtenidas, se entrenó a la red neural clasificadora.
9. Se obtuvieron los resultados presentados en el apartado B de la presente sección.

## B. Resultados

A continuación se presenta una imagen describiendo las transformaciones que se aplicaron a las señales de prueba en el paso 5 del diseño experimental en cuestión. Con cada una de estas transformaciones, no fue posible entrenar a la Red, pues el algoritmo de aprendizaje no convergió a una solución.

Figura 139. Ejemplo de las distintas transformaciones aplicadas a las señales



En esta etapa fue claro que para clasificar a una señal en tiempo, utilizando una red neural clasificadora, era necesario transformar a las señales en tiempo, a una representación que fuera mucho más suave, es decir, con una primera derivada sin muchos picos. Para esto se desarrolló la etapa de procesamiento de las señales

En las Tablas 75 y 76 puede observarse el desempeño de la red neuronal clasificadora implementada, utilizando al submódulo de procesamiento de señales, al ser entrenada con 16 señales por comando y luego probada con 5

señales de cada una, así como al ser entrenada con 14 señales y se probada con 7.

Tabla 75: Resultados al entrenar una red neural con 16 muestras y probada con 5 muestras de cada palabra.

Muestra	Reconocida como				% Éxito
	Izquierda	Derecha	Adelante	Atrás	
Izquierda17	x				40.00%
Izquierda18	x				
Izquierda19		x			
Izquierda20		x			
Izquierda21	x				
Derecha17		x			100.00%
Derecha18		x			
Derecha19		x			
Derecha20		x			
Derecha21		x			
Adelante17			x		80.00%
Adelante18			x		
Adelante19			x		
Adelante20			x		
Adelante21				x	
Atras17				x	80.00%
Atras18				x	
Atras19				x	
Atras20				x	
Atras21			x		

Tabla 76: Resultados al entrenar una red neural con 14 muestras y probada con 7 muestras de cada palabra

Muestra	Reconocida como				% Éxito
	Izquierda	Derecha	Adelante	Atrás	
Izquierda15		x			71.43%
Izquierda16	x				
Izquierda17	x				
Izquierda18	x				
Izquierda19	x				
Izquierda20		x			
Izquierda21	x				
Derecha15		x			57.14%
Derecha16	x				
Derecha17		x			
Derecha18	x				
Derecha19		x			
Derecha20		x			
Derecha21	x				
Adelante15			x		85.71%
Adelante16			x		
Adelante17			x		
Adelante18			x		
Adelante19			x		
Adelante20			x		
Adelante21				x	
Atras15				x	85.71%
Atras16				x	
Atras17				x	
Atras18				x	
Atras19				x	
Atras20				x	
Atras21			x		

### C. Discusión

El desenvolvimiento cronológico del módulo de interfaz cerebro-máquina del megaproyecto INNOVA sitúa el desarrollo del submódulo de inteligencia artificial al inicio del proceso de investigación. Debido a que sobre este tema no se recibió ningún tipo de formación académica en la Universidad, la

primera parte del taller de megaproyecto consistió en un estudio intensivo sobre la forma en que funcionan las redes neurales, así como los algoritmos de aprendizaje que presentan, y por supuesto, como se puede implementar una red neural para funcionar como un clasificador de patrones.

Durante la lectura se logró comprender el modo de funcionamiento de las unidades de procesamiento que componen a una red neural, cómo ha ido cambiando dicho paradigma computacional durante su desarrollo, hasta llegar a una implementación concreta del algoritmo de aprendizaje de propagación hacia atrás, definida utilizando álgebra lineal. Poder representar a una red neural por medio de matrices, y el acercamiento que se da en la lectura ya mencionada a esta problemática, aplicando álgebra matricial, permitió que la implementación en la computadora del algoritmo de propagación hacia atrás se hiciera sin ningún problema.

Dicha implementación fue desarrollada en Python, debido a que es un lenguaje con una sintaxis muy sencilla, que sin embargo, posee una gran cantidad de librerías de código abierto para llevar a cabo cálculos ingenieriles, utilizando algoritmos eficientes.

Algo muy importante de observar es que una red neural clasificadora, tiene problemas al clasificar señales cuya amplitud varía de forma drástica en cortos períodos de tiempo, mientras que clasificar correctamente señales más suaves parece hacerlo sin dificultades.

Esto denota la necesidad del filtrado previo, así como del procesamiento de señales digitales para suavizar y poder proveer de un dato más limpio a la red clasificadora y que a su vez, realice de mejor forma su trabajo.

La versatilidad de las redes neurales es clara, pues al poder proveerle una gran variedad de datos, y que pueda clasificarlos correctamente permite desarrollar herramientas que por su naturaleza, necesitan adaptarse a

pequeños cambios, en este caso, cambios que puedan estar presentes en las señales del cerebro tomadas.

## SUBMÓDULO DE ADQUISICIÓN DE DATOS

### A. Diseño

1. Se conectó la gorra de electrodos que cumple con el estándar internacional SI 10-20 al circuito del OpenEEG Project.
2. Este se conectó a la computadora vía el Módulo Inalámbrico. [28]
3. Se desarrolló una aplicación en Python, capaz de leer el puerto serial, así como de reconocer el encabezado con el que el módulo OpenEEG envía la información correspondiente a la conversión analógico-digital de las señales de los electrodos conectados al mismo.
4. La señal muestreada corresponde a la diferencia entre los electrodos P3 y GND del estándar SI 10-20.

### B. Resultados

Al terminar la interfaz de recepción de datos en la computadora, la cual fue implementada con el lenguaje de programación Python, se pudo observar que las señales recibidas presentaron un comportamiento de acuerdo al esperado. A continuación se muestra algunas de estas señales, cuya gráfica fue generada justo después de ser recibidas.

Figura 140. Señal en tiempo del lóbulo parietal realizando un parpadeo.

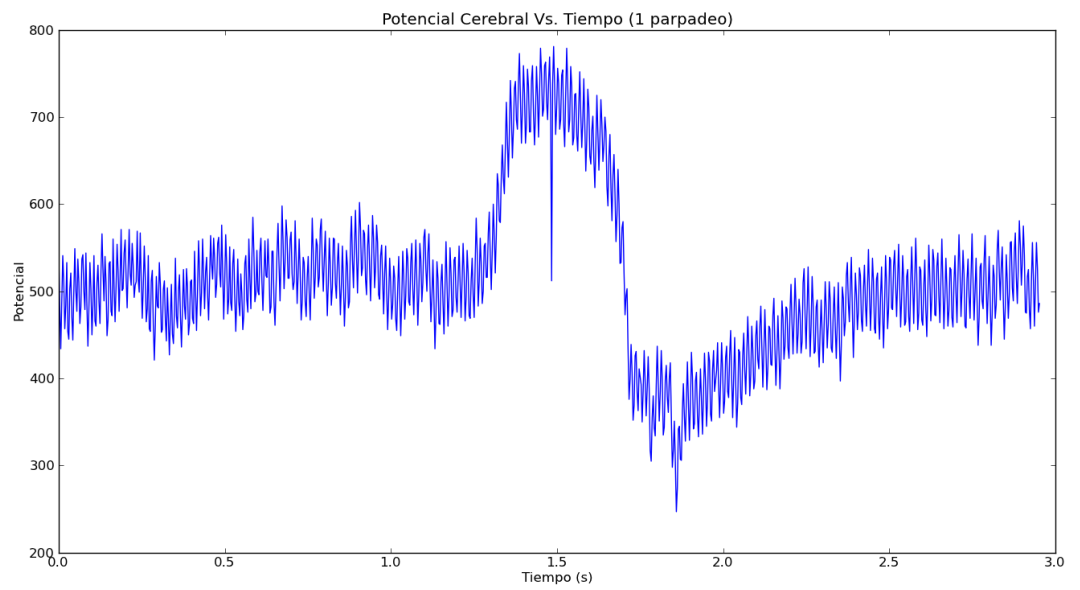


Figura 141. Señal en tiempo del lóbulo parietal realizando dos parpadeos.

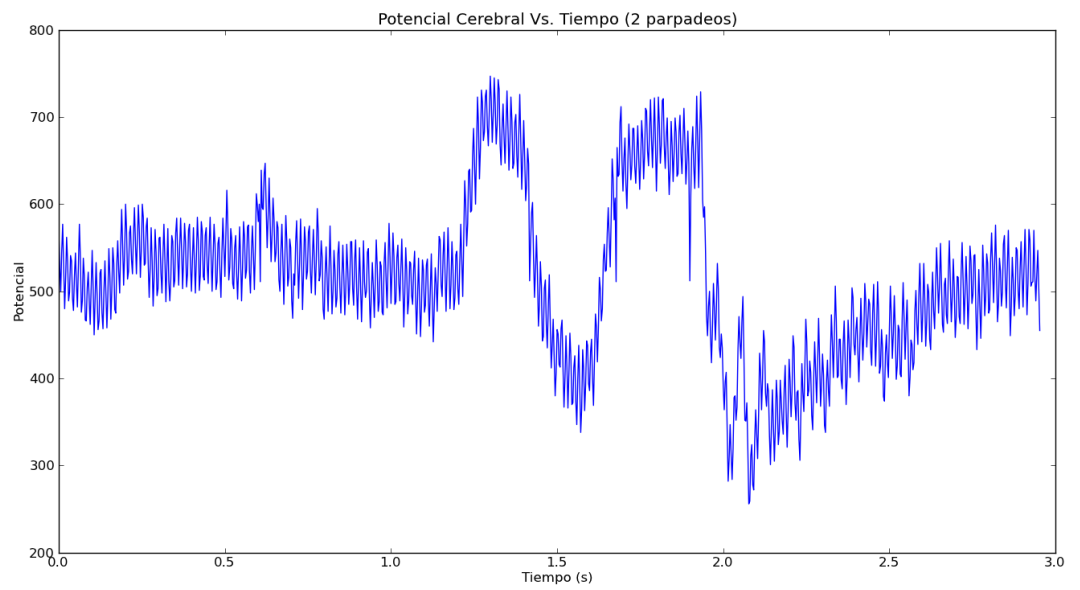


Figura 142. Señal en tiempo del lóbulo parietal realizando tres parpadeos.

