



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA ELECTRÓNICA
MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA ELECTRÓNICA
OPCIÓN EN AUTOMATIZACIÓN

**“Desarrollo de un sistema mecatrónico para controlar una silla de
ruedas motorizada mediante diversos dispositivos por enlace
inalámbrico*”**

T E S I S

Presentada para obtener el título de:
Maestro en Ciencias de la Electrónica Opción en Automatización

Presenta:

Lic. Rigoberto Cerino Jiménez**

Directores:

Dr. Sergio Vergara Limon

Dr. David Eduardo Pinto Avendaño

Dra. Darnes Vilariño Ayala

Puebla, México

NOVIEMBRE 2017

* TRABAJO FINANCIADO POR PROYECTO BUAP, “INGENIERÍA DEL LENGUAJE Y DEL CONOCIMIENTO”

** BECARIO CONACYT

BUAP®

Agradecimientos

El plasmar un proyecto representa llevar una idea justificada al mundo físico y real que nos rodea, mediante un arduo trabajo que conlleva la participación o apoyo de más de una persona. Al llegar a la culminación de un trabajo que implica muchos retos y dificultades, como lo representa una tesis de maestría, me encuentro en la necesidad de expresar mis agradecimientos a las personas e instituciones que hicieron posible el logro de este trabajo.

Agradezco en primera instancia a Dios por permitirme la vida y la posibilidad de culminar un paso y meta más en ella, así como permitirme tener y disfrutar a mi familia.

A mi familia por siempre apoyarme en todas las decisiones tomadas, así como guiarme a través de mi crecimiento personal y profesional, por los consejos dados, por el amor incondicional hacia mi persona y por inculcar en mí los valores y la educación que poseo, cuyas herramientas me han servido y abierto muchas puertas, un eterno agradecimiento a mi familia de la cual me siento sumamente orgulloso.

A mis asesores de tesis, quienes me permitieron formar parte de su equipo de trabajo y depositar su confianza al asignarme el presente proyecto, en especial al Dr. Sergio Vergara Limon, a la Dra. Ma. Aurora Diozcora Vargas Treviño, al Dr. David Eduardo Pinto Avendaño y a la Dra. Darnes Vilariño Ayala quienes en conjunto estuvieron siempre apoyándome con las dudas y las problemáticas surgidas a través del desarrollo del proyecto. Agradezco al laboratorio de Ingeniería del Lenguaje y del Conocimiento por todo el apoyo otorgado hacia el proyecto, que gracias a éste fue posible concluirlo. .

Extiendo un agradecimiento especial a mis compañeros y amigos de la maestría, a Francisco José López Cortés, a José de Jesús Moya Mora, a Daniel Eduardo Hernández Sánchez, a Fernando Herrera Arroyo, a Raúl Olmedo Viveros y a Giovanni Zepeda Arce, quienes sin su apoyo y solidaridad en el aspecto intelectual y personal, este trabajo no hubiera sido posible.

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico para cubrir los gastos necesarios de manutención en este lapso. Agradezco asimismo a Vicerrectoría de Investigación y Estudios de Posgrado (VIEP) por el apoyo brindado a lo largo del desarrollo de la tesis.

Finalmente agradezco a mi alma mater, la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla por acogerme como alumno y permitirme crecer personal y profesionalmente, así como a la Maestría en Ciencias de la Electrónica opción en Automatización, la cual me permitió obtener un grado más, llenándome de retos y de conocimientos que me demostraron tener la capacidad de resolver las problemáticas presentadas a lo largo de la maestría.

Dedicatoria

A mis padres

Dedico esta tesis a Efraín Cerino López y Esperanza de Jesús Jiménez Cantoral, quienes siempre han estado para mí, permitiéndome sus consejos, su confianza, su amor y su apoyo ante cualquier circunstancia, que sin su guía no podría haber crecido como persona, quienes entregan todo sin pedir nada a cambio y me permiten crecer con humildad.

A mis hermanos

Erick Cerino Jiménez y Eduardo Efraín Cerino Jiménez, quienes han sido un ejemplo y un complemento de vida para mí, y que sin su compañía y apoyo no me permitiría vivir con plenitud.

Resumen

En el presente documento de tesis se plasma el proceso de desarrollo para instrumentar una silla de ruedas motorizada (SRM) que permita su control inalámbrico a través de diversos dispositivos mediante el protocolo de comunicación Bluetooth, así como su control manual a través de un joystick analógico. Se presenta el proceso realizado para el ensamble mecánico de la silla; el sistema de dirección mecánica está basado en una configuración diferencial ligada a una transmisión de cadena-piñón, con el objetivo de que ambas ruedas proporcionen tracción y direccionamiento, permitiendo así una mayor maniobrabilidad en escenarios pequeños. Se desarrolla la cinemática directa del robot para conocer el punto en el que la silla de ruedas se encuentra en el espacio; mediante la metodología de Euler-Lagrange se obtiene la dinámica del sistema y se toman en cuenta las restricciones de movimiento no holonómicas, para propósitos del estudio de un sistema de control y con fines de simulación y requerimientos físicos de los motores de tracción, lo que conlleva a la elección de las baterías de alimentación. Se realizan el diseño e instrumentación electrónica de la etapa de potencia necesaria para el movimiento del mecanismo, la cual utiliza MOSFET debido al alto consumo de corriente que generan los motores. Para el sistema de control se desarrolla una aplicación móvil que trabaja en el sistema operativo Android, la cual permitirá el control de la SRM de manera inalámbrica; se implementa un brazalete inalámbrico el cual detecta señales electromiográficas (EMG) que generan los músculos al realizar un movimiento de nuestro brazo, y como dispositivo de control final se implementa un control manual mediante un joystick. Se diseña una tarjeta de control y adquisición de datos que permita la adecuación y procesamiento de las señales recibidas por los dispositivos de control, así como la asociación que tendrán dichas señales con los actuadores del sistema, que se reflejará en el movimiento de la SRM. La tarjeta de control está basada en un microcontrolador ATmega328p, el cual procesará la información y la enviará a elementos moduladores de PWM, que permitirá definir la dirección y la velocidad de la SRM. El firmware que se desarrolla para la comunicación inalámbrica es universal debido a que cuenta con un protocolo propio para la traducción de señales en movimientos específicos de la silla. Como resultado final se tiene un sistema mecatrónico robusto capaz de ser controlado por cualquier dispositivo con comunicación bluetooth que cumpla con los parámetros de comunicación, un sistema que permite el estudio de algoritmos de control basándose en su modelo dinámico y un sistema que contribuye a la integración de personas con discapacidad a una vida cotidiana con un mayor número de actividades.

Índice

| | |
|--|----|
| Introducción..... | 2 |
| La silla de ruedas motorizada | 7 |
| Silla de ruedas robótica SENA..... | 8 |
| Dispositivo detector de colisión para silla de ruedas eléctrica omnidireccional..... | 9 |
| Diseño de asistente de movilidad de la silla de ruedas robótica inteligente | 10 |
| Tipos de sillas de ruedas motorizadas..... | 11 |
| SRM de tracción electromotriz con correa de transmisión | 12 |
| SRM con sistemas de base modulares motorizados..... | 12 |
| SRM de tracción eléctrica plegable / portátil | 13 |
| Unidades de propulsión adosables | 14 |
| Triciclos (scooters)/ tetraciclos | 14 |
| Objetivos..... | 18 |
| Objetivo General: | 18 |
| Objetivos específicos: | 18 |
| Capítulo 1 | 19 |
| 1 Características de la silla de ruedas..... | 19 |
| 1.1 Diagrama a bloques del sistema mecatrónico..... | 21 |
| 1.2 Diagrama de los subsistemas de la SRM..... | 22 |
| 1.3 Conclusiones | 23 |
| Capítulo 2 | 24 |
| 2 Diseño y construcción del sistema mecánico de la silla de ruedas | 24 |
| 2.1 Base mecánica o chasis..... | 27 |
| 2.1 Accesorios complementarios de la SRM..... | 34 |
| 2.1.1 La silla o módulo de asiento..... | 34 |
| 2.1.2 Las ruedas..... | 35 |
| 2.1.3 Soporte del joystick | 36 |

| | | |
|------------|---|----|
| 2.1.4 | Reposapiés | 38 |
| 2.1.5 | Sensor de obstáculos..... | 40 |
| 2.2 | El sistema electromecánico..... | 41 |
| 2.2.1 | Motores..... | 41 |
| 2.2.2 | Reductor | 42 |
| 2.2.3 | Baterías | 43 |
| 2.3 | Conclusiones | 44 |
| Capítulo 3 | | 45 |
| 3 | Modelado del robot móvil diferencial (RMD) | 45 |
| 3.1 | Cinemática | 46 |
| 3.2 | Cinemática directa | 46 |
| 3.2.1 | Matrices de rotación | 47 |
| 3.2.2 | Matriz de rotación alrededor del eje Z0 | 47 |
| 3.3 | Análisis del modelo cinemático..... | 48 |
| 3.3.1 | Restricciones cinemáticas de un robot móvil diferencial | 50 |
| 3.4 | Modelo de la cinemática directa del RMD | 52 |
| 3.5 | Teoría y ecuaciones de Lagrange para sistemas no holonómicos..... | 53 |
| 3.6 | Modelo dinámico del robot móvil diferencial | 55 |
| 3.7 | Control proporcional-derivativo (PD) y ecuación en lazo cerrado del sistema | 60 |
| 3.8 | Simulaciones | 60 |
| 3.8.1 | Cinemática directa del RMD | 60 |
| 3.8.2 | Dinámica del RMD..... | 62 |
| 3.9 | Conclusiones | 64 |
| Capítulo 4 | | 66 |
| 4 | Instrumentación electrónica de la silla de ruedas..... | 66 |
| 4.1 | Tarjeta de adquisición de datos y control | 68 |
| 4.1.1 | Etapas de alimentación y regulación de voltaje | 68 |
| 4.1.2 | Microcontrolador | 69 |
| 4.1.3 | Módulos bluetooth..... | 70 |
| 4.1.4 | Módulo para comunicación con joystick..... | 72 |

| | | |
|--------------|---|-----|
| 4.1.5 | Módulo para comunicación con sensores de distancia..... | 72 |
| 4.2 | Etapa de potencia..... | 75 |
| 4.3 | Sistema de control de velocidad de lazo abierto..... | 78 |
| 4.4 | Control del sistema mediante joystick..... | 79 |
| 4.4.1 | Etapa de conversión y acoplamiento de señales..... | 80 |
| 4.4.2 | Etapa de procesamiento..... | 83 |
| 4.5 | Control del sistema mediante la aplicación móvil..... | 86 |
| 4.5.1 | La interfaz y diseño de la aplicación..... | 87 |
| 4.5.2 | Etapa de procesamiento de señales..... | 96 |
| 4.6 | Control del sistema mediante brazaletes de lecturas EMG..... | 99 |
| 4.6.1 | Etapa de adquisición de señales..... | 100 |
| 4.6.2 | Etapa de procesamiento de señales..... | 101 |
| 4.7 | Sistema de detección de obstáculos..... | 104 |
| 4.8 | Conclusiones..... | 105 |
| Capítulo 5 | | 106 |
| 5 | Resultados experimentales..... | 106 |
| 5.1 | Conclusiones..... | 120 |
| Capítulo 6 | | 121 |
| Conclusiones | | 121 |
| Apéndices | | 124 |
| Apéndice A | publicaciones..... | 124 |
| Apéndice B | Constancias..... | 128 |
| B.1. | Certificación TOEFL..... | 130 |
| Apéndice C | Medidas del diseño mecánico..... | 131 |
| Apéndice D | Firmware..... | 133 |
| D.1. | Firmware principal..... | 133 |
| D.2. | Firmware para la adquisición de las señales enviadas por la aplicación móvil. . | 138 |
| D.3. | Firmware para entablar comunicación con el brazaletes Myo..... | 139 |
| D.4. | Firmware para la lectura de sensores de distancia..... | 142 |
| Bibliografía | | 144 |

Índice de figuras

| | |
|--|----|
| Figura 0.1. Primer silla de ruedas documentada. Elaborada para el Rey Felipe II..... | 4 |
| Figura 0.2. Silla de ruedas de Stephen Farfler..... | 4 |
| Figura 0.3. Silla de ruedas "Bath". | 5 |
| Figura 0.4. Una de las primeras sillas de ruedas motorizada, década de los 50, "E&J". | 5 |
| Figura 0.5. Silla de ruedas Motorette. | 6 |
| Figura 0.6. Silla de Everest & Jennings, silla de ruedas plegable. | 7 |
| Figura 0.7. Silla de ruedas robótica SENA..... | 9 |
| Figura 0.8. Prototipo de silla omnidireccional. | 10 |
| Figura 0.9. Dispositivo detector de colisión. | 10 |
| Figura 0.10. Prototipo de silla iRW..... | 11 |
| Figura 1.1. Diagrama a bloques general de la SRM..... | 21 |
| Figura 1.2: Diagrama de los subsistemas que componen a la SRM para los objetivos específicos del sistema presentado. | 23 |
| Figura 2.1. Representación de la SRM realizada en SOLIDWORKS. | 25 |
| Figura 2.2. Vista explosionada y subconjuntos que conforman a la estructura mecánica de la SRM..... | 26 |
| Figura 2.3. Diseño del chasis mecánico para la SRM. | 27 |
| Figura 2.4. Diagrama explosionado y elementos que componen al chasis de la SRM. | 28 |
| Figura 2.5. Sistema de tracción trasera en configuración diferencial, con sistema de chumaceras para transmitir el peso del usuario hacia la estructura. | 29 |
| Figura 2.6. Elementos del sistema de transmisión por cadena-piñón de la SRM. | 30 |
| Figura 2.7. Paso de una cadena de transmisión. | 30 |
| Figura 2.8: Transmisión por cadena-piñón..... | 30 |
| Figura 2.9. Transmisión por cadena-piñón. a) Vista posterior; b) vista isométrica. | 31 |
| Figura 2.10. Sistema de soporte y alineación mediante 4 chumaceras. Permite transmitir la carga de la SRM a las ruedas y a la estructura, así como mantener los ejes de giro concéntricos..... | 31 |
| Figura 2.11. Chasis mecánico de la SRM. Se realiza una distribución de los componentes de manera que el peso esté cargado hacia la parte frontal del mecanismo. | 32 |
| Figura 2.12. Chasis de la SRM con una distribución de peso orientada a la parte frontal del mecanismo..... | 33 |

| | |
|---|----|
| Figura 2.13. Estimación del centro de masa del chasis de la SRM obtenida en el software SOLIDWORKS. a) Vista isométrica. b) Vista superior. | 33 |
| Figura 2.14. Representación del asiento deportivo de automóvil diseñado en SOLIDWORKS. | 35 |
| Figura 2.15. Representación de rueda de caucho diseñada en SOLIDWORKS. | 36 |
| Figura 2.16. Diseño de la rueda de castor delantera para soporte y distribución del peso de la SRM. a) Vista izquierda. b) Vista isométrica. | 36 |
| Figura 2.17. Diseño de soporte para montar el joystick de la SRM. | 37 |
| Figura 2.18. Diseño de caja que permite el ensamble del joystick hacia la estructura de aluminio. | 37 |
| Figura 2.19. Diseño de la estructura para soportar y fijar el joystick. a) Ensamble de caja con joystick. b) Ensamble completo del joystick con la base metálica. | 38 |
| Figura 2.20. Vista explosionada del mecanismo para el reposapiés de la SRM. | 39 |
| Figura 2.21. Diseño del mecanismo para soportar el reposapiés. a) Mecanismo que simula el movimiento de una bisagra. b) Reposapiés ensamblado al mecanismo. | 39 |
| Figura 2.22. Ángulos de movimiento del reposapiés. | 39 |
| Figura 2.23. Diseño de la carcasa para sujeción del sensor y fijación a la estructura. a) Caja para almacenar el sensor ultrasónico. b) Tapa de protección. | 40 |
| Figura 2.24. Ensamble de la carcasa de protección con el sensor ultrasónico. | 40 |
| Figura 2.25. Diseño final del ensamble de la SRM. | 41 |
| Figura 2.26. Motorreductor Z5D120-12GU/5GU9KB. | 42 |
| Figura 2.27. Batería Power Sonic 12 V, 35 AH. | 44 |
| Figura 3.1. Rotación alrededor del eje z. | 47 |
| Figura 3.2. Coordenadas de la postura del robot móvil. Se denota el sistema coordinado inercial por O, y el sistema coordinado del robot con A. | 49 |
| Figura 3.3. Restricción de rodamiento puro. Cada rueda mantiene un solo punto de contacto “P” con la superficie. | 51 |
| Figura 3.4. Cinemática directa de un RMD simulada con bloques de Simulink para graficar la posición del mecanismo en el espacio bidimensional. | 61 |
| Figura 3.5. Gráfica obtenida al simular la cinemática directa del RMD en Simulink. Se aplican velocidades iguales en ambas ruedas y una orientación inicial. | 61 |
| Figura 3.6. Velocidad positiva en una rueda y cero en la otra, con $\theta_0 = 0$ | 62 |
| Figura 3.7. Modelo dinámico de un RMD, realizado en Simulink para graficar la trayectoria y observar el comportamiento del robot al variar los pares aplicados a cada motor. | 63 |
| Figura 3.8. Trayectorias obtenidas al graficar la dinámica del RMD. a) $\tau_R = 3Nm$, $\tau_L = -3Nm$; b) $\tau_R = 3Nm$, $\tau_L = \tau_R / 2$ | 63 |
| Figura 3.9. Trayectorias obtenidas al graficar la dinámica del RMD. a) $\tau_R = 3Nm$, $\tau_L = 0Nm$; b) $\tau_R = 3Nm$, $\tau_L = 3Nm$ | 64 |

| | |
|---|----|
| Figura 4.1. Diagrama a bloques del sistema electrónico de la SRM..... | 66 |
| Figura 4.2. Diagrama electrónico de la SRM. | 67 |
| Figura 4.3. Módulo regulador DC-DC conmutado LM2569..... | 69 |
| Figura 4.4. Diagrama de conexión para el módulo LM2569..... | 69 |
| Figura 4.5. Diagrama de conexión para el microcontrolador ATmega328P..... | 70 |
| Figura 4.6. Módulos de comunicación Bluetooth. a) Módulo BLE 4.0 HM-10. b) Módulo HC-05. | 71 |
| Figura 4.7. Diagrama de conexión para los módulos Bluetooth. | 71 |
| Figura 4.8. Diagrama de conexión del joystick con la tarjeta de control. | 72 |
| Figura 4.9. Sensor ultrasónico HC-SR04 para detección de objetos que obstruyan la trayectoria de la SRM. | 72 |
| Figura 4.10. Cálculo de distancia detectada por el sensor ultrasónico con base en el tiempo de respuesta de la señal que rebota. | 73 |
| Figura 4.11. Diagrama de conexión entre los sensores ultrasónicos y la tarjeta de control. | 73 |
| Figura 4.12. Diseño final de la tarjeta de control para la SRM. | 74 |
| Figura 4.13. Tarjeta de adquisición de datos y de control instrumentada. | 75 |
| Figura 4.14. Diagrama de la estructura interna del controlador TC4469. | 75 |
| Figura 4.15: Rama izquierda de un puente H diseñado con MOFET. | 76 |
| Figura 4.16. Circuito Totem-pole para acelerar el tiempo de apagado de un MOSFET..... | 76 |
| Figura 4.17. Diagrama electrónico de un puente H diseñado con MOSFET para drenar corrientes de 40 Amperios y controlar un motor CD de 12 V..... | 77 |
| Figura 4.18. Tarjeta de potencia instrumentada con MOSFET..... | 78 |
| Figura 4.19. Sistema de control de y potencia para controlar la SRM. | 78 |
| Figura 4.20. Diagrama a bloques del sistema de control de velocidad en lazo abierto..... | 79 |
| Figura 4.21. Joystick JH-D300X-R2 de 3 ejes basado en potenciómetros..... | 80 |
| Figura 4.22. Rango de movimiento del joystick para los ejes X y Y. | 81 |
| Figura 4.23. Diagrama de flujo del cálculo del ancho de pulso en función del joystick para mover las ruedas de la SRM. | 86 |
| Figura 4.24. Representación visual o boceto de la aplicación para controlar la SRM. | 89 |
| Figura 4.25. Representación visual de la lista de dispositivos disponibles para la comunicación..... | 90 |
| Figura 4.26. Bloque para preparar la lista de dispositivos bluetooth disponibles. | 90 |
| Figura 4.27. Bloque para activar el reloj de la aplicación y para alertar al usuario que tuvo una conexión exitosa. | 90 |
| Figura 4.28. Envío de caracteres del botón “GoForward” a la tarjeta de control para su procesamiento. | 91 |
| Figura 4.29. Envío de caracteres de los botones de dirección y paro a la tarjeta de control..... | 91 |
| Figura 4.30: Bloques destinados al trazado de circunferencias para estética del joystick. .. | 92 |
| Figura 4.31. Declaración de variables globales para movimiento del joystick, | 93 |

| | |
|---|-----|
| Figura 4.32. Mapeo de variables que representan las coordenadas de movimiento del joystick. | 93 |
| Figura 4.33. Bloques para generar las coordenadas del movimiento del joystick..... | 94 |
| Figura 4.34: Bloques para simular el retorno de resorte del joystick virtual..... | 94 |
| Figura 4.35. Bloques para resetear la interfaz de la aplicación al abrirse por primera vez.. | 95 |
| Figura 4.36: Bloques para resetear el sistema. | 95 |
| Figura 4.37. Envío de datos de coordenadas del joystick a la tarjeta de control..... | 96 |
| Figura 4.38: Bloques para desconectar el bluetooth y finalizar la transmisión de datos..... | 96 |
| Figura 4.39: Diagrama de flujo para la adquisición de datos enviados por la aplicación. ... | 98 |
| Figura 4.40. Brazaletes Myo. | 99 |
| Figura 4.41. Detección de movimientos musculares con el brazaletes Myo. | 99 |
| Figura 4.42. Conexión directa entre el brazaletes Myo y una tarjeta Arduino a través de un módulo BLE HM-10..... | 101 |
| Figura 4.43. Representación del movimiento de cerrar mano. | 101 |
| Figura 4.44. Representación del movimiento de abrir mano..... | 101 |
| Figura 4.45. Representación del movimiento de aducción..... | 102 |
| Figura 4.46. Representación del movimiento de abducción..... | 102 |
| Figura 4.47 Representación del movimiento chocar dedos..... | 102 |
| Figura 4.48. Diagrama de flujo del algoritmo para configurar los moduladores PWM en función de los movimientos del brazo..... | 103 |
| Figura 4.49. Diagrama de flujo de la recepción y procesamiento de datos del sensor ultrasónico. | 104 |
| Figura 5.1. Voltaje medido en el inductor sin una red snubber..... | 107 |
| Figura 5.2. Diagrama de una red snubber para amortiguar picos de regreso de voltaje..... | 107 |
| Figura 5.3. Voltaje medido en el inductor con una red snubber. a) $R=0.22$ ohms y $C=10$ uF. b) $R=0.22$ ohms y $C=12$ uF. | 107 |
| Figura 5.4: Voltaje medido en el inductor con una red snubber. a) $R=0.22$ ohms y $C=12$ uF. b) $R=0.22$ ohms y $C=15$ uF. | 108 |
| Figura 5.5. Red snubber para protección de los motores de la SRM. $R=0.22$ ohms y 10 W, $C=25$ uF a 250 V. | 108 |
| Figura 5.6. Voltaje medido en el inductor con una red snubber de $R=0.22$ ohms y 10 W, $C=25$ uF a 250 V. a) PWM=15%. b) PWM=45%..... | 108 |
| Figura 5.7. Voltaje medido en el inductor con una red snubber de $R=0.22$ ohms y 10 W, $C=25$ uF a 250 V. a) PWM=80%. b) PWM=90%..... | 109 |
| Figura 5.8. Impulso generado en el PWM para romper el reposo de la SRM cuando avanza. | 110 |
| Figura 5.9. Impulso generado en el PWM para romper el reposo de la SRM cuando retrocede. | 110 |

| | |
|--|-----|
| Figura 5.10. Direcciones que la SRM sigue, así como valores de PWM en cada rueda con respecto a los movimientos del joystick. a) Movimiento hacia adelante del joystick. b) Movimiento hacia atrás del joystick..... | 111 |
| Figura 5.11: Direcciones que la SRM sigue, así como valores de PWM en cada rueda con respecto a los movimientos del joystick. a) Rotación del eje Z del joystick hacia la izquierda. b) Rotación del eje Z del joystick hacia la derecha. | 111 |
| Figura 5.12. Aplicación para controlar la SRM desarrollada para el Sistema Operativo Android..... | 112 |
| Figura 5.13. Detección de teclas presionadas por el usuario en la aplicación y asignación de valores de PWM conforme al movimiento que realizará la SRM. a) Detección del botón de avance. b) Detección del botón de retroceso. | 113 |
| Figura 5.14: Detección de teclas presionadas por el usuario en la aplicación y asignación de valores de PWM conforme al movimiento que realizará la SRM. a) Detección del botón izquierdo. b) Detección del botón de paro, c) Detección del botón derecho..... | 113 |
| Figura 5.15. Control de la SRM a través del joystick virtual de la aplicación desarrollada. a) Movimiento del joystick a las coordenadas (25, 54). b) Procesamiento de las coordenadas recibidas y conversión a PWM en cada una de las ruedas. | 114 |
| Figura 5.16. Control de la SRM a través del joystick virtual de la aplicación desarrollada. a) Movimiento del joystick a las coordenadas (144, 91). b) Procesamiento de las coordenadas recibidas y conversión a PWM en cada una de las ruedas. | 114 |
| Figura 5.17. Reconocimiento del brazalete Myo por la tarjeta de adquisición de datos. | 115 |
| Figura 5.18. Reconocimiento del movimiento de Abducción. | 116 |
| Figura 5.19. Reconocimiento de un movimiento de Aducción. | 116 |
| Figura 5.20. Reconocimiento de un movimiento de cerrar mano. | 117 |
| Figura 5.21. Reconocimiento de un movimiento de Doble toque. | 117 |
| Figura 5.22. Reconocimiento de un movimiento de Extender dedos..... | 118 |
| Figura 5.23. Lecturas alternadas del brazalete Myo con un mismo movimiento, el de “Extender dedos”..... | 118 |
| Figura 5.24. Valores obtenidos en 4 sensores EMG del brazalete Myo al realizar un movimiento de “Aducción” en la mano con un tiempo de muestreo de 5 ms..... | 119 |
| Figura 5.25. Valores obtenidos en 4 sensores EMG del brazalete Myo al realizar un movimiento de “Cerrar mano” en la mano con un tiempo de muestreo de 5 ms. | 119 |

Índice de tablas

| | |
|---|----|
| Tabla 0.1. Variedades de sillas de ruedas motorizadas. | 12 |
| Tabla 1.1: Distribución aproximada del peso de la silla de ruedas motorizada. | 20 |
| Tabla 2.1. Características principales de los neumáticos de tracción para la SRM. | 35 |
| Tabla 2.2. Parámetros de rendimiento de motor CD Z5D120-12. | 42 |
| Tabla 2.3. Parámetros mecánicos del reductor 5GU9KB. | 42 |
| Tabla 4.1. Características principales de la tarjeta de control. | 68 |
| Tabla 4.2. Características principales del microcontrolador ATmega328P | 69 |
| Tabla 4.3. Características principales del sensor HC-SCR04. | 73 |
| Tabla 4.4. Descripción de los elementos que conforman la tarjeta de control y de adquisición de datos. | 74 |
| Tabla 4.5. Tabla de verdad de la combinación de entradas al controlador. | 77 |
| Tabla 4.6. Rangos de voltaje del joystick en el eje X y asignación de valores según el DAC. | 81 |
| Tabla 4.7. Rangos de voltaje del joystick en el eje Y y asignación de valores según el DAC. | 81 |
| Tabla 4.8. Rangos de voltaje del joystick en el eje X y asignación de valores según el DAC. | 82 |

Introducción

De acuerdo con la Clasificación Internacional del Funcionamiento, de la Discapacidad y de la Salud, presentada en 2001, las personas con discapacidad “son aquellas que tienen una o más deficiencias físicas, mentales, intelectuales o sensoriales y que al interactuar con distintos ambientes del entorno social pueden impedir su participación plena y efectiva en igualdad de condiciones a las demás” [1].

El tema de la discapacidad ha cobrado un significativo incremento de atención por parte de los profesionales y la sociedad en su conjunto en los últimos años. La problemática, dificultades y barreras que enfrentan las personas con discapacidad han sido expuestas y analizadas públicamente y cada vez son más las personas, instituciones y asociaciones que se incorporan a la tarea de mejorar las condiciones de vida y bienestar personal de este grupo poblacional [2].

En la actualidad es evidente la necesidad que presentan las personas con discapacidad ante el uso de sistemas de desplazamiento que les permitan realizar un mayor número de actividades dentro de su vida cotidiana.

Para muchas personas con discapacidad, la silla de ruedas (SR) es el medio que les permite acercarse y relacionarse con el entorno, ayudándolos tanto física como moralmente.

La silla de ruedas debe responder a las características específicas de cada paciente, de acuerdo a su discapacidad y las necesidades que éste presente, y que con ayuda de este mecanismo auxiliar el paciente pueda incorporarse a una vida con el mayor número de actividades posibles [3]. Desde pacientes que puedan movilizar su propia silla, hasta pacientes que requieran la intervención de algún familiar o acompañante para su desplazamiento. Este tipo de particularidades podrían generalizarse mediante un sistema robótico que permita englobar múltiples opciones de manejo y control de una SRM, con la finalidad de que una misma silla abarque un rango o número mayor de pacientes con distintas limitaciones físicas.