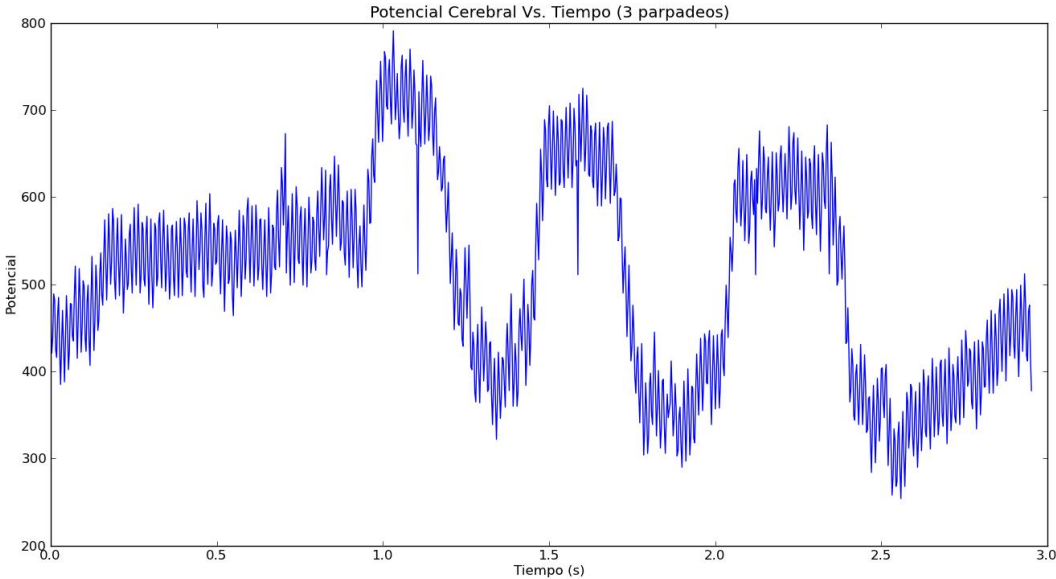


Figura 143. Señal en tiempo del lóbulo parietal realizando cuatro parpadeos.

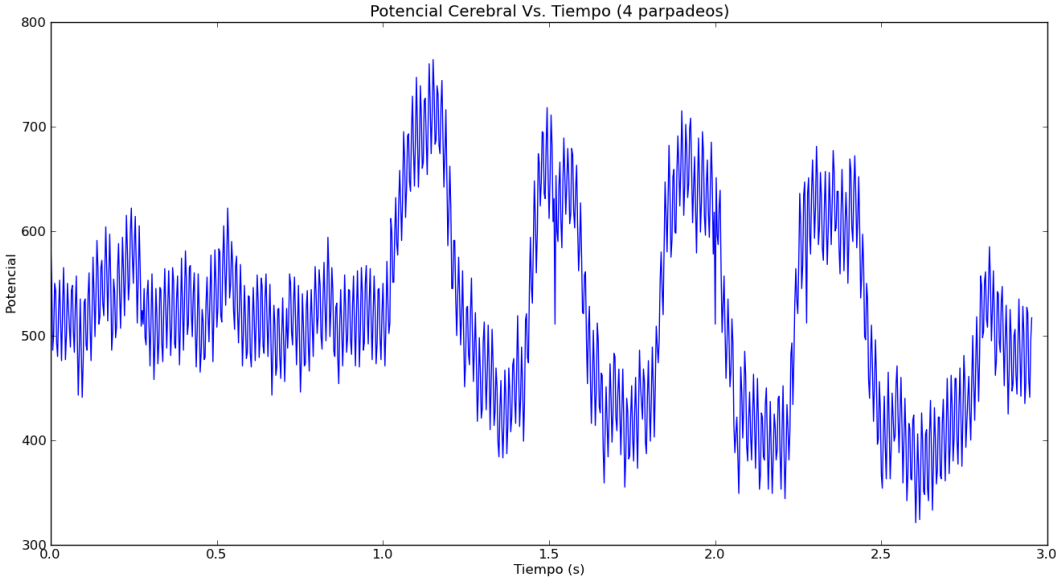


Figura 144. Señal en tiempo del lóbulo parietal realizando cinco parpadeos

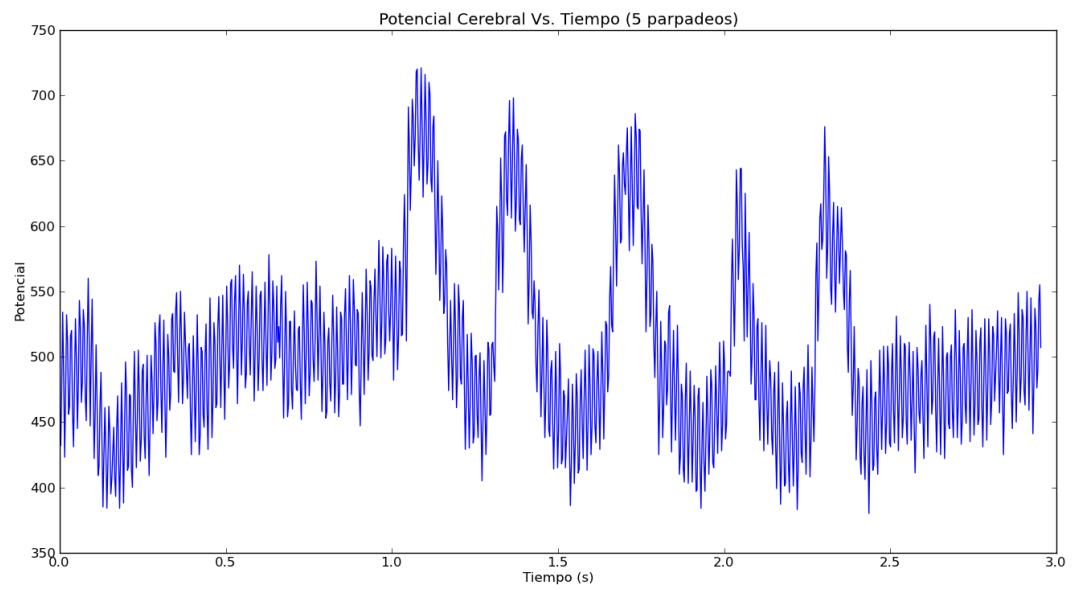


Figura 145. Señal en tiempo del lóbulo parietal realizando seis parpadeos

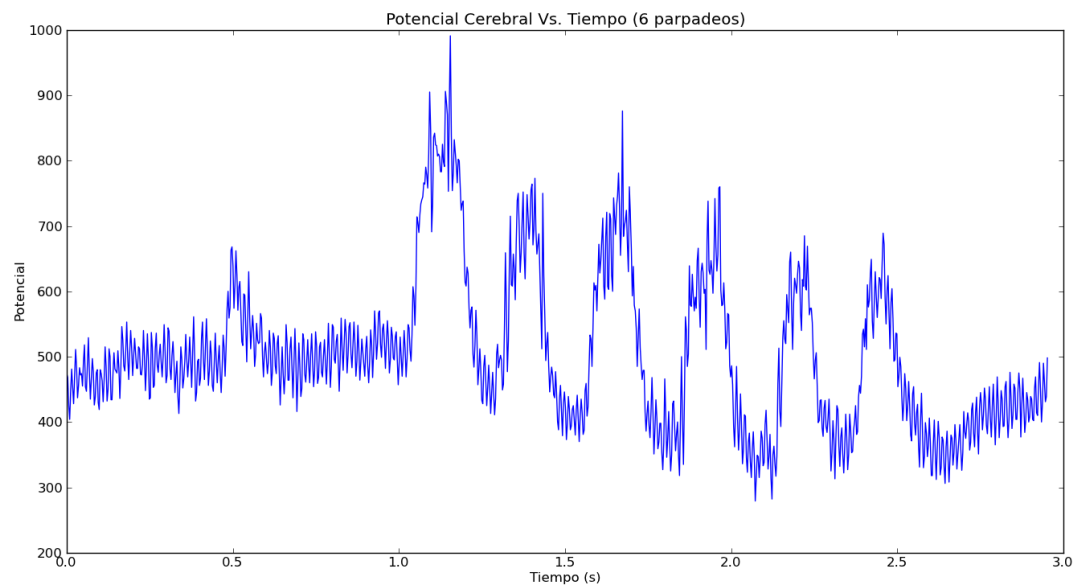
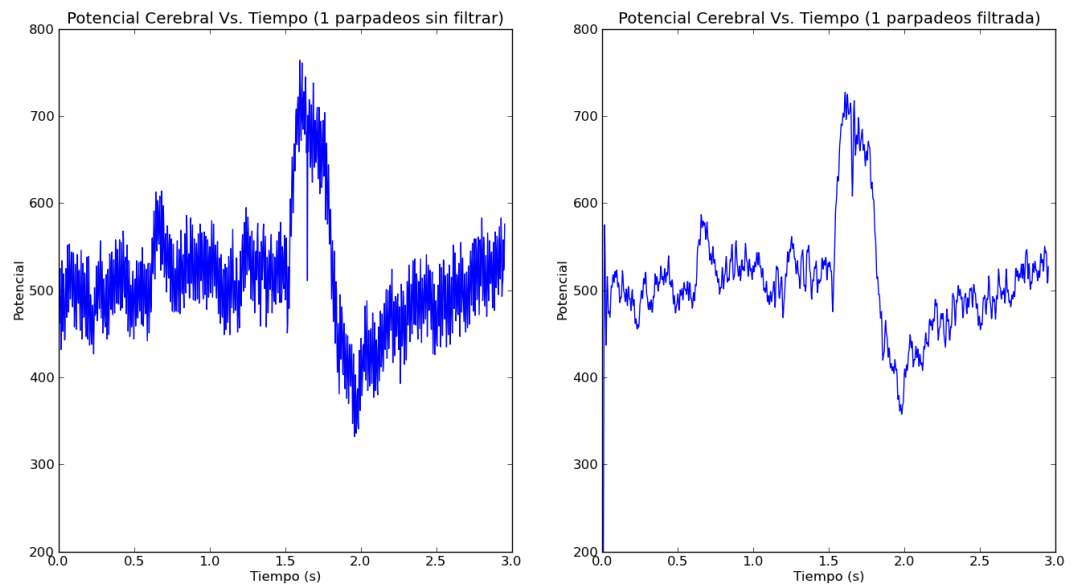


Figura 146. Señal en tiempo del lóbulo parietal realizando un parpadeo, filtrando la señal con un filtro pasa bajas con frecuencia de corte de 60 Hz



Finalmente, se graficó una de las señales tomadas, filtrándola para observar si el ruido observado correspondió a ruido de 60 Hz, introducido por las líneas de transmisión de potencia que se encontraron al rededor del experimento. El resultado, como se muestra en la figura 146, apoyó esta hipótesis, y además permitió tener una señal mas limpia con la cual trabajar.

### C. Discusión

La obtención de datos es una parte fundamental del presente módulo del megaproyecto INNOVA. Ésta se realizó a través de la placa de filtrado y amplificación, así como con la placa de conversión analógico a digital del OpenEEG Project, utilizada en el módulo PRE del Megaproyecto ANIMA[5]. El modo de operación de estos circuitos impresos es explicado en la fuente correspondiente.

La señal que se está analizando, es la correspondiente a la diferencia entre los electrodos P3 y GND, debido a que según el módulo de PRE de ANIMA [43], los lóbulos parietales están encargados de la integración de la vista con las demás entradas sensoriales, según esto, deberían tener una

actividad grande al abrir y cerrar los ojos. Al llevar a cabo el presente experimento, se comprobó esto.

Puede observarse que los potenciales registrados, correspondientes a los momentos de realizar parpadeos, tienen una tendencia muy marcada, y es que con cada parpadeo, se registra un máximo local en la señal de potencial del cerebro. Estas señales, sin embargo, aún presentan ruido muy marcado con frecuencia de 60 Hz, sin embargo, la relación señal-ruido de este caso es lo suficientemente alta como para que en la señal de interés sea observable el comportamiento deseado: El parpadeo. Debe notarse que debido a los filtros utilizados en los circuitos impresos del OpenEEG project, las componentes frecuenciales presentes son relativamente bajas, por lo que el comportamiento que se analizará, será el correspondiente a las frecuencias mas bajas de la señal original.

En este experimento se tuvo dificultades al inicio con la recepción de forma serial de la información, pues se quiso leer el puerto serial virtual de la computadora, implementado utilizando un adaptador Serial RS232 – USB, un dato a la vez. Al hacer esto, se perdieron muchos datos, lo cual se comprobó al leer el número correlativo de trama. Esto se solucionó ordenando al programa leer de dicho puerto grupos de 170 bytes. Esto pues una trama enviada por el OpenEEG contiene 17 bytes, como se especifica en el Módulo PRE del Megaproyecto ANIMA [13] con lo que se estarían leyendo en grupos de 10 muestras de las señales convertidas.

## SUMÓDULO DE PROCESAMIENTO DIGITAL DE LAS SEÑALES

### A. Diseño

1. Se grabó con la ayuda de un micrófono, y el software Garageband [16], 10 muestras de vocalización de cada una de las vocales “a”, “e”, “i”, y “o”.
2. Se tomó ventanas de 500 muestras de cada vocal articulada.
3. Se aplicó una ventana de Hamming los segmentos de 500 muestras.
4. Se entrenó a la Red Neuronal con la FFT de 5 señales de cada una de las vocales articuladas, mencionadas en el paso 3.
5. Se comprobó el desempeño de la red neural, clasificando las 5 señales restantes, habiendo sido transformadas como se especifica en los pasos 2, 3 y 4.
6. Se aplicó la envolvente espectral a las señales mencionadas en el paso 3.
7. Se repitió el paso 4, esta vez, utilizando la envolvente espectral en lugar de la FFT.
8. Se comprobó el desempeño de la red neural clasificando las 5 señales restantes, habiendo sido transformadas de acuerdo a los pasos 2, 3 y 6.
9. Se encontró la envolvente espectral de las señales grabadas en el paso 3 de la sección de diseño experimental del Capítulo VII de este trabajo de graduación.
10. Se encontró la envolvente espectral de la Transformada Wavelet de las señales grabadas en el paso 3 de la sección de diseño experimental del capítulo VII de este trabajo de graduación.

B. Resultados

Figura 147. Señal en tiempo de la vocal "a"

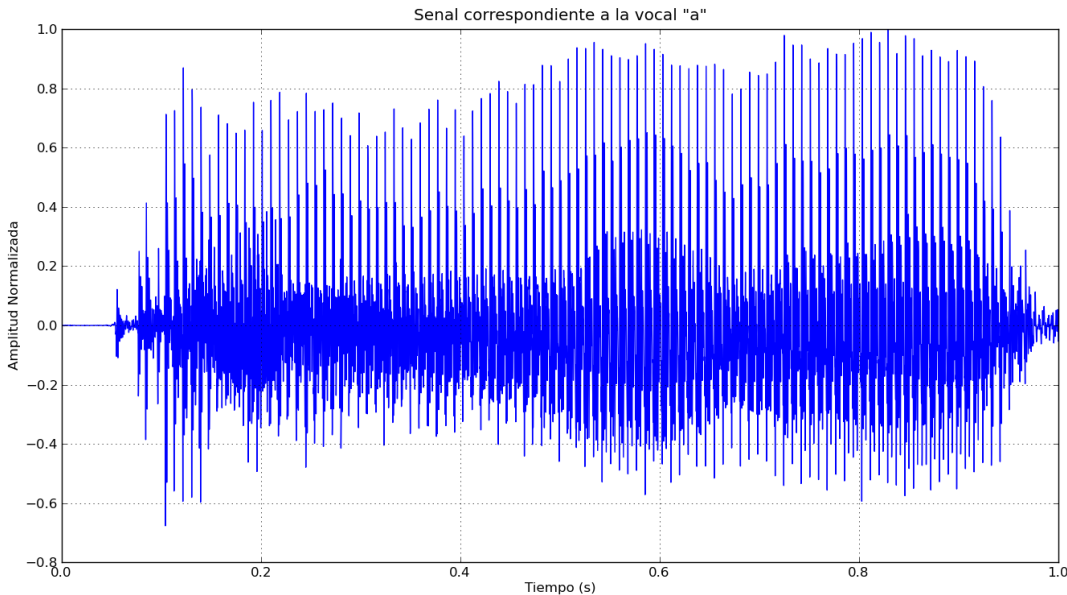


Figura 148. Ventana de 500 muestras de la vocal "a"