La SRM es un mecanismo que contribuye a solventar limitaciones de desplazamiento de personas con algún tipo de discapacidad física, tomando el papel de extremidades inferiores. Estos dispositivos mejoran la calidad de vida de personas permitiendo una adaptación más natural al ambiente que los rodea.

Las sillas de ruedas motorizadas deben ser consideradas un sistema adecuado para incrementar la libertad individual, de movimientos, para la formación personal, para el trabajo, la independencia, mejorando la autoimagen y los comportamientos individuales [4].

Gran parte de la robótica e inteligencia artificial en el tema de las discapacidades está enfocada al desarrollo de las sillas de ruedas inteligentes. La ayuda a la movilidad por medio de sillas robóticas inteligentes es el tema a resolver en este trabajo. Existen al menos tres factores claves del desarrollo de estos equipos: SRM robótica, la interfaz hombre-máquina y la inteligencia de guiado [5].

- Las SRM inteligentes son sillas convencionales que se han equipado con sistemas informáticos y sensores. Los sensores captan el entorno para transmitir información al sistema de control.
- La “Interfaz Hombre-Máquina” o IHM es el medio por el cual el usuario se puede “comunicar” con la herramienta que desea utilizar. La IHM permite la comunicación del hombre con el dispositivo y viceversa. En este proyecto será en una dirección; el hombre da órdenes a la máquina por medio de una interfaz inalámbrica o manual (joystick).
- La inteligencia de guiado engloba los sistemas de movimiento dirigidos. En este proyecto se desarrollará un sistema de movimiento mediante lecturas musculares del brazo, el sistema de control procesa los datos y toma las decisiones, asociándolas a movimientos a través de los actuadores.

Este tipo de dispositivos mejora gratamente la calidad de vida de las personas discapacitadas y en muchos casos puede permitir manejar una silla de ruedas a personas que de otra manera serían incapaces de realizarlo.

La colaboración del control hombre máquina se encamina en que un humano y un robot colaboren para realizar tareas y lograr metas, es otra importante investigación en el área de las sillas de ruedas robóticas [6].

Aunque la fecha de inventores de la primera silla de ruedas no estén claros, la primera silla de ruedas concebida para el fin de transportar a una persona, con un diseño similar a las sillas actuales, fue fabricada nada menos que para el monarca Felipe II de España por un inventor desconocido en 1595.

Estaba equipada con cuatro ruedas pequeñas, reposapiés e incluso respaldo reclinable, según puede verse en un dibujo fechado en 1595 (ver Fig.1). Para poderse mover con esta silla, el Rey necesitaba la ayuda de un cortesano, pero esta silla realmente no era de gran ayuda ya que el castillo donde el Rey vivía no contaba con rampas ni diseños adecuados en su construcción para poder trasladarse en silla de ruedas.



Figura 0.1. Primer silla de ruedas documentada. Elaborada para el Rey Felipe II.

Avanzamos ahora hasta el año 1665, la primera instancia documentada de una persona discapacitada con movilidad independiente, cuando Stephen Farfler, un joven relojero parapléjico alemán de solo 22 años construyó el primer vehículo autopropulsable para su propio uso. Este artefacto tiene un asombroso parecido con un handbike moderno. Construyó una silla que parecía robusta sobre un chasis de tres ruedas. Sujetas a cada lado de la rueda frontal única. Contaba con manivelas que Stephen giraba para impulsarse hacia adelante (ver Fig. 2).



Figura 0.2. Silla de ruedas de Stephen Farfler.

En 1783 aparece la Silla "Bath", representada en la Fig. 3, inventada por el fabricante John Dawson en la ciudad inglesa de Bath, de donde toma su nombre. Este modelo de tres ruedas dominara el mercado hasta el siglo XIX. La silla "Bath" de Dawson, con su tercera rueda que el ocupante podía dirigir usando una manivela rígida agregada, fue un gran suceso. Hubo un número de versiones, algunas de ellas abiertas, otras con capuchas y frentes de vidrio, pero todas debían ser empujadas desde atrás o tiradas por un pequeño caballo o burro. No obstante, la silla "Bath" no era muy cómoda y durante el siglo siguiente fueron añadiéndose mejoras, pensando sobretodo en el confort del usuario, como respaldo y reposapiés ajustables.



Figura 0.3. Silla de ruedas "Bath".

En el año 1915 ingenieros británicos desarrollan una Silla de Ruedas Motorizada (SRM), que alcanzaba los 8 Km/h con un sistema de regulación de la aceleración por un pedal. La cual no logró tener mucho éxito debido a que las sillas de ruedas manuales eran mucho más baratas. Aun así, las sillas de ruedas seguían siendo muy pesadas, rígidas y difíciles de guardar. Las primeras sillas motorizadas eran manuales adaptadas con diversos sistemas de engranajes poco eficientes difíciles de manejar. Las primeras sillas a poder usaban cintas en el tren de tracción. El motor encendía un rotor que tenía una cinta enrollada a su alrededor, y la cinta transmitía la energía a las ruedas.

En 1916 Carton, en Londres fabrica una SRM a demanda de las personas parapléjicas y amputadas de miembros inferiores como consecuencia de la primera Guerra Mundial.

El proyecto mejor documentado es del año 1953 en Ottawa (Canadá), donde Klein, construye un modelo de SRM, de la cual existe referencia basándose en un diseño anterior de un inventor desconocido de Pensilvania [7].

Los primeros diseños eran sillas de ruedas meramente eléctricas, uno de estos primeros diseños fue el sistema simple "E & J 840" en la Fig, 4, este diseño contaba con un control manual de cuatro interruptores que accionaban los motores, los motores hacían avanzar a la silla de ruedas de manera brusca al mover en cualquier dirección.



Figura 0.4. Una de las primeras sillas de ruedas motorizada, década de los 50, "E&J".

La brusquedad de partida se pudo suavizar con motores de bobina más pesados y de partida lenta, pero eran ineficientes y la velocidad máxima alcanzada era mínima, estas sillas de ruedas tenían dos velocidades básicas, alta y baja y tenían dos baterías de 6 voltios conectadas en paralelo, y para realizar un cambio de velocidad era necesario detener la silla y conectar las baterías en serie; sin embargo, esta silla ya se consideraba independiente en cuestión de movilidad.

Otro modelo de silla de ruedas de velocidad ajustable fue la “Motorette” (ver Fig. 5), este dispositivo adaptable a una silla de ruedas manual contaba con dos motores de 12 voltios montados independientemente detrás del usuario, cada motor tenía acoplado una rueda que por fricción transmitía el movimiento a las ruedas posteriores (solamente si las ruedas posteriores estaban bien infladas).



Figura 0.5. Silla de ruedas Motorette.

Otro invento que ha influido decisivamente en la evolución de las sillas de ruedas, es sin duda el automóvil. La necesidad de transportar la silla, determino la invención de la silla plegable. En 1932 el ingeniero Harry Jennings, construye en Nueva York la primera silla de estructura tubular plegable (ver Fig. 6), para su amigo parapléjico Herbert Everest. Juntos fundan Everest & Jennings, una compañía que monopolizaría las ventas de sillas de ruedas durante muchos años. Hasta tal punto que el gobierno de Estados Unidos interpuso una demanda antimonopolio contra Everest & Jennings, por controlar el precio de las sillas de ruedas. El caso finalmente fue sobreseído. El diseño original de esta primera silla plegable se sigue utilizando a día de hoy en sillas básicas por todo el planeta, por supuesto con algunas mejoras.



Figura 0.6. Silla de Everest & Jennings, silla de ruedas plegable.

Las últimas dos décadas han supuesto un enorme avance, tanto para las manuales como las eléctricas. Nuevos materiales, mejor rendimiento y sobretodo la posibilidad de personalizar las sillas de acuerdo a las necesidades individuales de cada persona.

La silla de ruedas motorizada

Además de la movilidad que las sillas eléctricas ofrecían, la aparición de éstas solamente alimentó el deseo de los consumidores para ir más rápido y más lejos. Esto impulsó una época de mayor creatividad e innovación en los talleres de sillas del Programa de Estudiantes con Discapacidades de la UC de Berkeley y del Centro de Vida Independiente.

Jim Donald, estudiante cuadraplégico que se graduó de abogado en la Universidad de Berkeley fundó, junto a un equipo de estudiantes con capacidades especiales, un sistema conocido como el "Equipo silla de ruedas de Berkeley" [8]. Este dispositivo contaba con dos motores de 24 voltios montados de forma horizontal delante de las ruedas posteriores y que se acoplaban a los mismos por medio de una rodela como en el diseño de la silla de ruedas Motorette, pero la rodela era más grande y gracias a estos motores más robustos la silla podía movilizarse más rápido sin quitarle tracción a la silla de ruedas.

Después varias mejoras reemplazaron las rodelas por cadenas y las llantas pasaron a ser de caucho sólido.

Comparando la primera silla de ruedas eléctrica que no permitía un avance suave, el siguiente gran avance en el diseño de sillas de ruedas fue la integración de un circuito electrónico y control de manejo gradual. Estas mejoras permitían que el usuario tuviera mayor control en la operación de la silla. Ahora, mientras más se moviera el bastón de control hacia la dirección deseada, más rápido se movería la silla en esa dirección. El circuito electrónico también permitió que se reemplazaran los motores de bobina con motores de magneto permanente más livianos y eficientes. Hoy en día, en vez de estar limitadas a un comienzo lento, el operador puede partir a la velocidad que sea capaz.

Miller y Slack [9] usaron por primera vez el término “silla de ruedas robótica”. Ellos aplicaron tecnologías de navegación que se usan en la robótica y construyeron dos prototipos de sillas de ruedas que ayudaron a los usuarios atravesar los caminos estrechos y evitar los obstáculos.

Simpson [10] repasó muchos estudios recientes en el desarrollo de sillas de ruedas inteligentes que tenían funcionamiento autónomo, como la anulación del obstáculo y navegación.

Prassler et al. [11] Desarrolló la silla de ruedas robótica (Ayuda de Movilidad para Ancianos y Personas Inválidas) MAid (Mobility Aid for Elderly and Disabled People) por sus siglas en inglés para apoyar y transportar a usuarios habilidades motoras limitadas. El sistema proporciona funciones que van de la navegación totalmente autónoma en un ambiente concurrido desconocido como una estación ferroviaria, maniobras locales parcialmente autónomas como atravesar puertas estrechas.

Cruz et al. [12] propuso un sistema de navegación basado en un lugar o recorrido conocido; en su sistema, cada demarcación estaba compuesta de un segmento camino metálico y una etiqueta de RFID. Todas las demarcaciones se descubrían por los sensores inductivos y eran identificados por un lector de RFID.

La colaboración del control hombre máquina se encamina en que un humano y un robot colaboren para realizar tareas y lograr metas, es otra importante investigación en el área de las sillas de ruedas robóticas. No hay supervisión en esquema del mando colaborativo: la silla de ruedas robótica es más como un compañero que ayuda al usuario a encontrar buenas soluciones cuando hay problemas [13].

Silla de ruedas robótica SENA

Gonzalez J., Muñoz A.J., Galindo C., Fernandez-Madrigal J.A., and Blanco J.L. Ingeniería de sistemas y Departamento de automatismos Universidad de Malaga - España (2007).

Galindo et al. [14] desarrolló la silla de ruedas robótica SENA para facilitar la movilidad en personas inválidas o en adultos mayores, SENA llevó a cabo la integración humana-robótica que permitía a una persona extender su autonomía, deliberar un plan, ejecutarlo y controlarlo.

Es una silla de ruedas eléctrica dotada de varios sensores y dispositivos que son manejados por el usuario de la silla a través de una computadora portátil, entre los sensores se cuenta: escáner láser de proximidad, sensores infrarrojos, cámara, entre otros; este equipo está diseñado para interiores y algunas demostraciones de su funcionamiento fueron mostradas en el año 2007 (ver Fig. 7).

Este modelo fue el usado por los diseñadores de la silla de ruedas robótica SENA.

- Escáner láser radial de 180° (PLS).- Sensor encargado de mostrar obstáculos en movimiento.
- Anillo de trece sensores infrarrojos.-Sensor infrarrojo que permite encontrar obstáculos fijos entre 10 a 70 centímetros desde su posición.
- Cámara CCD.- (dispositivo de carga acoplada) Dispositivo encargado de captar la luz y formar una imagen a partir de ella, son muy sensibles y frágiles.



Figura 0.7. Silla de ruedas robótica SENA.

Dispositivo detector de colisión para silla de ruedas eléctrica omnidireccional

Autores:

Shuichi Ishida and Hiroyuki Miyamoto

Graduate School of Life Science and Systems Engineering, Kyushu Institute of Technology, 2-4. Hibikino, Wakamatsu-ku, Kitakyushu, Fukuoka 808-0196, Japan.

Correspondence should be addressed to Hiroyuki Miyamoto; miyamo@brain.kyutech.ac.jp

Received 9 October 2012; Accepted 1 November 2012 Es una silla de ruedas omnidireccional diseñada para adultos mayores o personas con capacidades especiales ya que no tiene límites en su dirección y en su movimiento, este vehículo está equipado con rodillos circulares libres llamados "Ominiwheel" [15] que son básicamente esferas, para manipularlo existen varios métodos comunes como el uso del joystick, el reconocimiento de voz [16] y seguimiento ocular o con los movimiento de la cabeza; sin embargo, el movimiento no intencionado de la

silla de ruedas que puede ser causado por errores del usuario y por ello se plantea sistemas a base de sensores para localizar obstáculos (ver Fig. 8).



Figura 0.8. Prototipo de silla omnidireccional.

El sistema omnidireccional en su parte superior consta de un dispositivo detector de colisión (ver Fig. 9), este dispositivo consta de un marco rígido, cada potenciómetro se coloca a 120 grados para medir las diferentes direcciones, cuando el sistema colisiona con algún objeto, el marco se mueve haciendo girar los potenciómetros y censando la posición y con ello poder orientarse el vehículo, para evitar un golpe brusco se cuenta con tres mecanismos amortiguador-resorte para minimizar la reacción del impacto.

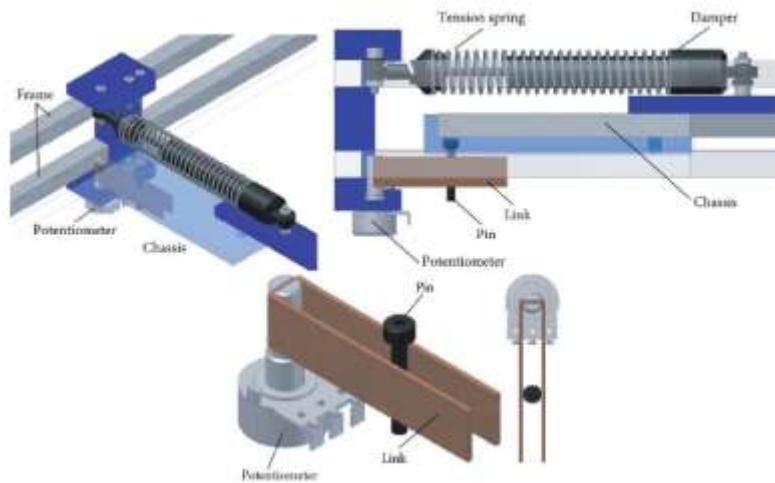


Figura 0.9. Dispositivo detector de colisión.