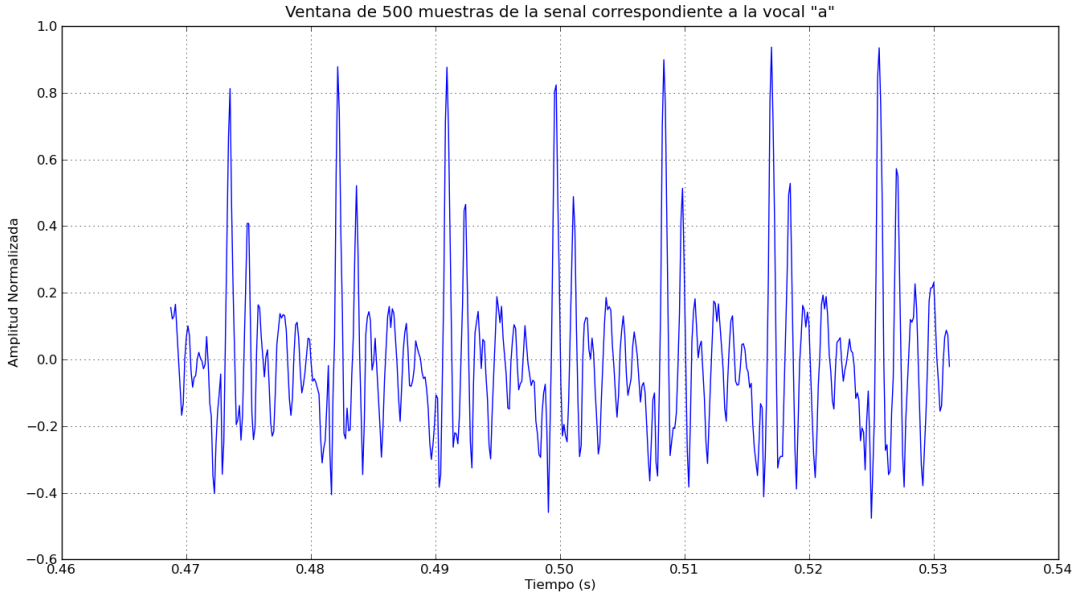
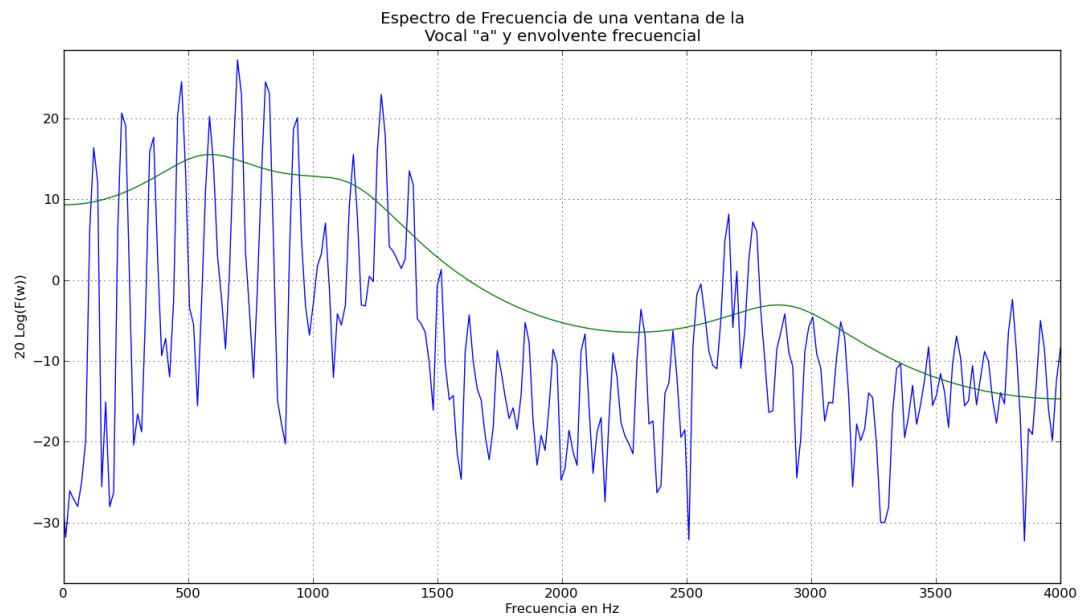


Figura 149. Ventana de 500 muestras de la vocal "a", aplicándole una ventana de Hamming



Figura 150. Envoltura Frecuencial de las 500 muestras con ventana de Hamming de la vocal "a"



En la figura 150, puede observarse en azul a la magnitud del espectro de la ventana de "a", mientras que la línea verde corresponde a la envoltura frecuencial de la misma muestra. Puede apreciarse que la envoltura es

mucho mas suave que la magnitud del espectro de la señal. Esta señal sería mucho mas fácil de manejar.

Tabla 77: Porcentaje de éxito en el reconocimiento de vocales

Vocal	% de reconocimiento sin envolvente	% de reconocimiento con envolvente
“a”	0%	100%
“e”	20%	100%
“i”	0%	100%
“o”	20%	100%

Figura 151. Envolvente espectral para las distintas palabras articuladas

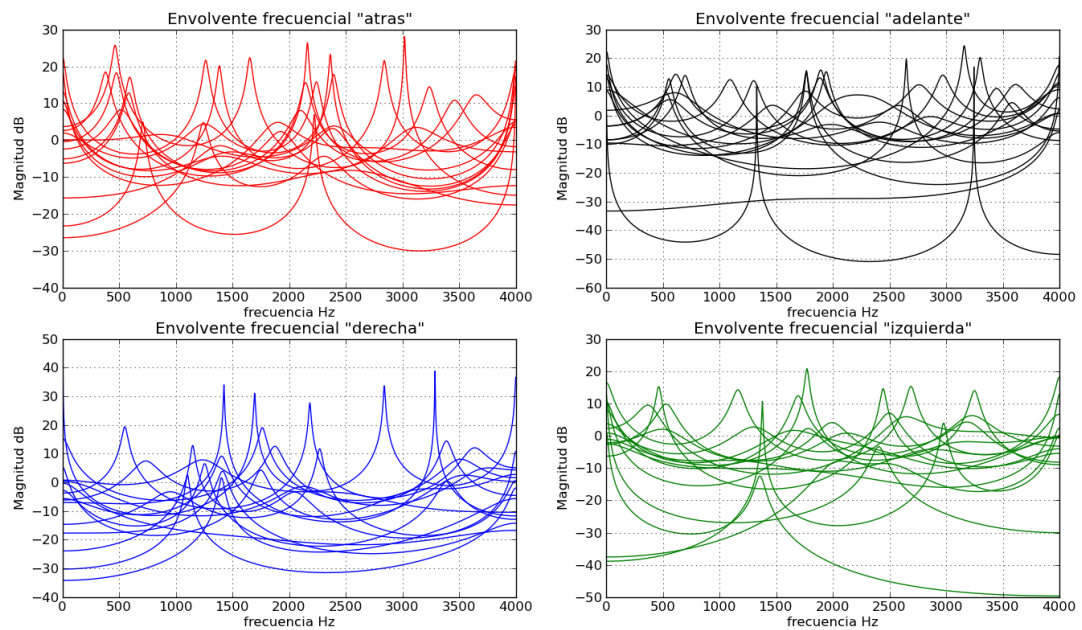
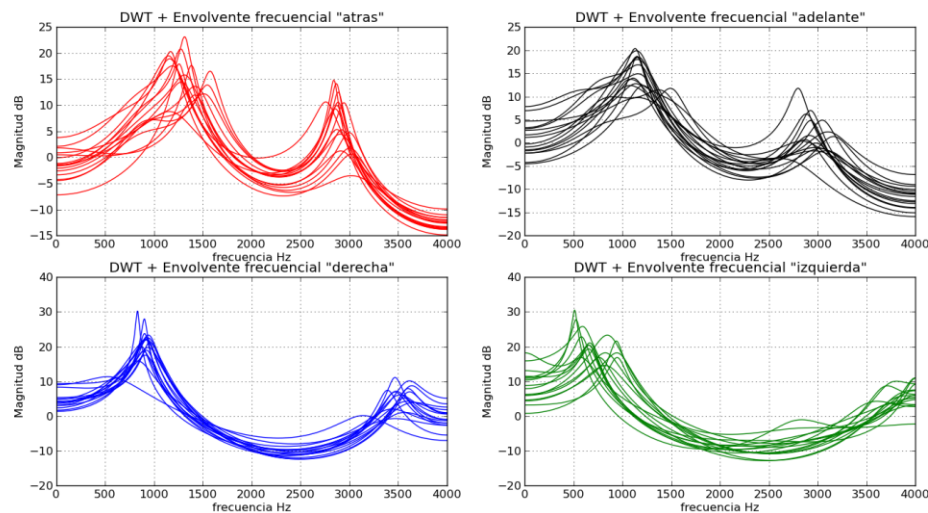


Figura 152. Envoltente espectral de la transformada Óndula para cada palabra.



### C. Discusión

Debido a que en el experimento detallado en el Capítulo VII del presente trabajo de graduación, el uso de la magnitud de la FFT no mostró un desempeño lo suficientemente bueno, se investigó sobre una posible representación mas suave de las señales, a nivel frecuencial. Esta representación fue la envoltente frecuencial de una señal

Luego de haber realizado pruebas exitosas reconociendo sonidos tan básicos como el de las vocales, se buscó reconocer palabras completas como un todo, con el fin de hacer a la herramienta presente, un poco mas robusta. Se tomaron señales vocales, debido a que son señales con componentes frecuenciales altos, que por su complejidad, resultarían difíciles de reconocer. Además, se sabía que las señales del cerebro, por las limitaciones de Hardware, tendrían componentes frecuenciales bajos, y serían mas *simples*, por lo que reconocerlas con el mismo enfoque aquí utilizado sería mas fácil.

Fue por esto que se realizaron varias pruebas, con el fin de buscar una representación o configuración en el procesamiento de señales que permitiesen reconocer a una palabra completa dentro de una categoría deseada.

Una combinación que presentó resultados sorprendentes fue obtener primero la transformada óndula, y luego de la señal resultante obtener la envolvente espectral. El resultado de llevar a cabo esta acción muestra, de acuerdo a la Figura 152, que existe un patrón claro que relaciona a las palabras que articulan un mismo comando.

Al observar los altos porcentajes de reconocimiento logrados con la ayuda de este experimento, puede notarse la utilidad de la transformada óndula para representar de forma robusta a una señal, ya que permite preservar esas características que la hacen pertenecer a un grupo específico de señales.

Puede observarse también que el hecho de aplicar la transformada óndula a las señales, las hace presentar una tendencia mas marcada entre una misma categoría, característica aprovechada por la red neural clasificadora para poder asignar una categoría a cada señal de prueba, con una alta probabilidad de éxito. Si se comparan los resultados con aplicar únicamente la envolvente frecuencial de la señal, es claro que es conveniente encontrar la transformada Óndula y luego la envolvente espectral de las señales para poder reconocer de forma adecuada a las señales.