Diseño de asistente de movilidad de la silla de ruedas robótica inteligente

Autores:

Po Er Hsu¹, Yeh Liang Hsu¹, Kai Wei Chang¹ and Claudius Geiser²
Gerontechnology Research Center, Mechanical Engineering Dept., Yuan Ze University, Taiwan/ Hochschule Augsburg, University of Applied Sciences, Germany

Received 8 Aug 2012; Accepted 2 Nov 2012

La presente información muestra el desarrollo de la silla de ruedas robótica inteligente o *iRW* (intelligent Robotic Wheelchair) por sus siglas en inglés, dando especial atención al asistente de movilidad; el vehículo usa cuatro ruedas Mecanum que facilita el movimiento en todas las direcciones (incluyendo movimiento diagonal y radio cero de rotación) y por ello, el *iRW* puede girar y moverse en espacios reducidos (ver Fig. 10).



Figura 0.10. Prototipo de silla *iRW*.

El asistente de movilidad está diseñado para tres operaciones: manipular la silla de ruedas por el usuario, para usar con cuidadores de personas, movimiento autónomo del *iRW*; además cuenta con cinco modos de funcionamiento: anulación del obstáculo, modo con palanca de mando (joystick), manija de mando, mando por pantalla y navegación en interiores; el modo joystick es el modo de mando usado por el usuario de la silla de ruedas, el modo manija de mando y por pantalla son usados por los cuidadores de las la persona que usan la silla de ruedas y los modos anulación de obstáculos y navegación en interiores son dos modos semi-autónomos que reducen la carga de operación ya sea al usuario o al cuidador del usuario. La colaboración hombre-máquina es de vital importancia para el buen manejo del equipo. La propuesta de este diseño se basa en ayudar a adultos mayores que no pueden movilizarse por sus propios medios y piensan que una silla de ruedas eléctrica convencional es difícil de manipular, por ello, se beneficiarían de un sistema de navegación automatizado.

Tipos de sillas de ruedas motorizadas

Se considera clásicamente, la existencia de cinco variantes o tipos de SRM en la actualidad de tracción eléctrica (ver tabla 1).

Tabla 0.1. Variedades de sillas de ruedas motorizadas.

| |
|---|
| 1 SRM de tracción electromotriz con correa de transmisión. |
| 2 SRM con sistema directo de base modular motorizado. |
| 3 SRM con sistema de base modular motorizada, plegable y portátil. |
| 4 Unidades de propulsión adosables, a SR convencional. |
| 5 Triciclos (también denominados “Scooters”) y Tetraciclos motorizados. |

SRM de tracción electromotriz con correa de transmisión

Es la más estable de todos los modelos, portan en la rueda trasera una llanta grande con cubierta de goma y la rueda anterior es neumática y de menor diámetro. La propulsión la genera un motor que impulsa una cadena o correa de transmisión por piñones. Se caracteriza por ser duradera y resistente. Puede adecuarse para su empleo en exteriores, donde alcanza velocidades considerables. Tienen un corto radio de giro, es una de sus principales virtudes dado que constituye todavía una limitación importante para el empleo de SRM en interiores. Es potente, con una multiplicidad opcional de sistemas de control y adicionales. Están equipadas con baterías clásicas de ácido, que permitan una autonomía importante.

Presentan un diseño anticuado, con un rendimiento electromecánico bajo, del orden del 25%. Son pesadas. Con grandes dificultades para su transporte, exclusivamente sobre vehículos adaptados y camionetas accediendo por ascensores o rampas. Y con muy limitado acceso directo al exterior desde los domicilios. Su mantenimiento mecánico es importante.

La autonomía de este modelo y el siguiente oscila entre 6.5 Km (en las variantes de interior) y los 100 Km (en las variantes de exterior), según las casas fabricantes. La velocidad igualmente de esta presentación y la citada a continuación, cubren un abanico individualizable entre los 6.5 y los 13 Km/h según el tipo de pavimento.

Constituían hasta la aparición de las nuevas generaciones de base modular, el sistema de elección para discapacidades mayores.

SRM con sistemas de base modulares motorizados

Son las de más reciente aparición. Portan un sistema rígido que contiene el mecanismo motriz. Usan transmisión directa, significando que el motor enciende engranajes que encendidos mueven la energía a través de una transmisión de engranajes a las ruedas. Son duraderas, aunque construidas en materiales ligeros (generalmente aluminio). Los

reposabrazos y mandos de control primario se optimizan para que no imposibiliten la aproximación a las mesas. Versátiles, en cuanto a la presentación de modelos y adaptaciones específicas. Radio de giro 90-220 cm.

El peso es variable (50-125 Kg). Con una buena potencia (la velocidad puede individualizarse para cada usuario según sus características) y autonomía. Portan baterías del tipo: celdas de gel.

Existen modelos específicos para cada fin y cada persona, incluyendo su empleo en exteriores (llantas, controles, frenos, luces). Presenta algunas dificultades en el exterior, como consecuencia de su menor estabilidad en terrenos irregulares, puesto que las superficies de rodamiento no regulares constituyen uno de los principales problemas de seguridad de todos los tipos de SR.

Poseen una multiplicidad opcional de sistemas de control y sistemas de ayudas adicionales (respaldos, asiento y reposapiernas reclinables, etc.) bajo un entorno electrónico sin límites a su programación.

Generalmente poseen cuatro ruedas de pequeño diámetro. Recientes modelos pueden ir equipadas con ruedas traseras de gran diámetro. Superan rampas de 15° a 18°, y bordillos de 6 a 16 cm de alto. Se trata de modelos duraderos y generalmente adaptados al empleo en terrenos irregulares.

Su principal virtud: La existencia de un modelo para cada necesidad.

SRM de tracción eléctrica plegable / portátil

Son las más ligeras con un peso de 60-63 Kg. Plegables y desmontables en fragmentos de 23 Kg, aproximadamente. El peso de estos fragmentos no garantiza que sean de fácil y cómodo transporte, se ha informado en la literatura que incluso para las personas normalizadas el manejo de estos pesos es difícil. Más aún lo es para personas discapacitadas operar con ellas y desmontarlas. Son menos estables, y menos duraderas.

No se diseñan para grandes distancias a recorrer en el exterior (no portan carenados, ni frenos, o luces). Tienen menor potencia y autonomía que las ya descritas. Menos opciones de todo tipo, y no se pueden equipar con grandes sistemas auxiliares.

Radio de giro 80 cm. Su principal virtud sería en todo caso la posibilidad relativa de ser transportables. Se trata, en realidad de una versión de la forma clásica de SRM de base modular motorizada.

Unidades de propulsión adosables

Son SR convencionales, equipadas con uno o dos motores eléctricos, que mecánicamente pueden ser conectados / desconectados a voluntad del usuario para impulsar las ruedas traseras por un sistema de fricción, o con una rueda suplementaria trasera central.

El uso es temporal, y limitado a situaciones difíciles (cuestas, rampas, terreno irregular, etc.). Tienen baja potencia de impulsión y autonomía. No presentando opciones.

Sus virtudes, serían: el bajo coste, la sencillez mecánica, y la posibilidad de disponer de un vehículo motorizado opcional pero fácilmente transportable.

Triciclos (scooters)/ tetraciclos

Son vehículos, cuyo diseño se aleja del modelo tradicional de la SR. Se asemejan a pequeños vehículos con una imagen que recuerda a mini coches y motos. Son pesados (200 Kg). Plegables parcialmente. Están equipados totalmente para uso exterior. Pueden ser considerados duraderos.

Se ha optimizado el diseño, para hacerlo aceptable cosméticamente a los pacientes de cierta edad, que presentando una baja aceptación psicológica de su discapacidad no desean emplear modelos más tradicionales. Recuerdan a modelos comerciales de mini motos las de tres ruedas, y cochecitos de golf los de cuatro ruedas. Estos últimos son de mayor estabilidad, pero menos compactos y de más difícil transporte por sus dimensiones. Existe un riesgo de vuelco superior en los scooters que en los restantes tipos de SRM, relacionado además directamente con la velocidad.

Son difíciles las transferencias en estos vehículos para personas con discapacidades de origen neuromotriz, presentando dificultades para montar, y desmontar del vehículo. Requieren para su conducción un significativo control del tronco, miembros inferiores y casi normales de miembros superiores. Sus indicaciones serían personas con limitaciones parciales a la deambulación y/o con limitaciones del vigor físico (fatiga muscular), incluso con integridad neuromuscular. Pacientes con patología severa de origen cardíaco, respiratorio y degeneración articular, como la artritis reumatoide. En ocasiones en la esclerosis múltiple, enfermedad de la neurona motora, o patología de la placa motora [7].

La discapacidad en México



Caminar o moverse. Hace referencia a la dificultad de una persona para moverse, caminar, desplazarse o subir escaleras debido a la falta de toda o una parte de sus piernas; incluye también a quienes teniendo sus piernas no tienen movimiento o presentan restricciones para moverse, de tal forma

que necesitan ayuda de otras persona, silla de ruedas u otro aparato, como andadera o pierna artificial.



Ver. Abarca la pérdida total de la vista en uno o ambos ojos, así como a los débiles visuales y a los que aun usando lentes no pueden ver bien por lo avanzado de sus problemas visuales.



Mental. Abarca cualquier problema de tipo mental como retraso, alteraciones de la conducta o del comportamiento.



Escuchar. Incluye a las personas que no pueden oír, así como aquellas que presentan dificultad para escuchar (debilidad auditiva), en uno o ambos oídos, a las que aun usando aparato auditivo tiene dificultad para escuchar debido a lo avanzado de su problema.



Hablar o comunicarse. Hace referencia a los problemas para comunicarse con los demás, debido a limitaciones para hablar o porque no pueden platicar o conversar de forma comprensible.

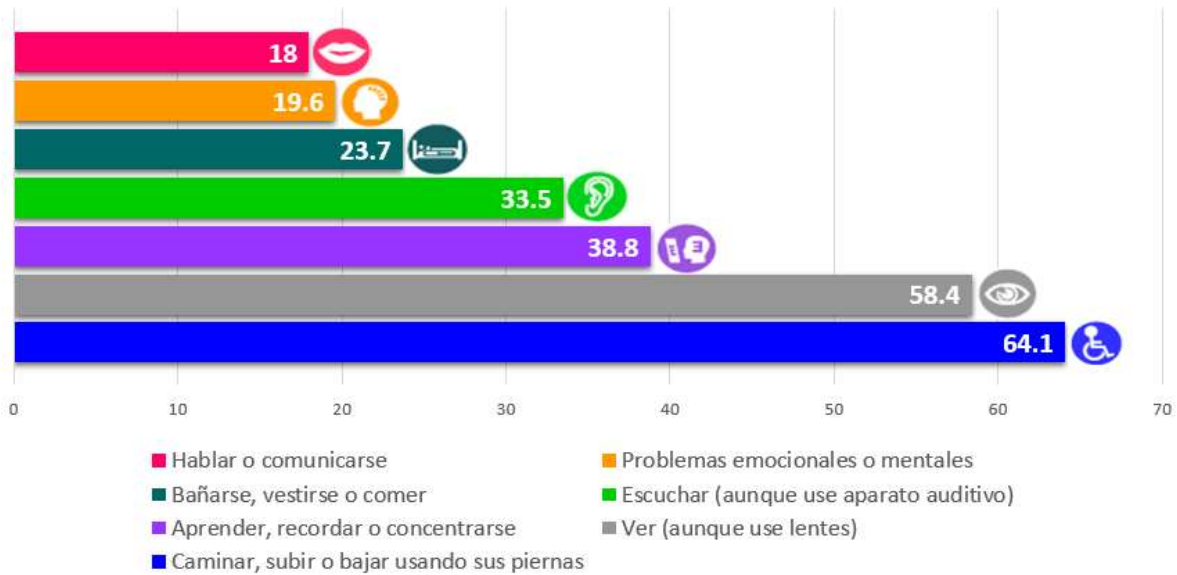


Atención y aprendizaje. Incluye las limitaciones o dificultades para aprender una nueva tarea o para poner atención por determinado tiempo, así como limitaciones para recordar información o actividades que se deben realizar en la vida cotidiana.



Autocuidado. Hace referencia a las limitaciones o dificultades para atender por sí mismo el cuidado personal, como bañarse, vestirse o tomar alimentos.

La limitación de la movilidad es la de mayor frecuencia entre la población del país; alrededor de la mitad de las limitaciones declaradas se refieren a caminar o moverse. El segundo tipo de limitación es la de tener problemas para ver, aun usando lentes [17].

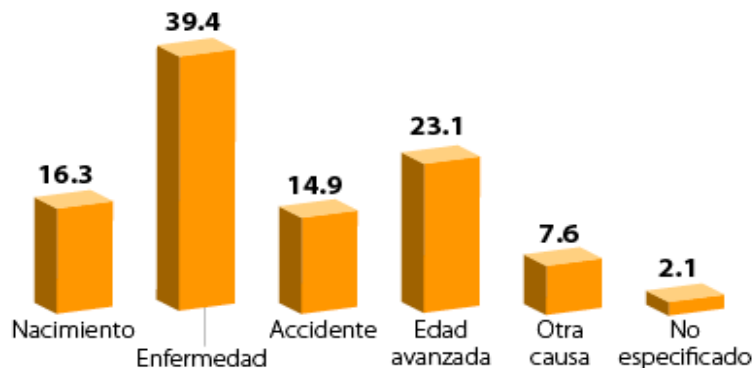


Gráfica 1: Porcentaje de la población con discapacidad según dificultad en la actividad (Año 2014).

Los motivos que producen discapacidad en las personas pueden ser variados, pero el INEGI los clasifica en cuatro grupos de causas principales: nacimiento, enfermedad, accidente y edad avanzada.

De cada 100 personas con discapacidad:

- 39 la tienen porque sufrieron alguna enfermedad.
- 23 están afectados por edad avanzada.
- 16 la adquirieron por herencia, durante el embarazo o al momento de nacer.
- 15 quedaron con lesión a consecuencia de algún accidente.
- 8 debido a otras causas [18].



Gráfica 2: Porcentaje de la población con discapacidad según causa de la misma (Año 2014).

En el laboratorio de Robótica y control de la Facultad de Ciencias de la Electrónica, en conjunto con el laboratorio de Ingeniería del Lenguaje y del Conocimiento de la Facultad de Ciencias de la Computación, ambos de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, se pretende generar tecnología propia. Los dispositivos auxiliares destinados al apoyo de discapacidades se encuentran en una mejora continua en cuanto a sus atributos tecnológicos, y muchas de las tecnologías nuevas son hoy en día aún muy caras, provocando que no sean accesibles a todos los potenciales usuarios, por consiguiente el desarrollar este tipo de sistemas mecatrónicos a un costo menor es un objetivo muy importante y trascendental.

Definiremos las teorías, conceptos o ideas que pretendemos verificar, particularmente, la dilucidación de propuestas para la generación de un dispositivo de control que funcione como interfaz entre dispositivos externos de manipulación y una silla de ruedas motorizada. Una tarea inicial, por supuesto, consiste en el estudio exhaustivo del estado del arte y la evaluación preliminar de las líneas de acción, a fin de establecer un proyecto de culminación factible en tiempo y forma. En base al estudio que se realiza se llevará a cabo el diseño del o los prototipos seleccionados considerando para ello una serie de pasos tradicionales ocupados para el diseño del sistema de control. La metodología de diseño garantizará que se minimicen los errores, y que, en caso de que se produzcan, éstos se detecten en la fase más temprana posible. Por ello en la fase de diseño se deben introducir puntos de verificación en distintas etapas del diseño y caminos de vuelta atrás antes de comenzar el montaje del sistema propuesto. En particular, usaremos métricas basadas en el concepto de usabilidad, a fin de comparar los resultados del presente proyecto con las expectativas de los usuarios. Al desarrollar un mecanismo controlado por múltiples dispositivos, nos permite ampliar el rango de usuarios, lo que proporciona un sistema más cómodo de controlar. El diseño de la mecánica del sistema permitirá mantener un centro de masa lo más abajo posible, lo que implica que el mecanismo presente mayor estabilidad y con la corroboración de las simulaciones que se llevarán a cabo a través de la obtención del modelo dinámico, se fabricará el sistema. Como paso adicional, criticaremos los métodos y técnicas desarrolladas bajo la explicación de los resultados experimentales y la teoría que subyace a la generación de un dispositivo de control por bluetooth para una silla de ruedas motorizada.

Objetivos

Para llevar a cabo el proyecto de tesis, se fijaron los siguientes objetivos.

Objetivo General:

“Desarrollar un sistema mecatrónico para una silla de ruedas que permita controlar sus movimientos a través de dispositivos conectados mediante bluetooth, el cual proveerá de un mecanismo de control tolerante a fallos de usuario (por ejemplo, atropellamientos de transeúntes, choques contra objetos, etc)”.

Objetivos específicos:

- 1) Adecuar la mecánica del sistema mecatrónico de la silla de ruedas.
- 2) Análisis de la cinemática y dinámica del sistema mecatrónico.
- 3) Instrumentar el sistema de control de la silla de ruedas, considerando la tolerancia a fallos mediante el uso de sensores de distancia y contacto.
- 4) Desarrollar la interfaz de usuario para configurar el controlador deseado.
- 5) Pruebas del sistema diseñado.
- 6) Publicación de los resultados.

El presente trabajo se organiza de la siguiente manera: en el capítulo 1 se explican las características principales de la SRM, como el tipo de SRM que es, la velocidad que ésta alcanza, su autonomía, sus mecanismos de control, se presenta un diagrama a bloques del sistema mecatrónico y un diagrama de los subsistemas que lo conforman. En el capítulo 2 se presenta el diseño mecánico de la SRM, la manera en que se ensambla el mecanismo, las características de los materiales utilizados, el tipo de motores y de baterías que utiliza y el tipo de transmisión. En el capítulo 3 se desarrolla el modelo cinemático del robot y el modelado dinámico de éste, tomando en cuenta las restricciones holonómicas de movimiento, al final de este capítulo se presentan simulaciones del modelado del robot. En el capítulo 4 se presenta el diseño de la etapa de potencia necesaria para mover los motores, el diseño de la etapa de control de todo el sistema y la instrumentación de ambas etapas, así como una aplicación desarrollada en el Sistema Operativo Android para controlar la SRM y la implementación de un brazalete de lecturas musculares que permite el control inalámbrico del mecanismo. En el capítulo 5 se presentan los resultados obtenidos que muestran la SRM terminada, las interfaces de usuario para su control y las gráficas para corroborar el modelo cinemático y dinámico del sistema. Finalmente se presentan las conclusiones del trabajo realizado.

Capítulo 1

1 Características de la silla de ruedas

En este capítulo se presentan las características principales del sistema mecatrónico, su rango de velocidad, su tiempo de autonomía, el tipo de SRM que se implementa, la manera en que ésta funciona y los subsistemas que la conforman. El objetivo de este trabajo es diseñar, desarrollar e implementar una SRM controlada de manera inalámbrica a través del protocolo de comunicación bluetooth, mediante un brazalete de lectura muscular o una aplicación móvil. La SRM tiene la capacidad de ser controlada de manera manual con la implementación de un joystick. A continuación se mencionan las características principales del sistema:

1. El sistema mecatrónico permitirá elegir entre recibir señales de un dispositivo inalámbrico para llevar actividades de control de la silla de ruedas, o de manera manual mediante un joystick.
 - El sistema puede ser controlado mediante un brazalete (MYO armband) de lecturas musculares o electromiográficas (EMG) que detecta los impulsos eléctricos de los músculos generados por el movimiento de los dedos, manos y brazos del cuerpo humano. El brazalete se comunica con la SRM a través del protocolo de comunicación bluetooth, lo que permite su control de manera remota ya sea por el usuario o por una persona alternativa.
 - El sistema permite asimismo su control a través de una aplicación móvil desarrollada para el Sistema Operativo Android, la cual mediante su interfaz puede realizar un control de movimientos previamente definidos, es decir, trayectorias específicas programadas, como “avance”, “retroceso”, “giro a la izquierda” y “giro a la derecha” de la SRM. Además cuenta con la posibilidad de controlarse de manera libre, es decir, que el usuario decida la trayectoria arbitraria que desea. La comunicación de la aplicación con el mecanismo se lleva a cabo también mediante el protocolo bluetooth.
 - La SRM tiene implementado un sistema mecánico de control de dirección basado en un joystick analógico de 3 ejes, que permite al usuario definir la ruta que él desee, así como controlar a deseo la velocidad a la que quiere avanzar.

2. El sistema mecatrónico desarrollado contará con un mecanismo efectivo para la manipulación de la silla de ruedas en tiempo real.
3. La SRM es una silla diseñada a través de una base rectangular, para el sistema de tracción y dirección se emplea la configuración diferencial (dos ruedas controlables y dos ruedas libres) debido a que mediante el cambio de velocidades en cada rueda se obtiene un seguimiento de trayectoria deseado, sin tener que implementar un sistema de dirección delantera. Es una SRM de tracción electromotriz con correa de transmisión por piñones.
4. La base mecánica, estructura o chasis está ensamblado mediante perfiles estructurales de aluminio para soportar una carga total de 155 kg aproximadamente incluyendo el peso del usuario.
 - Se realiza un análisis general del peso aproximado de todos los componentes que integran el sistema mecatrónico tales como: estructura del sistema, motores, baterías, mecanismo de control y peso del usuario. El peso total del sistema mecatrónico es:

$$PTSM = PEM + PB + PECP + PMR$$

$$PTM = PTSM + PU$$

Tabla 1.1: Distribución aproximada del peso de la silla de ruedas motorizada.

| Siglas | Significado | Masa | Peso (N) |
|---------------|--|-------------|-----------------|
| PEM | Peso de la estructura mecánica de la SRM | 32.2 kg | 315.88 N |
| PB | Peso de las baterías | 22.4 kg | 219.74 N |
| PECP | Peso de la etapa de control y potencia | 1 kg | 9.81 N |
| PMR | Peso de motorreductores | 7.4 kg | 72.6 N |
| PTSM | Peso total del sistema mecatrónico | 63 kg | 618.03 N |
| PU | Peso del usuario | 90 kg | 882.9 N |
| PTM | Peso total a mover | 153 kg | 1500.93 N |

5. El sistema electromotriz se compone de 2 baterías de ácido de plomo selladas de 12 V y 35 Ah cada una, y dos motorreductores de corriente directa de 12 V, 120 W y 277.7 rpm.

- Con base en las características de los motorreductores y de las baterías de alimentación, el sistema electromecánico permite una autonomía de aproximadamente 3.5 horas de movimiento continuo (ver capítulo 3, sección 3.1).
6. La SRM puede alcanzar una velocidad promedio de 10 km/h, lo que la posiciona en el rango de velocidad estándar de una SRM.
 7. El sistema mecatrónico propuesto será tolerante a fallos, utilizando sensores de distancia para evitar daños.
 - La SRM estará equipada con 4 sensores ultrasónicos que permiten la detección o presencia de objetos u obstáculos que interfieran en el recorrido de ésta. Si el usuario accidental o deliberadamente avanza hacia un objeto, pared o persona, el sistema es capaz de detectarlo e interrumpir su avance en esa dirección. De esta manera la SRM evitará daños por colisión.

1.1 Diagrama a bloques del sistema mecatrónico

En la Fig. 1.1 se presenta un diagrama a bloques general del sistema

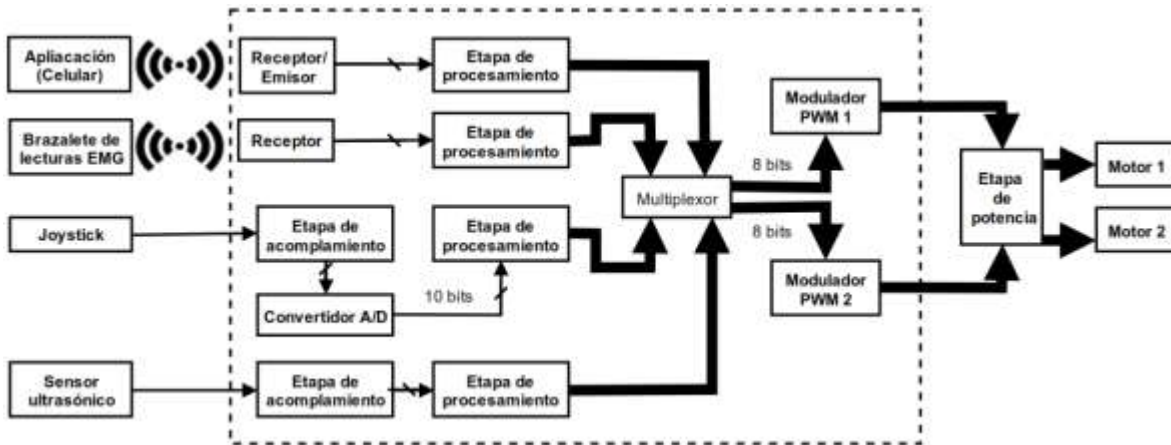


Figura 1.1. Diagrama a bloques general de la SRM.

El sistema mecatrónico cuenta con 3 entradas que son el medio por el cual el usuario controlará la SRM. En primera instancia se tiene la aplicación desarrollada que se comunica de manera inalámbrica a través del protocolo de comunicación bluetooth, requiere de una etapa de recepción/emisión para su comunicación. El receptor adquiere los datos enviados

por la aplicación móvil y los envía a través del puerto UART del microcontrolador para su procesamiento. Como segunda entrada se tiene un brazalete de lecturas EMG que de igual forma se comunica mediante el protocolo de comunicación bluetooth, se requiere un receptor para su comunicación con la SRM que se encargará de enviar los datos a la etapa de procesamiento. Como última entrada se tiene un Joystick analógico de 3 ejes, debido a que el joystick está basado en potenciómetros lineales se requiere una etapa de acoplamiento de señales para la correcta lectura de los valores analógicos y posteriormente se utilizan 3 canales de conversión Analógica a digital (ADC) disponibles en el microcontrolador, y de esta manera se envían a la etapa de procesamiento de dichas señales. En la etapa de procesamiento se interpretan las señales de los dispositivos de entrada y su asociación al movimiento de los actuadores mediante moduladores de ancho de pulso (señales PWM).

Al tener 3 entradas diferentes, se requiere una etapa de multiplexado para que el sistema realice la selección del dispositivo de control de la SRM, esto se lleva a cabo a través de la señal de identificación previamente procesada que cada elemento de entrada envía. El sistema requiere de salidas que permitan el control de los actuadores, esto se realiza a través de modulación por ancho de pulso (PWM) para variar la velocidad que cada motor tendrá. El procesador transmite las señales multiplexadas a los bloques de PWM, y ajusta el ancho de pulso necesario para el movimiento de la SRM. Posteriormente las salidas controladas requieren activar una etapa de potencia para poder mover el mecanismo, esta es instrumentada con puentes H, controladas por los moduladores de PWM.

La historia del PDI (Procesamiento Digital de Imágenes) se remonta a la década de los 60 y está directamente ligada con el desarrollo y evolución de las computadoras. Su progreso ha ido de la mano con el desarrollo de las tecnologías de hardware, ya que requiere un alto poder y recursos computacionales para almacenar y procesar las imágenes. De igual manera el desarrollo de los lenguajes de programación y los sistemas operativos han hecho posible el crecimiento continuo de aplicaciones relacionadas al procesamiento de imágenes, tales como: imágenes médicas, satelitales, astronómicas, geográficas, arqueológicas, biológicas, aplicaciones industriales, entre otras.

1.2 Diagrama de los subsistemas de la SRM

Como se mencionó en las características de la SRM y con base en el estudio de los diferentes tipos de SRM, los alcances que éstas tienen, así como las diversas aplicaciones que se le dan hoy en día, se propuso diseñar e implementar una silla de diseño rectangular con tracción diferencial (dos ruedas controlables y dos ruedas libres) para fines de mayor estabilidad, y una transmisión por cadena-piñón. En la Fig. 1.2 se presenta el diagrama de los subsistemas que componen a la SRM.

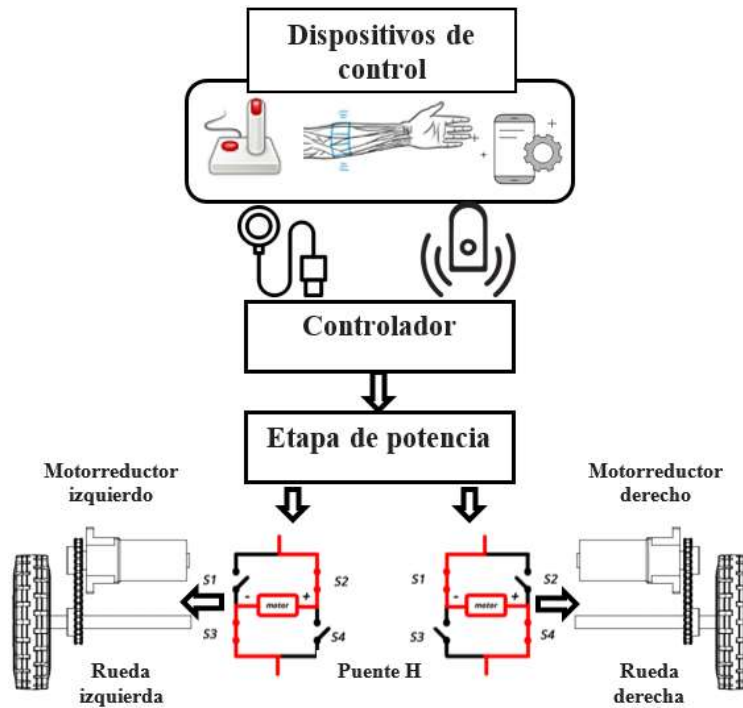


Figura 1.2: Diagrama de los subsistemas que componen a la SRM para los objetivos específicos del sistema presentado.