## SUBMÓDULO DE INTEGRACIÓN DE CAPTURA DE DATOS, PROCESAMIENTO DE SEÑALES E INTELIGENCIA ARTIFICIAL

### A. Diseño

1. Se realizó una interfaz gráfica en Python, donde se incluyera funcionalidad para grabar señales del cerebro y guardarlas como archivos de texto, así como poder entrenar a una red neuronal con estas señales. Además, se dio la opción para que se pudiera cargar los archivos de pesos de entrenamientos previos, como una especie de perfil del usuario. Esta interfaz es capaz también de realizar el muestreo de una señal del cerebro, procesarla y proveerla a la red neural previamente entrenada, con el fin de obtener la clasificación de la señal.
2. Primero se grabó 20 patrones de cada una de las señales a utilizar. Se codificó el comando, dependiendo de la cantidad de parpadeos que diese una persona.
3. Se realizó un filtrado digital de las señales, utilizando un filtro IIR, de tipo Butterworth de 5to. grado pasa baja, con frecuencia de corte de 10 Hz.
4. Se intentó obtener la envolvente frecuencial para analizar la señal en el rango de bajas frecuencias.
5. Se tomó una señal del cerebro, y se le replicó y concatenó la misma repetidas veces, dieciséis (16) para ser exactos. Esto con el fin de periodizar la señal.
6. Se aplicó la transformada Óndula seis veces.
7. Se obtuvo la envolvente espectral de la señal resultante.
8. Se aplicó las transformaciones descritas en los pasos 5, 6 y 7 a las 20 señales de cada comando.
9. Se entrenó a una Red Neuronal Artificial por medio de Propagación hacia Atrás, con 10 patrones de los 20 descritos en el paso 8, para cada comando.

10. Se comprobó el funcionamiento de la red neural, proveyendo las 10 señales restantes a la red, y observando como las clasificó la misma.

## B. Resultados

En las Figuras 153 a 162, se pueden apreciar ejemplos de las acciones descritas en el diseño experimental, aplicadas a una de las veinte señales correspondientes a 3 parpadeos. En la Figura 163 se aprecia la imagen final de la interfaz gráfica desarrollada.

Figura 153. Señal en tiempo del lóbulo parietal realizando un parpadeo

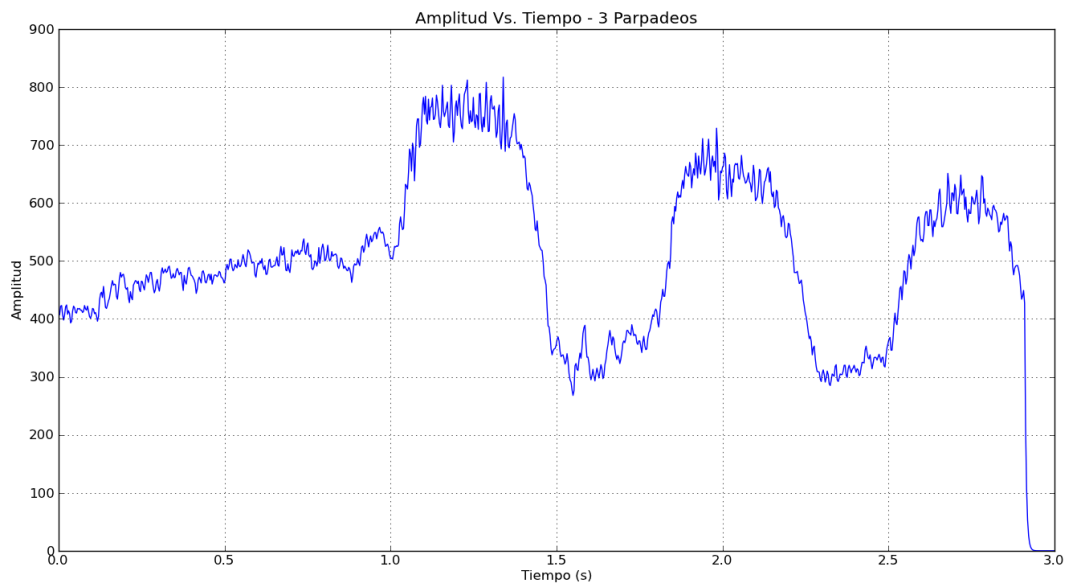
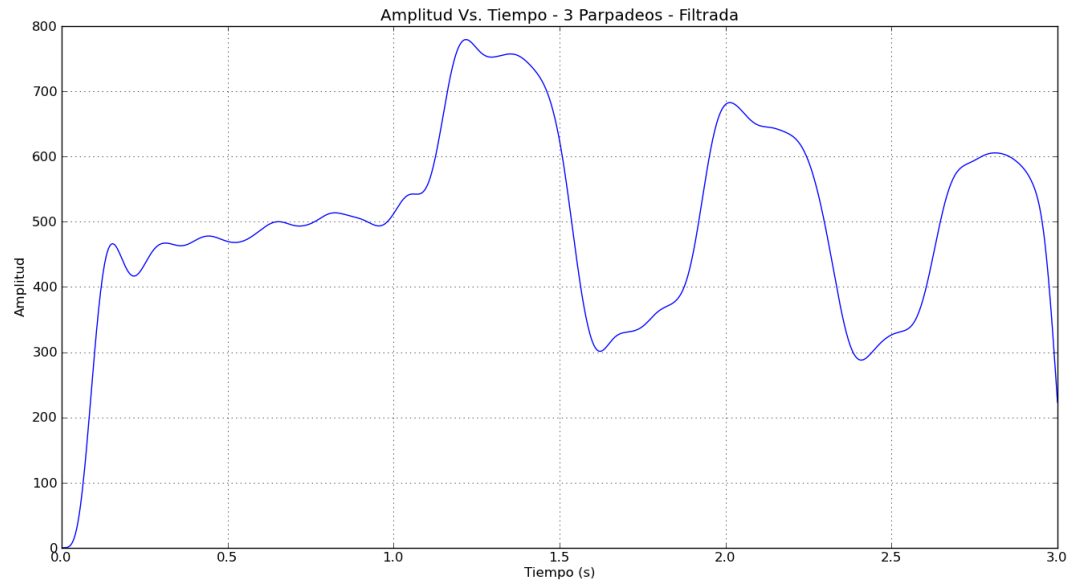


Figura 154. Señal en tiempo del lóbulo parietal realizando dos parpadeos aplicando filtrado digital



El filtrado digital pasa bajas con frecuencia de corte de 10 Hz llevó a cabo para eliminar los remanentes de ruido de 60 Hz inducido en las señales analizadas debido a las líneas de transmisión presentes en el ambiente, o demás equipo que se encontrara trabajando en el entorno. Estos filtros se implementaron utilizando el módulo Signal, de la librería de Python, Scipy [28].

Figura 155. Espectro de la señal mostrada en la Figura 154

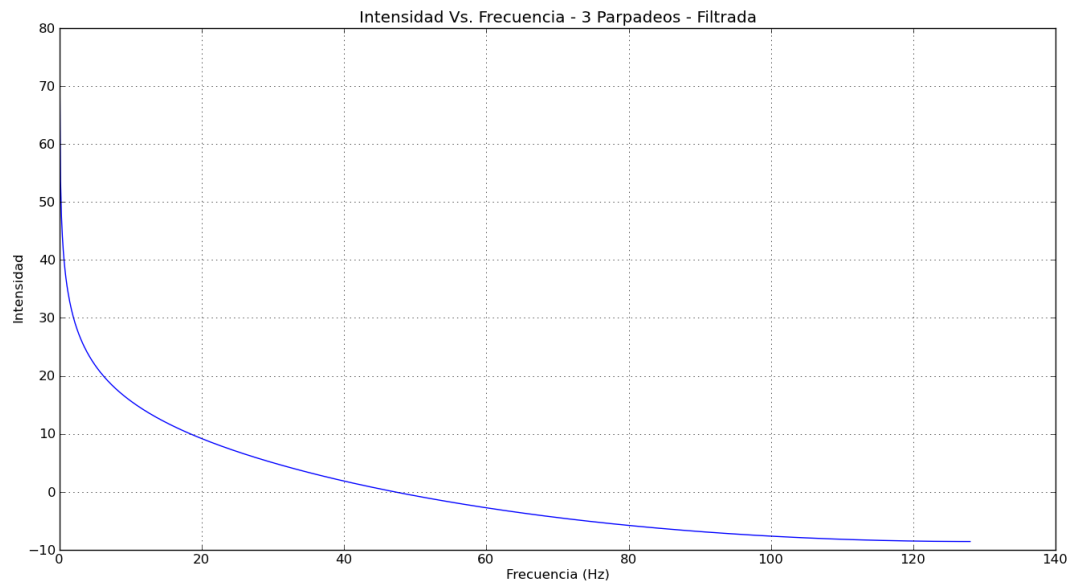


Figura 156. Concatenación de la señal muestreada

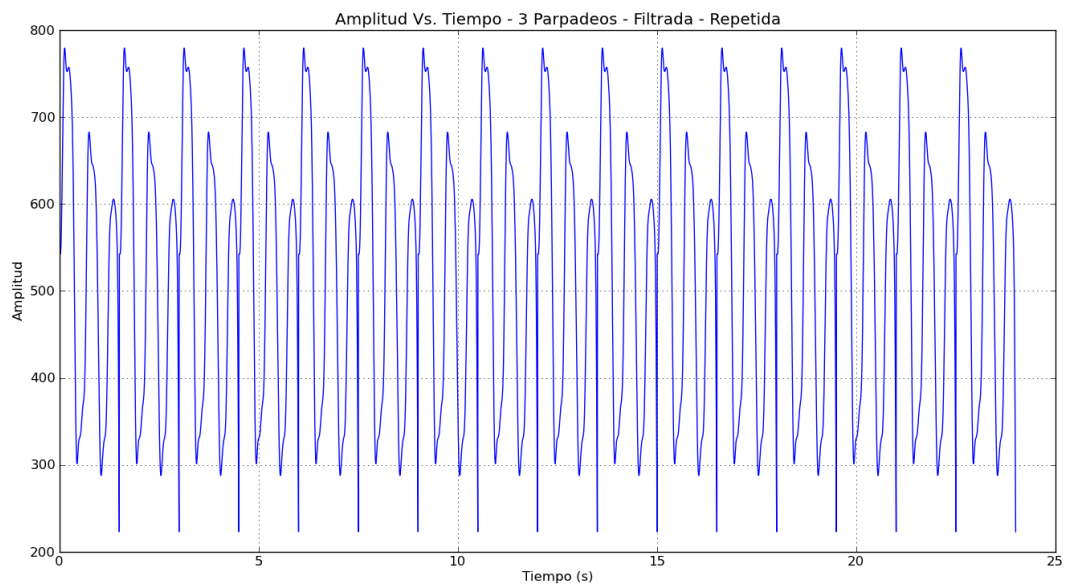


Figura 157. Tipo de señal con la que ya se trabajó en el desarrollo del sistema de procesamiento de señales