1.3 Conclusiones

Con base en la infraestructura disponible, se considera importante diseñar un sistema de adquisición de datos por bluetooth que sea lo suficientemente genérico, como para manipular la silla de ruedas con los dispositivos externos anteriormente mencionados.

Cubrir la mayoría de aspectos que una silla de ruedas estándar necesita tener de acuerdo a las necesidades que las personas con discapacidad presentan, es una cualidad que permite mejorar el diseño, abarcar un rango mayor de usuarios, así como otorga la posibilidad de mayor independencia en ellos, integrándolos a una vida cotidiana con menos limitaciones. Al seleccionar las características específicas de una SRM se permite brindar un mecanismo orientado de bajo costo.

Capítulo 2

2 Diseño y construcción del sistema mecánico de la silla de ruedas

El diseño en ingeniería es “El proceso de aplicar distintas técnicas y principios con el propósito de definir un dispositivo, un proceso o un sistema con suficiente detalle como para permitir su realización física” [19].

La silla de ruedas mecatrónica será una herramienta que proporcionará al usuario mayor autonomía y confort. En este capítulo se hace mención al proceso de diseño, a las características y aspectos básicos que debe cumplir cada elemento para el desarrollo de la estructura mecánica, así como de los accesorios que complementan a la SRM, de tal manera que sea funcional para el usuario. Se describen los componentes implementados, sus características y rangos de funcionamiento, así como la explicación del por qué se utilizaron.

Se diseñara un mecanismo que puede cargar 155 kg de masa aproximadamente, incluyendo el peso propio de la estructura y el del usuario.

En la Fig. 2.1 se presenta el diseño realizado en SOLIDWORKS de la SRM que involucra todos los componentes referentes a la SRM.

El diseño de la SRM se divide en 3 partes:

- La base mecánica o chasis
- Accesorios complementarios de la SRM
- El sistema electromecánico



Figura 2.1. Representación de la SRM realizada en SOLIDWORKS.

En la Fig. 2.2 se presenta una vista explosionada del diseño realizado, con el objetivo de denotar los subconjuntos principales que componen a la estructura completa y definirlos, explicar cómo se diseñó cada aspecto mecánico, los elementos que lo integran y los materiales de fabricación.

| N.º DE ELEMENTO | N.º DE PIEZA | CANTIDAD |
|-----------------|---------------------|----------|
| 1 | Asiento | 1 |
| 2 | Chasis | 1 |
| 3 | Reposapiés | 1 |
| 4 | Soporte de Joystick | 1 |

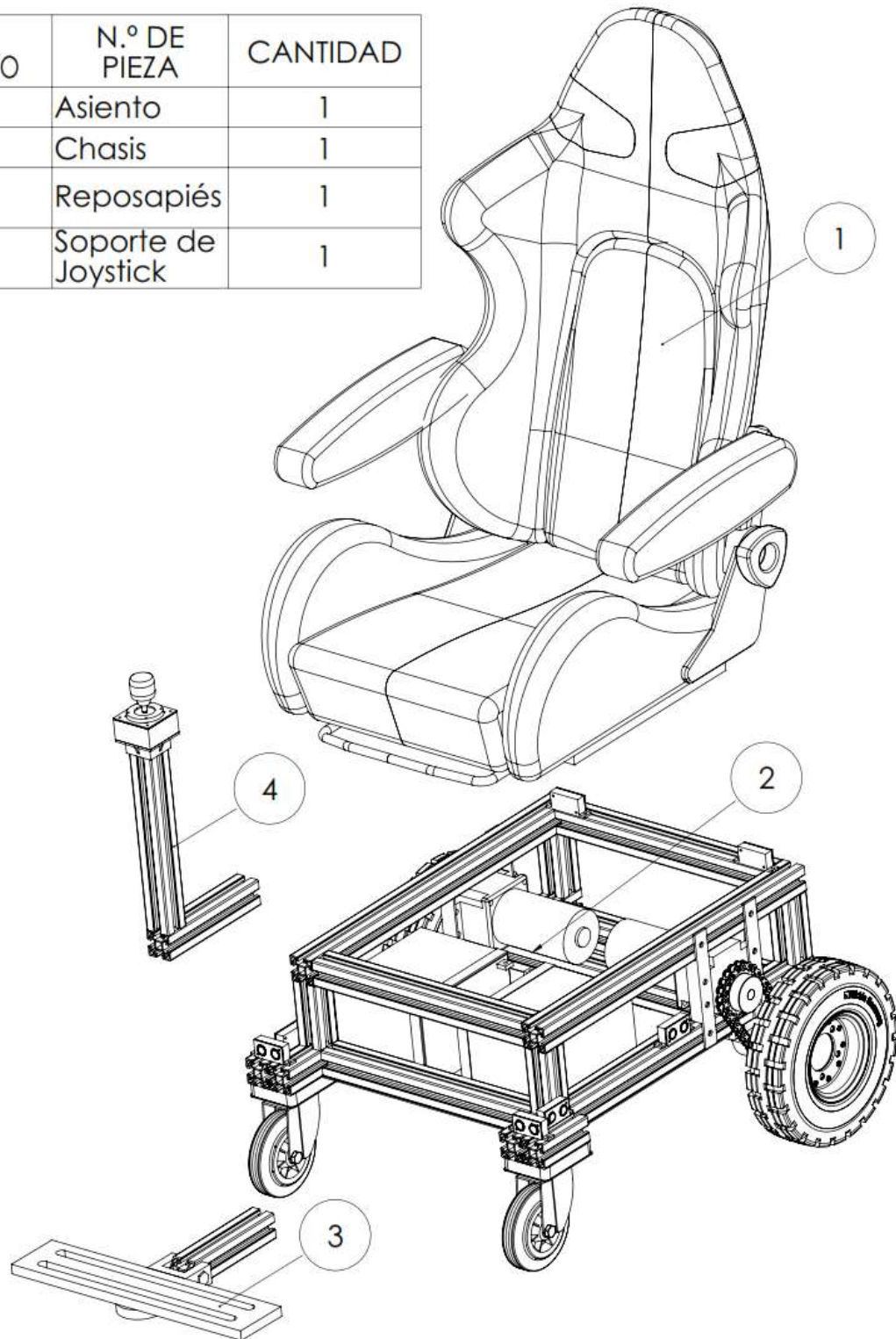


Figura 2.2. Vista explosionada y subconjuntos que conforman a la estructura mecánica de la SRM.

2.1 Base mecánica o chasis

El chasis es una de las partes más importantes y fundamentales del robot, ya que es la base estructural del vehículo, lo que implica que tiene que ser resistente a todas las fuerzas que puedan ser aplicadas sobre éste, como la vibración generada por los motores, por el resto del mecanismo, el contacto con la superficie, los impactos y las fuerzas generadas al maniobrar en el ambiente. El chasis proporciona rigidez y forma a la SRM y, a la vez, debe de garantizar un manejo sin contratiempos, como los producidos al dirigirse en una trayectoria curva. Debe de realizarse un diseño bien planeado para cubrir los aspectos necesarios del movimiento de la SRM. Los requerimientos contemplados para el diseño estructural son [20]:

- Resistente para usuarios de hasta 90 kg de masa.
- Ser liviano.
- Contener los dispositivos eléctricos, mecánicos y de control.
- Soportar cargas estáticas y dinámicas.

En la Fig.2.3 se presenta el diseño realizado de la base mecánica o chasis de la SRM.

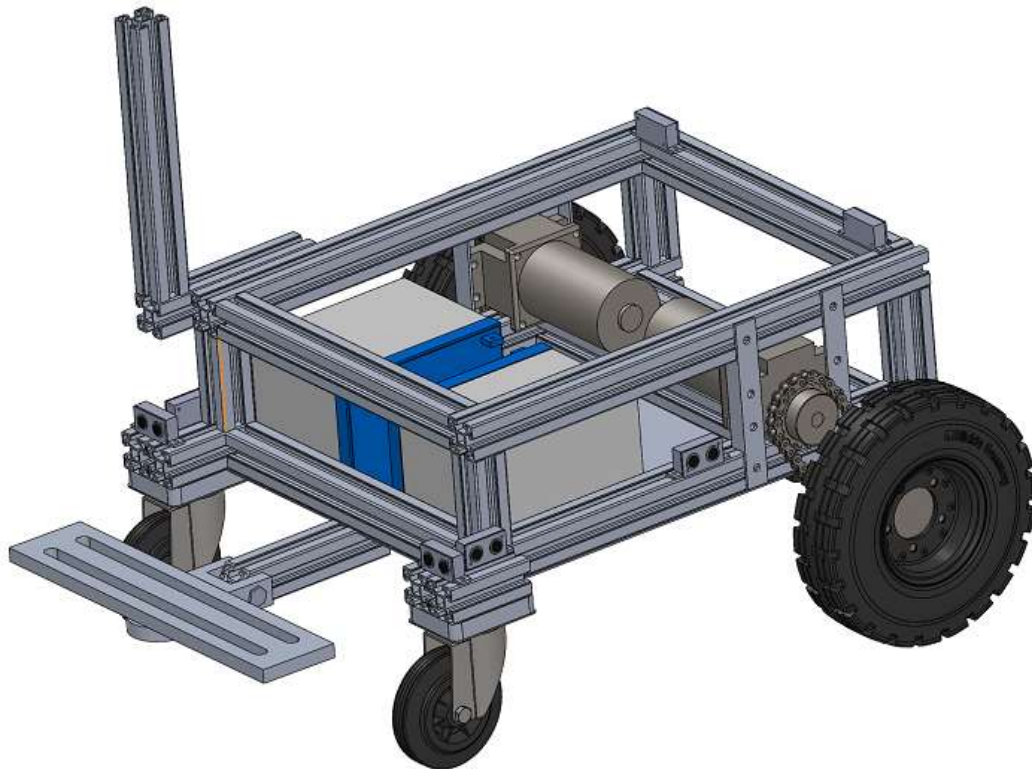


Figura 2.3. Diseño del chasis mecánico para la SRM.

En la Fig. 2.4 se observa el diagrama explosionado del chasis de la SRM para describir los elementos que lo integran.

| N.º DE ELEMENTO | N.º DE PIEZA | CANTIDAD |
|-----------------|---------------------------------|----------|
| 1 | Base rectangular | 1 |
| 2 | Sistema de transmisión mecánica | 2 |
| 3 | Rueda de castor | 2 |
| 4 | Reposapiés | 1 |
| 5 | Base para joystick | 1 |

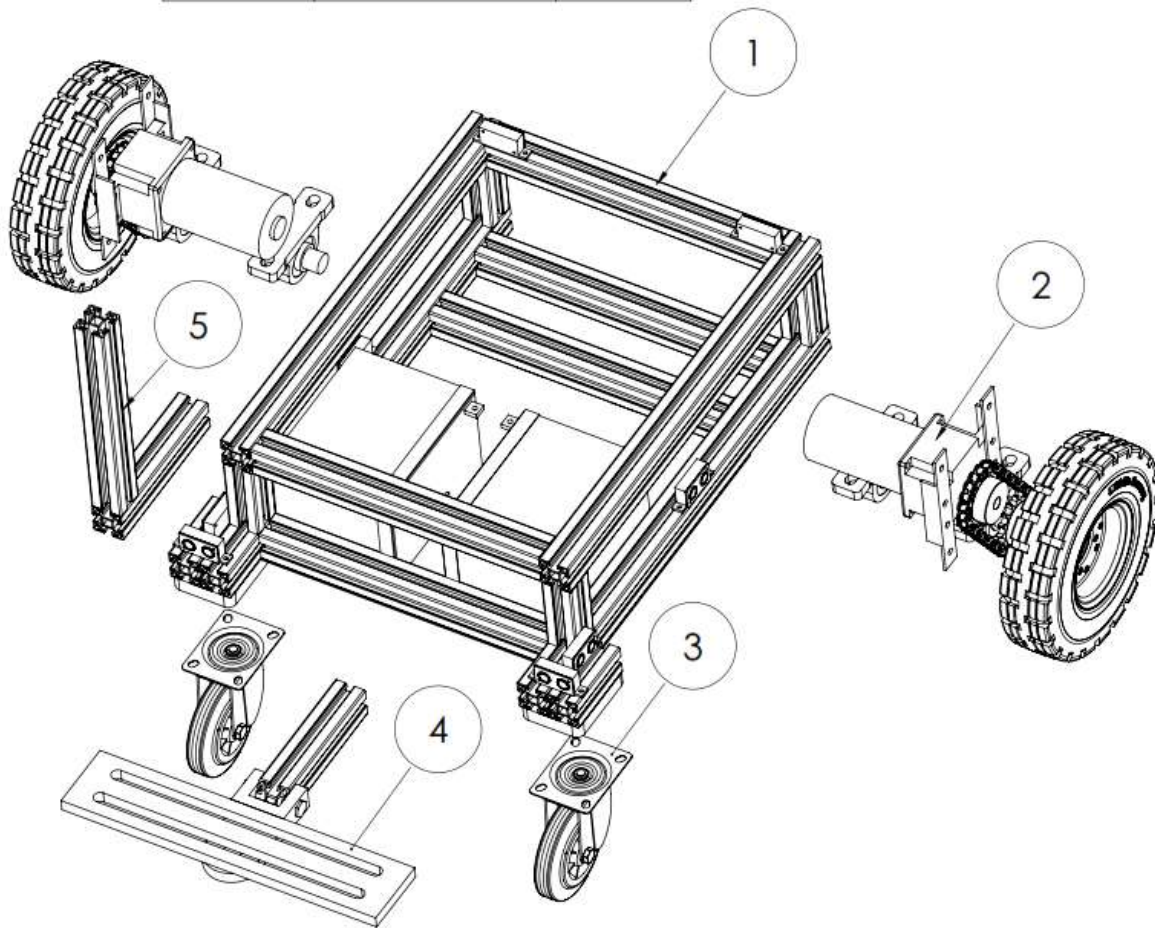


Figura 2.4. Diagrama explosionado y elementos que componen al chasis de la SRM.

La base mecánica o chasis de la silla de ruedas está construida con perfiles estructurales de aluminio que permiten la facilidad del ensamble y ajuste de dimensiones de manera rápida, reducen el peso de la estructura final, además otorgan mayor resistencia a esfuerzos, de esta manera permiten soportar el peso total. Al realizar un estudio sobre los diferentes tipos de sillas de ruedas motorizadas, los alcances que éstas tienen, así como las

diversas aplicaciones que se les da hoy en día, se propone diseñar e implementar una silla de base rectangular y para su sistema de tracción y dirección se emplea la configuración diferencial (dos ruedas controlables y dos ruedas libres) debido a que mediante el cambio de velocidades en cada rueda se obtiene un seguimiento de trayectoria deseado, sin tener que implementar un sistema de dirección delantera y de esta forma disminuir la complejidad del chasis mecánico, es decir, la silla dispone de dos motores eléctricos de corriente continua que impulsan las 2 ruedas convencionales de caucho traseras (ruedas tractoras). Las dos ruedas de castor delanteras de movimiento libre sirven de apoyo para distribuir el peso y mantener la estabilidad, permitiendo también el giro de la silla (ver Fig. 2.5).

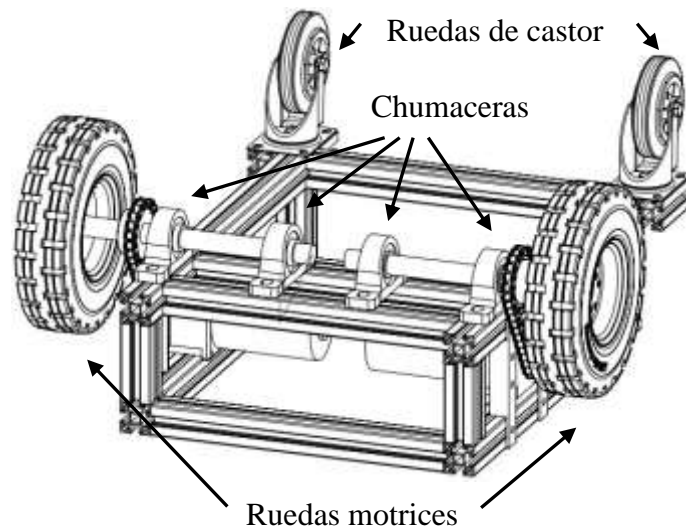


Figura 2.5. Sistema de tracción trasera en configuración diferencial, con sistema de chumaceras para transmitir el peso del usuario hacia la estructura.

Es una SRM de tracción electromotriz por transmisión de cadena-piñón, en la Fig. 2.6 se observa un diseño explosionado de los elementos que conforman el sistema de transmisión. Se diseña el sistema basado en una cadena de transmisión de paso 40, denotado por 'P' en la Fig. 2.7 [21], la cual implementa dos sprockets de paso 40, con 17 dientes cada uno, con el objetivo de mantener el mismo torque y velocidad entregados por los motorreductores (ver Fig. 2.8).

| N.º DE ELEMENTO | N.º DE PIEZA | CANTIDAD |
|-----------------|---------------------|----------|
| 1 | motor | 1 |
| 2 | sprocket-motor | 1 |
| 3 | Cadena | 1 |
| 4 | Neumático 4.10/3.50 | 1 |
| 5 | sprocket-eje-rueda | 1 |
| 6 | eje rueda | 1 |

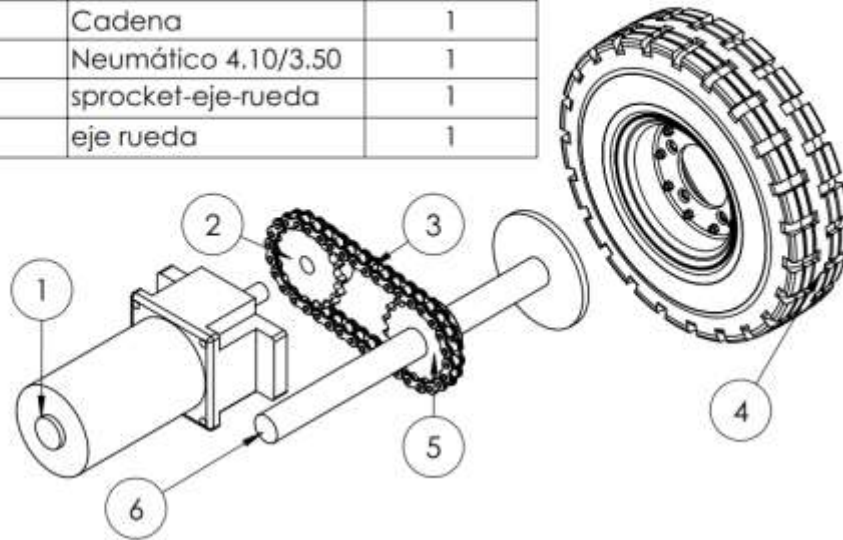


Figura 2.6. Elementos del sistema de transmisión por cadena-piñón de la SRM.

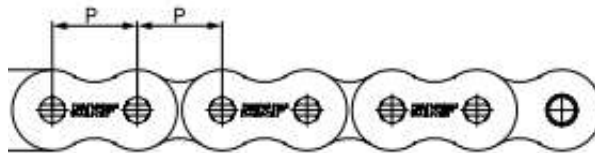


Figura 2.7. Paso de una cadena de transmisión.

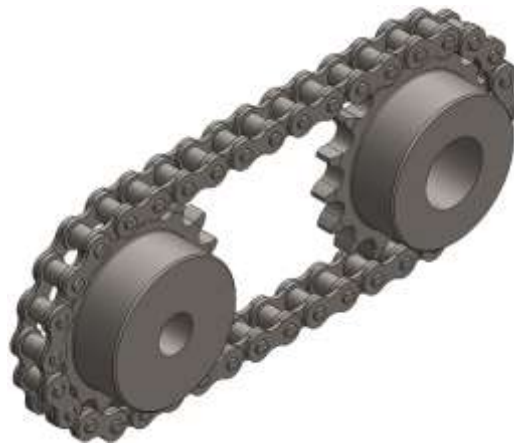


Figura 2.8: Transmisión por cadena-piñón.

Estos sistemas de transmisión son la mejor opción para aplicaciones donde se quiera transmitir grandes pares de fuerza y donde los ejes de transmisión se muevan en un rango de velocidades de giro entre medias y bajas [22], como es el caso de la silla de ruedas.

De esta manera el movimiento rotacional del motor es transmitido al eje de las ruedas (ver Fig. 2.9), esto permite que el peso del mecanismo y del usuario no sean trasferidos directamente al eje del motor, y evita que éste se dañe.

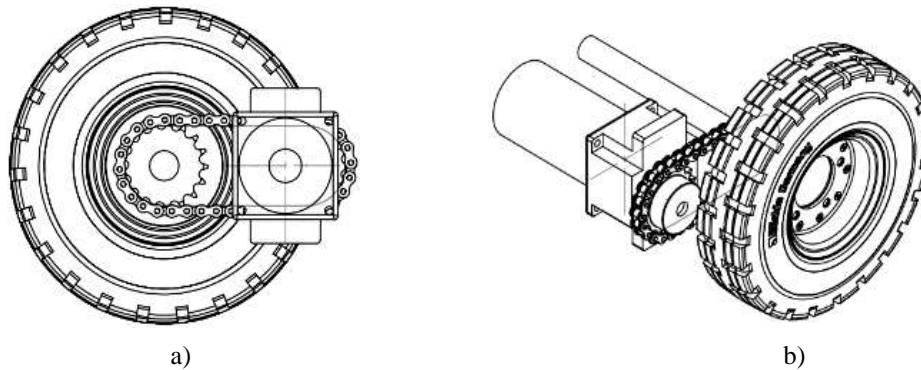


Figura 2.9. Transmisión por cadena-piñón. a) Vista posterior; b) vista isométrica.

El mecanismo es adaptado con 4 chumaceras que permiten soportar y transmitir el peso del sistema y del usuario a la estructura completa y reposar sobre las 4 ruedas, que son los puntos de contacto con la superficie, esto ayuda a que los ejes de las ruedas se dañen en menor proporción y no se flexionen, lo que ocasionaría que las ruedas se separaran y no tendrían el contacto adecuado con la superficie, lo que ocasionaría una trayectoria no deseada. Gracias al sistema de chumaceras implementado que se presenta en la Fig. 2.10, los ejes de las ruedas permanecen alineados, lo que garantiza un correcto movimiento del mecanismo al tener los ejes de ambas ruedas concéntricos.

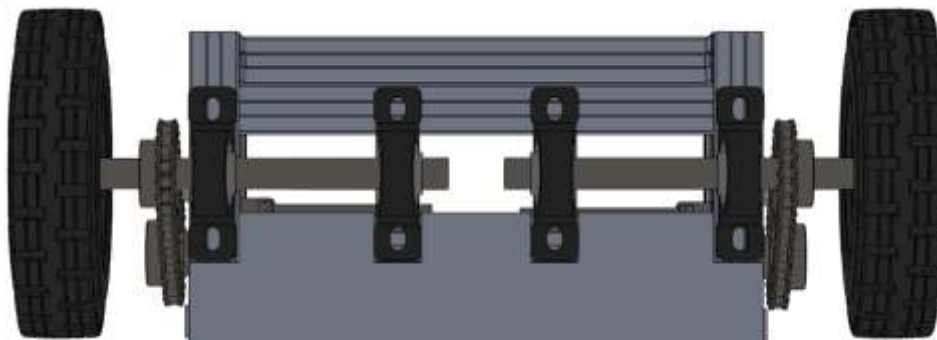


Figura 2.10. Sistema de soporte y alineación mediante 4 chumaceras. Permite transmitir la carga de la SRM a las ruedas y a la estructura, así como mantener los ejes de giro concéntricos.

La implementación de un sistema de transmisión electromotriz de cadena-piñón representa una ventaja para recorrer el centro de masa de toda la estructura del mecanismo, de manera que el peso se encuentre concentrado lo más cerca de la superficie y en la parte media o en la parte frontal de la SRM, con el objetivo de que la distribución del peso de los componentes generen un contrapeso para el usuario, en este caso, el peso de los motorreductores se mueve hacia la parte frontal a través de las cadenas, lo que permite mantener la misma relación de torque y movimiento pero con los motorreductores desplazados.

Esta adecuada distribución de peso tiene fines matemáticos, que se presentan en el capítulo 3, donde se modela matemáticamente el sistema para conocer como las propiedades físicas de la estructura alteran el funcionamiento y comportamiento de la SRM.

Por este motivo los componentes electromecánicos mencionados en la sección 2.3 se distribuyen en la parte frontal del chasis, para que el mecanismo cuente con un contrapeso adecuado generado por la suma del peso de tales componentes y contrarreste lo mejor posible el peso del usuario, esto mejora la estabilidad de la SRM y ayuda a que el mecanismo no se caiga o desequilibre con facilidad al subir o bajar una rampa, ya que al realizar la distribución del peso, el centro de masa se desplaza lo más cercano al punto medio bajo de la estructura. En la Fig. 2.11 y 2.12 se presentan la manera en la que se distribuye el peso de los componentes.



Figura 2.11. Chasis mecánico de la SRM. Se realiza una distribución de los componentes de manera que el peso esté cargado hacia la parte frontal del mecanismo.



Figura 2.12. Chasis de la SRM con una distribución de peso orientada a la parte frontal del mecanismo.

En la Fig. 2.13 se representa el centro de masa calculado con el software SOLIDWORKS de acuerdo a la distribución realizada del peso de los componentes y se observa que se encuentra en la parte inferior del mecanismo y con orientación hacia la parte frontal, que es lo que se busca para compensar el peso del usuario. Las medidas reales del chasis se presentan en el apéndice C.1.

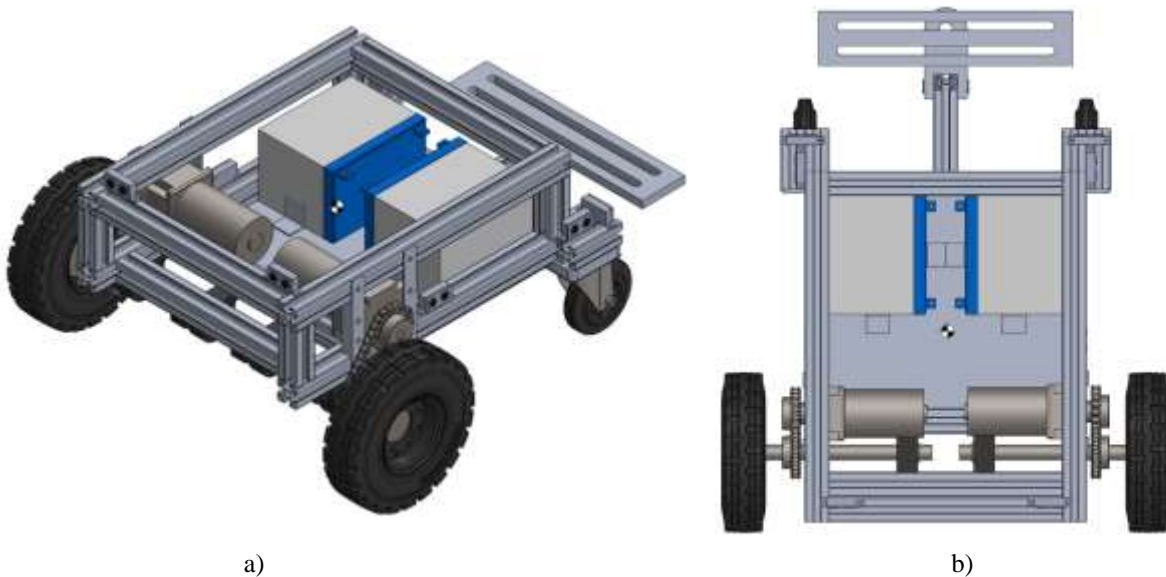


Figura 2.13. Estimación del centro de masa del chasis de la SRM obtenida en el software SOLIDWORKS. a) Vista isométrica. b) Vista superior.

Donde  representa el centro de masa

2.1 Accesorios complementarios de la SRM

Los accesorios que complementan a la SRM son:

- La silla o módulo de asiento.
- Las ruedas.
- Soporte para joystick.
- Reposapiés.
- Cajas para sensores de proximidad.

A continuación se describe el proceso para el diseño y fabricación de cada uno.

2.1.1 La silla o módulo de asiento

Es el elemento encargado de dar un adecuado soporte a la pelvis y al tronco. Sin duda es el elemento más importante, ya que sobre él pasa el paciente muchas horas de su vida. Permite el necesario apoyo del cuerpo, influyendo en el soporte pélvico, el reparto de las presiones, y la estabilidad y control postural.

Ajustes en la posición. El asiento debe estar paralelo al suelo o discretamente más elevado en la parte de enfrente para evitar el deslizamiento hacia delante.

La selección del asiento es de trascendental importancia para brindar la comodidad y requerimientos que el usuario necesita.

Las características que debe cumplir son:

- Poseer una forma anatómica que respete las formas antropométricas del usuario.
- No ser resbaladizo dado que propiciaría la sensación de inestabilidad.
- Poseer una tela que sea confortable al usuario.
- Debe ser acolchado.
- Agradable al tacto y contacto corporal.
- Poseer cambios de posición tanto para el frente como para la parte posterior (opcional).