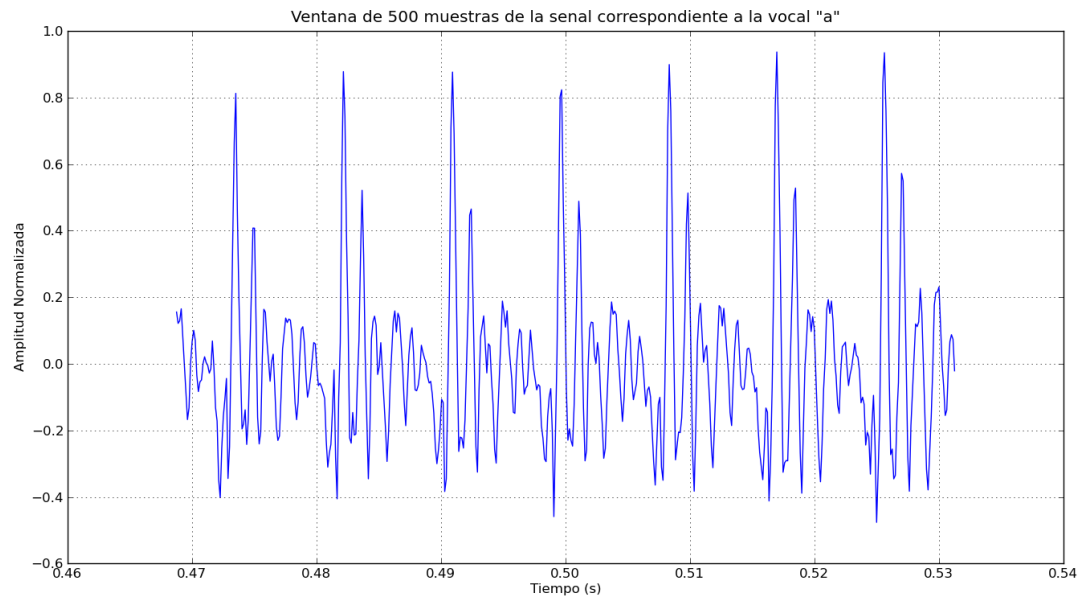


Figura 158. Envoltura frecuencial y espectro de una señal

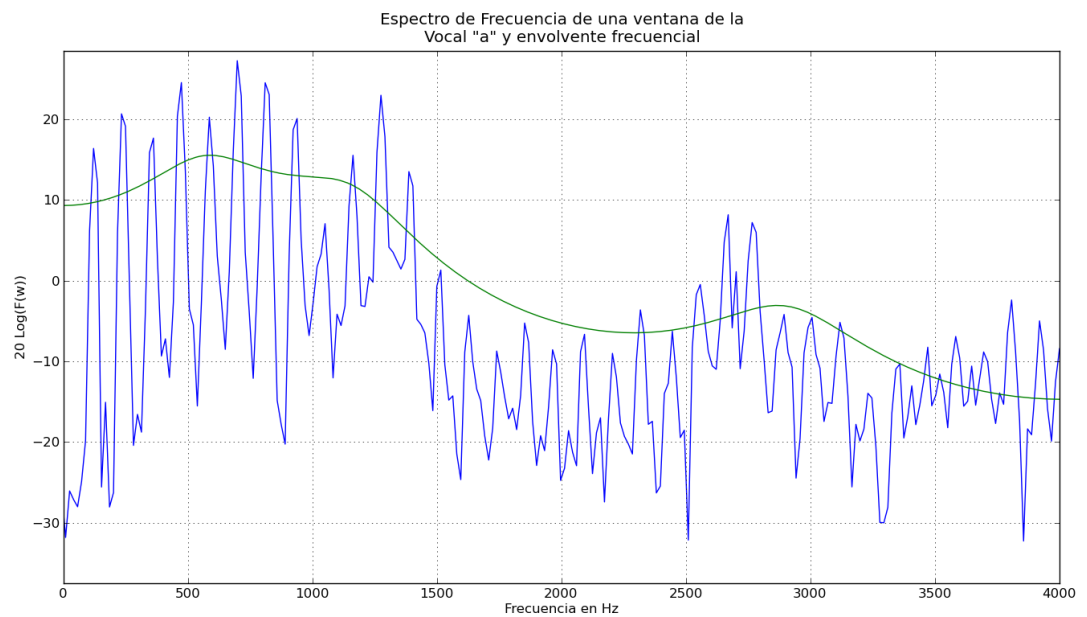


Figura 159. Concatenación de la señal correspondiente a 3 parpadeos

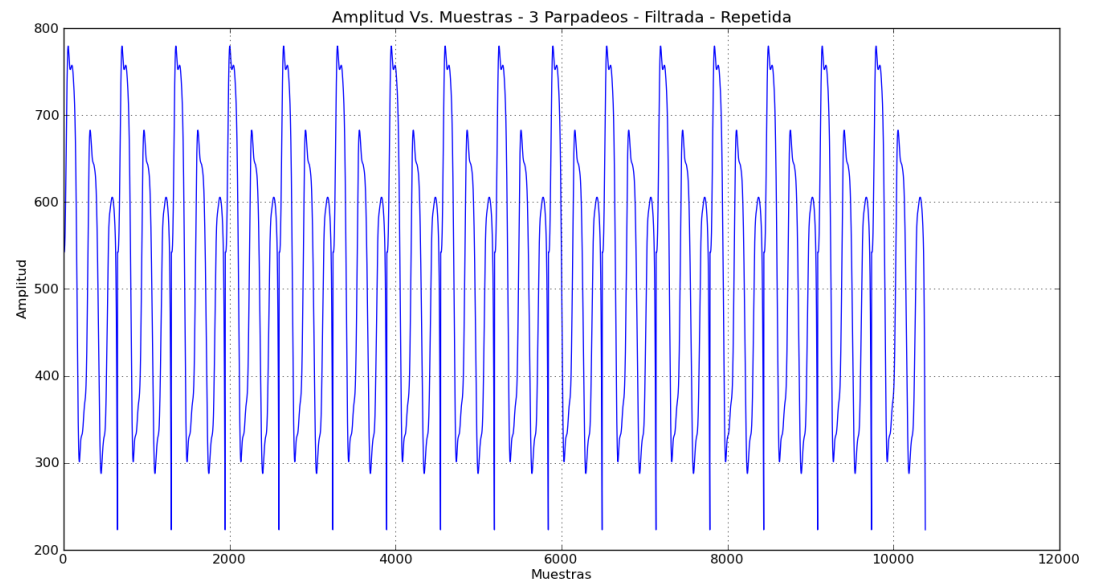


Figura 160. Señal de salida del método reductor de orden

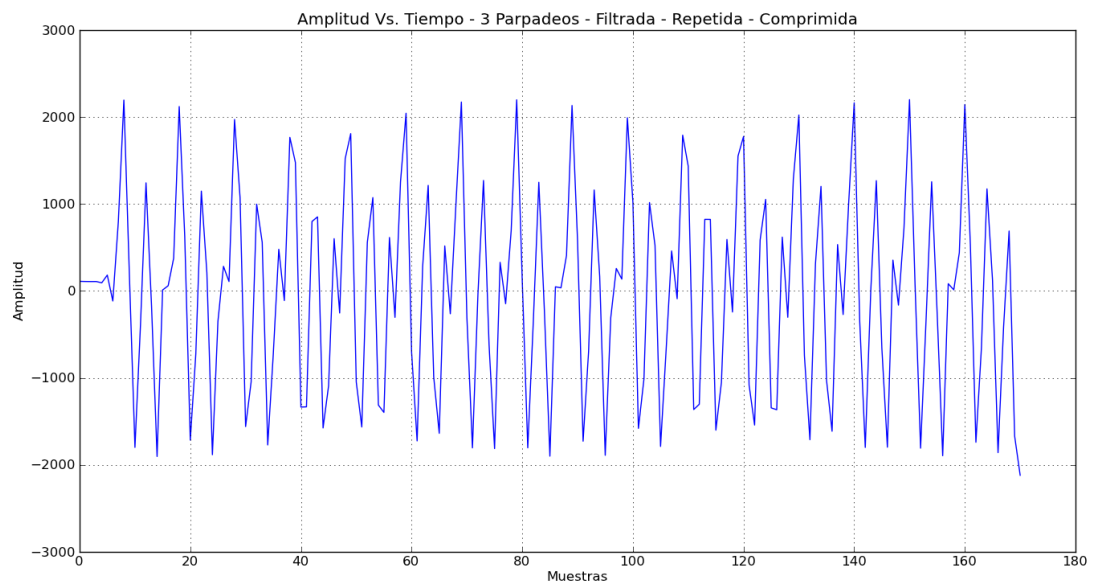


Figura 161. Señal correspondiente 1 parpadeo

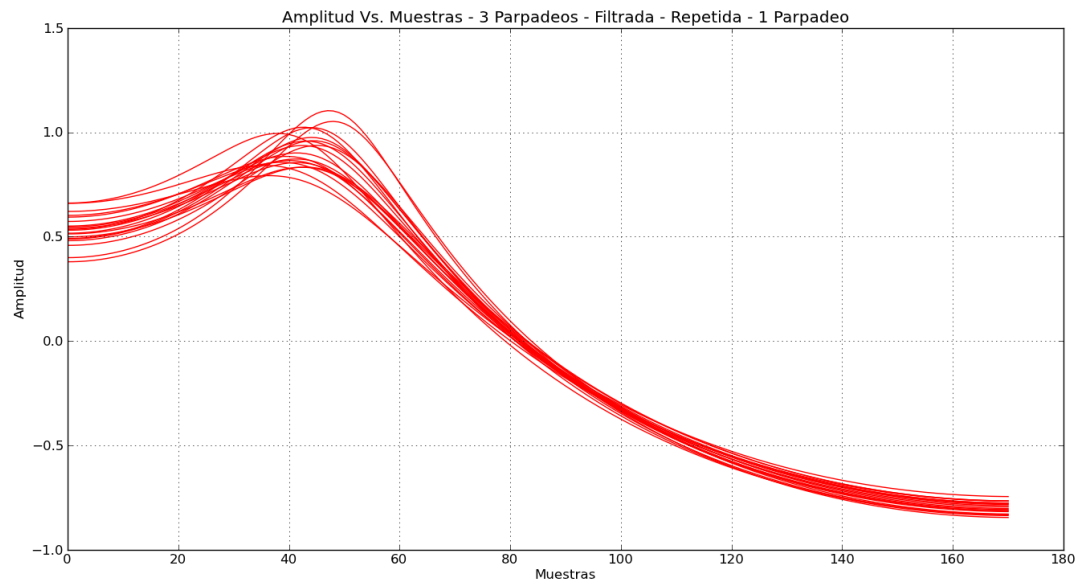


Figura 161. Señal correspondiente 2 parpadeos

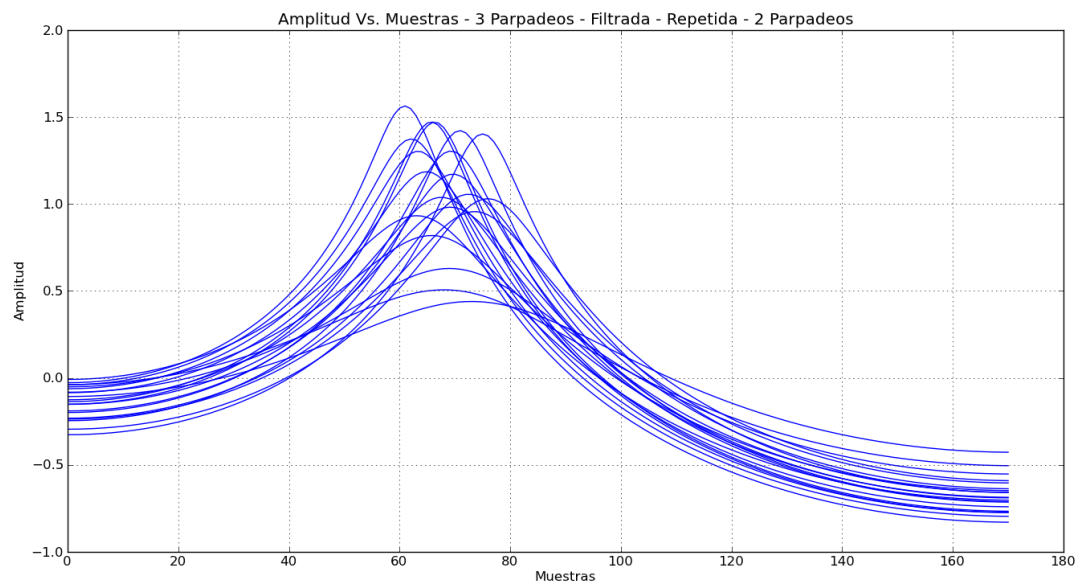


Figura 162. Señal correspondiente 3 parpadeos

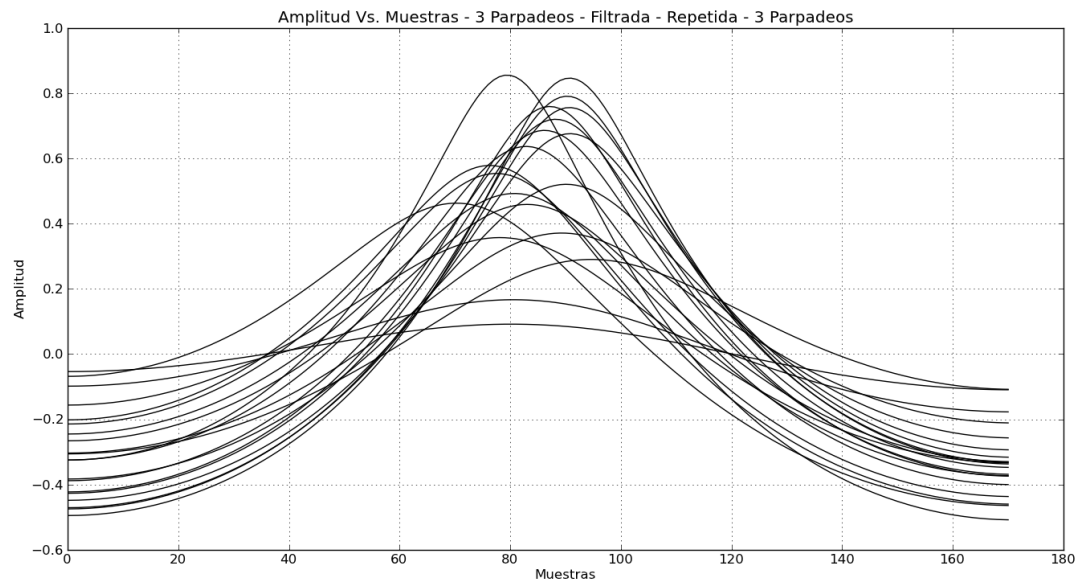


Figura 163. Señal correspondiente 4 parpadeos.

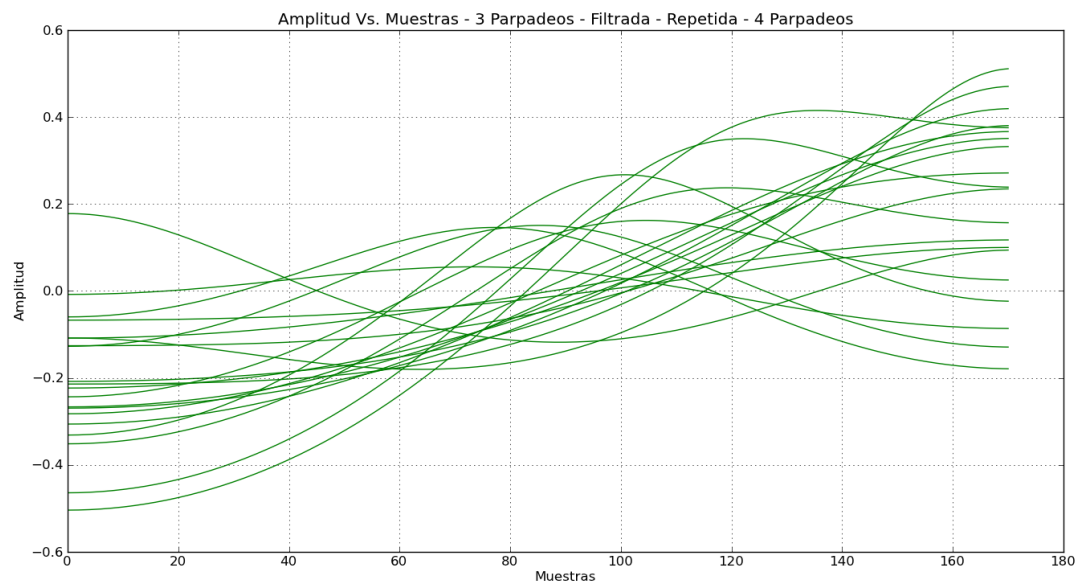


Tabla 78. Resultado de reconocer secuencias de parpadeos con los ojos

	1 parpadeo	2 parpadeos	3 parpadeos	4 parpadeos	% Éxito de Reconocimiento
1 parpadeo 11	x				100%
1 parpadeo 12	x				
1 parpadeo 13	x				
1 parpadeo 14	x				
1 parpadeo 15	x				
1 parpadeo 16	x				
1 parpadeo 17	x				
1 parpadeo 18	x				
1 parpadeo 19	x				
1 parpadeo 20	x				
2 parpadeos 11		x			100%
2 parpadeos 12		x			

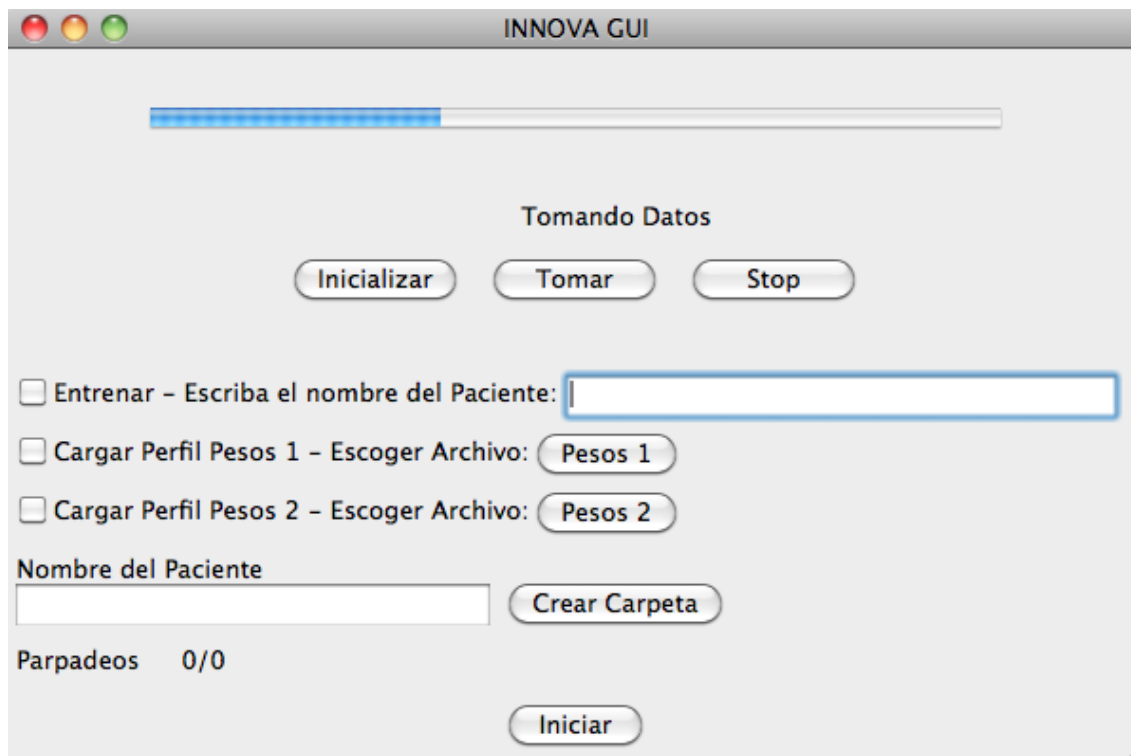
Continuación Tabla 78

	1 parpadeo	2 parpadeos	3 parpadeos	4 parpadeos	% Éxito de Reconocimiento	
2 parpadeos 13		x				
2 parpadeos 14		x				
2 parpadeos 15		x				
2 parpadeos 16		x				
2 parpadeos 17		x				
2 parpadeos 18		x				
2 parpadeos 19		x				
2 parpadeos 20		x				
3 parpadeos 11			x			80%
3 parpadeos 12			x			
3 parpadeos 13			x			
3 parpadeos 14		x				
3 parpadeos 15			x			

Continuación Tabla 78

	1 parpadeo	2 parpadeos	3 parpadeos	4 parpadeos	% Éxito de Reconocimiento
3 parpadeos 16			x		
3 parpadeos 17			x		
3 parpadeos 18			x		
3 parpadeos 19		x			
3 parpadeos 20			x		
4 parpadeos 11				x	90%
4 parpadeos 12				x	
4 parpadeos 13				x	
4 parpadeos 14				x	
4 parpadeos 15				x	
4 parpadeos 16				x	
4 parpadeos 17				x	
4 parpadeos 18				x	
4 parpadeos 19			x		
4 parpadeos 20				x	

Figura 164. Imagen de la ventana de la aplicación desarrollada



Puede apreciarse en la Figura 157 que la aplicación desarrollada tiene varias funciones. La barra que se encuentra en el extremo superior de la ventana, corresponde al avance que se ha tenido desde que se inició la captura actual. La ventana en tiempo tiene un ancho de 2.7 segundos. Esto se hizo con el fin que el usuario tuviese una referencia visual respecto al tiempo que le queda para realizar las acciones correspondientes a un comando. Debajo de esta barra de estado, se tiene un texto que le dice al usuario cuando se está detenido, cuando se está tomando datos o bien, cuando el programa se encuentra procesando la información. El botón de *Inicializar*, *Tomar* y *Stop*, sirven para entrenar a la red, o bien cargar un perfil de pesos, iniciar la captura de datos para luego procesarlos y clasificarlos o bien, detener esta última acción.

Al pulsar *Tomar*, se toman ventanas de 2.7 segundos, seguidas de un tiempo de procesamiento de la señal capturada. Luego de clasificar la señal

obtenida, el programa vuelve a tomar datos y se repite el ciclo hasta que el usuario pulse *Stop*.

Los tres checkbox, situados debajo de los botones de *Inicializar*, *Tomar* y *Stop*, son tomados en cuenta para decidir de que forma inicializar a la red neuronal. Siempre se procesan las señales guardadas en la carpeta cuyo nombre coincide con el texto ingresado en la casilla al lado del primer checkbox. Esto se hace para que se pueda cargar un perfil de pesos y aún así, seguir entrenando la red.

Si se escoge el primer checkbox, la red neuronal se entrenará a partir de pesos aleatorios, buscando aprender a identificar cada una de las categorías ya especificadas, que son, *Adelante*, *Atrás*, *Izquierda* y *Derecha*..

Si se desea cargar perfiles de pesos previamente guardados para la red neuronal, se deben escoger las casillas para cargar los dos archivos de pesos necesarios, además de pulsar los botones que se encuentran al lado de estas casillas para escoger los archivos de texto donde se encuentren guardados los pesos.

Los widgets de la parte inferior de la ventana son utilizados para que la aplicación funcione únicamente en el modo de capturar datos. En este modo, la aplicación toma señales del cerebro, y las va guardando crudas en una carpeta especificada en el texto de entrada. Antes de pulsar *Iniciar*, se debe escribir el nombre del paciente y luego, pulsar el botón de *Crear Carpeta* que se encuentra al lado de dicho texto de entrada.

Al pulsar *Iniciar*, se dirá al paciente por medio de los textos estáticos dispuestos sobre el botón de *Iniciar*, cuantos parpadeos debe hacer, y por que número de grabación de dicho comando se encuentra la aplicación.

La aplicación fue creada, utilizando la librería wxPython. [28]

### C. Discusión

Debido a que se contó con una frecuencia de muestreo relativamente baja, no se tuvo una resolución adecuada en frecuencias bajas al calcular la envolvente espectral de la señal. Se determinó que se tuvo que trasladar de alguna forma al espectro de frecuencias de las señales hacia frecuencias mayores, o bien, escalar las mismas para que ocupen una región mayor en el eje de frecuencia.

Para aumentar la densidad de muestras de la envolvente espectral, se periodizó la señal medida del cerebro, ya habiendo sido filtrada digitalmente, concatenándola 16 veces sobre si misma. Se concatenó esta cantidad de veces, pues ofreció buenos resultados al realizar las pruebas. Se obtuvo entonces, una señal muy similar a otra ya trabajada previamente, las señales grabadas correspondientes a vocales articuladas.

La desventaja es que se obtuvo una señal con 16,000 muestras, lo cual dificultaría el trabajo de la red neuronal, pues se tendría una cantidad muy grande de pesos, y el proceso de entrenamiento tardaría mas.

Además, se quiso aumentar la frecuencia de las señales obtenidas. Conceptualmente, aumentar la frecuencia a una señal, digitalmente, quiere decir que un tono, ocupará menos múltiplos del tiempo de muestreo de los que le tomaría realizar una oscilación a una frecuencia mas baja. Entonces se buscaría, comprimir la señal, para que ocupase menos tiempos de muestreo y así aparentara una frecuencia mayor.

Para lograr esto, distorsionando en lo mínimo posible a la señal original, se pensó en la transformada óndula o Wavelet, pues se observó durante las

pruebas realizadas que si la señal original no posee componentes frecuenciales altos, esta transformada funciona como una función de reducción de orden de un arreglo (Señal Digital).

Luego de realizar esta reducción de orden sucesivas veces, 6 veces, pues redujo al máximo la cantidad de muestras preservando las propiedades de la señal, se obtuvo un arreglo de 171 muestras, a partir de un arreglo de 16,000 muestras. De este arreglo se obtuvo la envolvente espectral y se pudo observar un patrón claro en tres de las cuatro señales disponibles. Aunque pareciera que la señal resultante a los patrones de 4 parpadeos no presente un patrón claro, se pudo observar que existe cierta tendencia en las mismas, además que al ser provistas a la red neuronal clasificadora para su entrenamiento, no se tuvo dificultades en el proceso.

En esta etapa del desarrollo, puede observarse como, cambiando la representación de una señal, las posibilidades de reconocerla pueden verse afectadas. En este punto se pudo observar que al suavizar las características de una señal, es posible lograr una tasa de reconocimiento mas alta que la usual.

Si la clasificación de las señales fuera un proceso estocástico aleatorio, la probabilidad de reconocer como uno de los 4 patrones a las señales analizadas, sería de 0.25, correspondiente a un 25%. Quiere decir que una de cada 4 patrones analizados, serían reconocidos como un comando en específico.

Los porcentajes de reconocimiento de las señales, fueron muy superiores al porcentaje posible por cuestiones de azar (25%), por lo que puede determinarse que el método propuesto, es un método robusto, que expone de forma adecuada las características que comparten algunas señales, y permite a

una herramienta de clasificación de patrones, en este caso una red neuronal, clasificar los patrones de forma adecuada.