El asiento que se emplea es un asiento deportivo de automóvil, que con base en la experiencia de conducción de la SRM, proporciona altas prestaciones de confort, lo que asegura que cumple con las medidas necesarias para la fabricación de asientos y los criterios de los estándares de ergonomía, además de garantizar los correctos ángulos de inclinación lo

que permite una posición adecuada del usuario en la silla. El asiento se adaptó con reposabrazos a la altura adecuada conforme a la experiencia del usuario y a las medidas estándares del diseño concurrente de SRM. En la Fig. 2.14 se presenta el diseño del asiento implementado:



Figura 2.14. Representación del asiento deportivo de automóvil diseñado en SOLIDWORKS.

2.1.2 Las ruedas

Proporciona el sistema de locomoción y el medio que le permite trasladarse. No es lo mismo una silla para estar por casa, que una silla para la ciudad o una silla para hacer deportes. Aunque existen varias posibilidades de elección o adaptación, casi todas las sillas tienen: dos ruedas grandes de tracción (motrices) y dos ruedas pequeñas de dirección (conjunto direccional). Para el diseño de la SRM desarrollada en esta tesis se implementan neumáticos de aire para las ruedas motrices, con la finalidad de que absorban los impactos y otorguen mayor comodidad al usuario. En la tabla 2.1 se mencionan las características principales de los neumáticos y en la Fig. 2.15 se observa la representación de éste.

Tabla 2.1. Características principales de los neumáticos de tracción para la SRM.

| | |
|--------------------|--------|
| D. exterior | 10 in |
| Presión | 30 PSI |
| Capacidad de carga | 130 kg |



Figura 2.15. Representación de rueda de caucho diseñada en SOLIDWORKS.

Para las ruedas delanteras de soporte se utilizan ruedas caster o de castor con la finalidad de obtener un movimiento en todas las direcciones que el usuario desee. Son ruedas de neopreno de 5 pulgadas de diámetro, ofrecen las ventajas de las ruedas duras y suaves en una sola. Como una rueda dura, ésta se desplaza muy fácilmente y es muy durable. Como una rueda suave, rueda muy silenciosa y resiste impactos, amortiguando sus cargas. En la Fig. 2.16 se presenta el diseño.



Figura 2.16. Diseño de la rueda de castor delantera para soporte y distribución del peso de la SRM. a) Vista izquierda. b) Vista isométrica.

2.1.3 Soporte del joystick

Se diseña el soporte en perfil estructural de aluminio que funciona como una extremidad para empotrar la caja en la que va montada el joystick. Esta extremidad va fijada a la base o chasis para que tenga un mayor soporte, ya que el joystick está en constante movimiento y expuesto a la presión que ejerce el brazo del usuario sobre éste y la fuerza con la que él lo mueva. Se toman en cuenta las medidas adecuadas para tener una altura y separación ideal con respecto al reposa brazos. En la Fig. 2.17 se presenta el diseño del mecanismo explosionado.

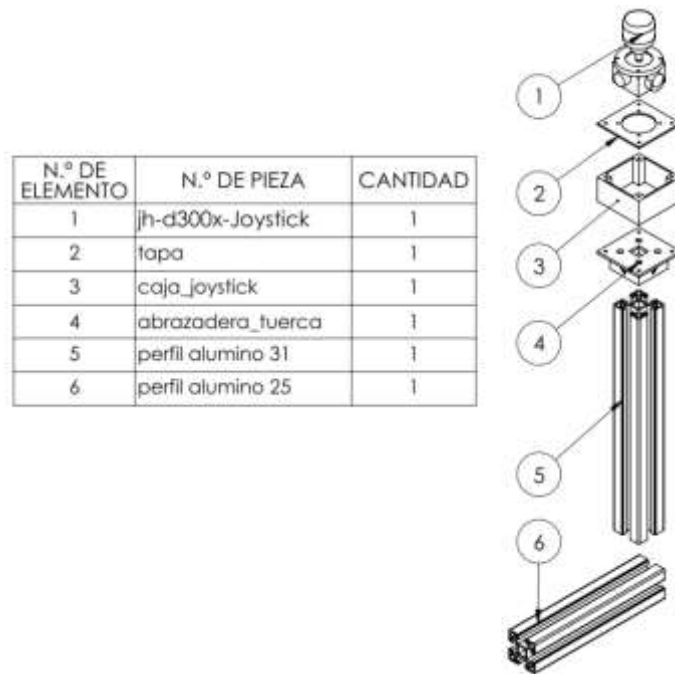


Figura 2.17. Diseño de soporte para montar el joystick de la SRM.

Para fijar el joystick al soporte, es necesario diseñar una caja que de un lado permita ensamblarse y fijarse con el perfil de aluminio, y del otro lado mantener al joystick empotrado sin que la base de éste se mueva. En la Fig. 2.18 se presenta el diseño de la caja que adapta al joystick al soporte metálico.



Figura 2.18. Diseño de caja que permite el ensamble del joystick hacia la estructura de aluminio.

De esta manera es posible fijar el joystick a la estructura metálica y tener el soporte adecuado para los movimientos que se ejercen sobre éste. En la Fig. 2.19 a) se presenta la caja ensamblada con el joystick y en la Fig. 2.19 b) se presenta la unión de la base metálica con la caja y el joystick.

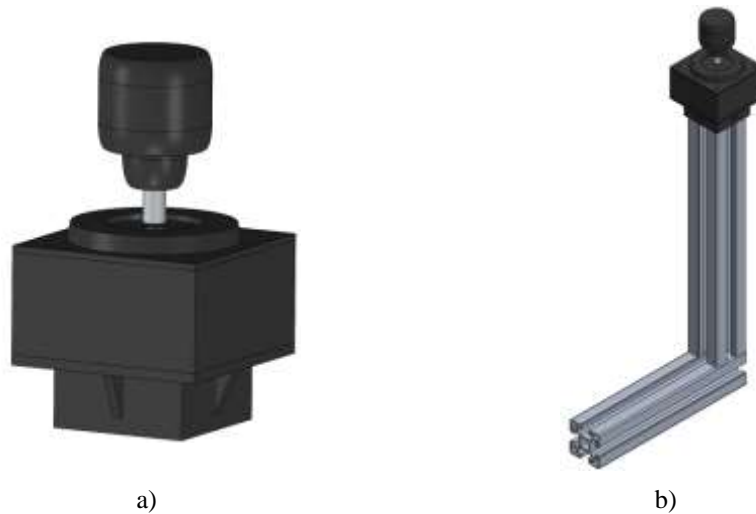


Figura 2.19. Diseño de la estructura para soportar y fijar el joystick. a) Ensamble de caja con joystick. b) Ensamble completo del joystick con la base metálica.

El perfil de aluminio facilita el cableado del sistema debido a la estructura hueca que tiene en su centro.

2.1.4 Reposapiés

El reposapiés está diseñado con una placa rectangular de aluminio con ranuras rectas en su centro para disminuir el peso. Se prefirió elegir una pieza rectangular que abarque gran parte del ancho total de la SRM para fines de comodidad del usuario, debido a que existen SRM en el mercado que cuentan con reposapiés pequeños que obligan al usuario a estar en una sola posición o que reduce su rango de movimiento corporal, de esta forma se cubre un mayor panorama para asentar los pies, en la Fig. 2.20 se presenta una imagen explosionada del mecanismo.

El mecanismo del reposapiés está basado en el funcionamiento de una bisagra, cuenta con una abrazadera que se une a un perfil de aluminio a través de un perno que atraviesa ambas piezas (ver Fig. 2.21 a)), sobre esta abrazadera se empotra el reposapiés (ver Fig. 2.21 b)) y de esta manera el mecanismo puede variar su inclinación (ver Fig. 2.22).

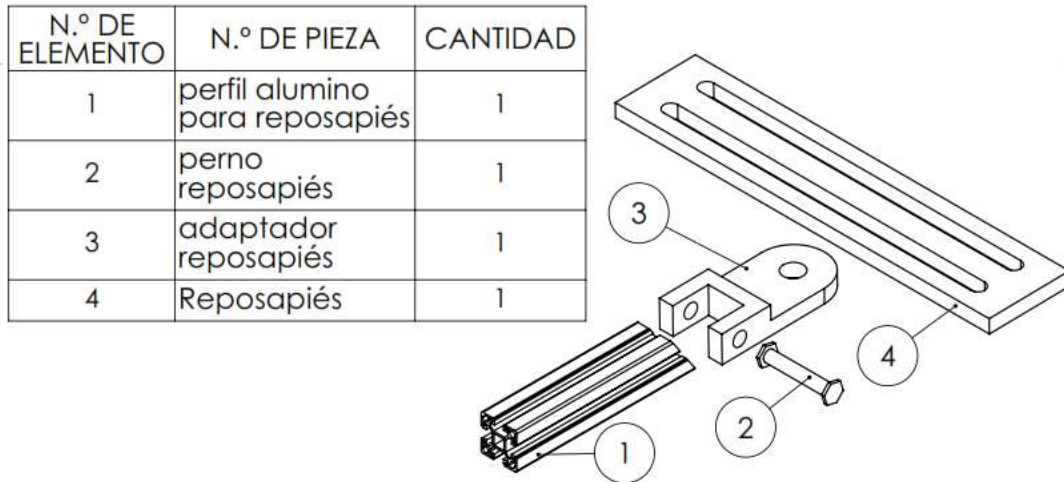


Figura 2.20. Vista explosionada del mecanismo para el reposapiés de la SRM.

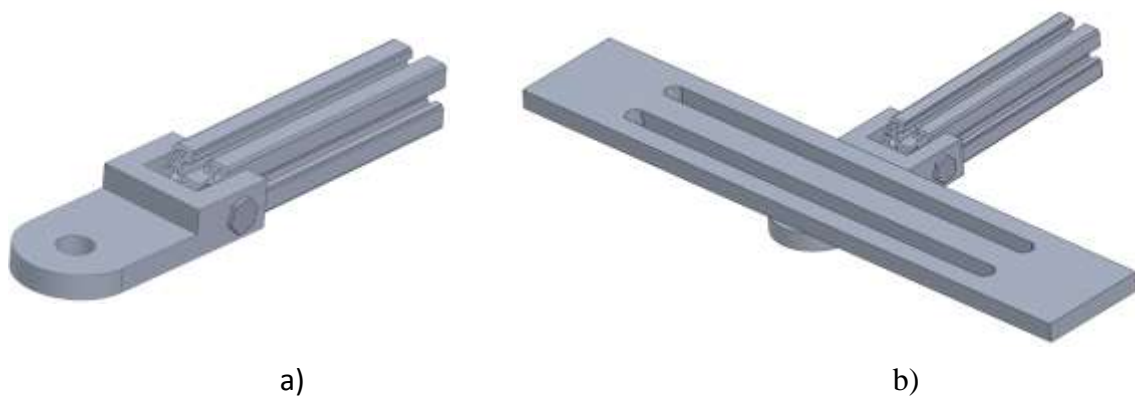


Figura 2.21. Diseño del mecanismo para soportar el reposapiés. a) Mecanismo que simula el movimiento de una bisagra. b) Reposapiés ensamblado al mecanismo.



Figura 2.22. Ángulos de movimiento del reposapiés.

2.1.5 Sensor de obstáculos

La SRM está equipada con sensores ultrasónicos para la detección de obstáculos, que evitan que la silla se dañe por colisión o dañar a un tercero. Para acondicionar la SRM con estos sensores es necesario realizar el diseño de una carcasa que permita almacenar en su interior dichos sensores y al mismo tiempo poder ser fijados en la estructura de la silla.

Se diseña una carcasa en 2 piezas, una caja donde se introduce el sensor y la tapa para protegerlo del exterior. Las piezas son diseñadas para imprimirse en plástico PLA en una impresora 3D. La caja cuenta con cejillas para atornillarse a la estructura metálica de la SRM, ranuras en su interior para los tornillos que fijan la tapa y el sensor y una ranura que permite el cableado del sensor (ver Fig. 2.23 a)).

La tapa (ver Fig. 2.23 b)) está diseñada con 2 orificios para que los elementos de transmisión y recepción del sensor estén cubiertos a su alrededor pero que permita su óptimo funcionamiento y 2 orificios para ensamblarse con la caja y el sensor (ver Fig. 2.24).

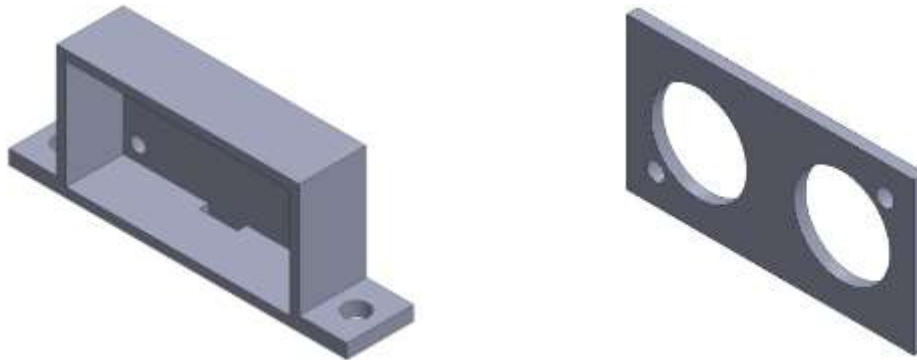


Figura 2.23. Diseño de la carcasa para sujeción del sensor y fijación a la estructura. a) Caja para almacenar el sensor ultrasónico. b) Tapa de protección.

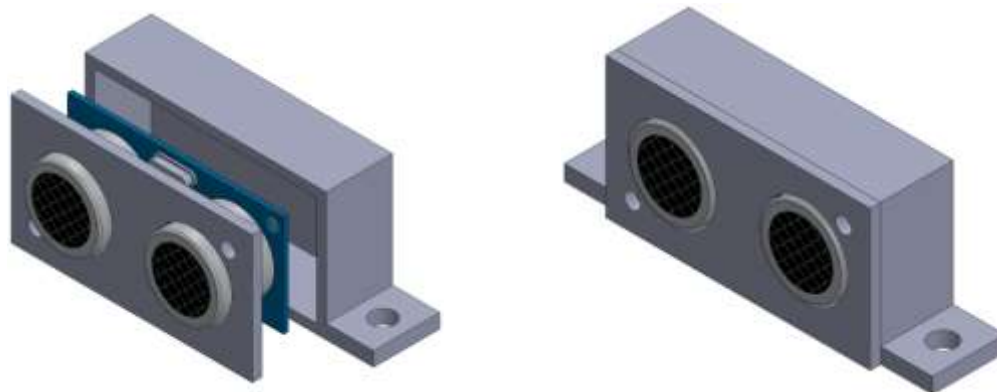


Figura 2.24. Ensamble de la carcasa de protección con el sensor ultrasónico.

En la Fig. 2.25 se presenta el ensamble final de la SRM con todos los elementos descritos en la sección 2.1.



Figura 2.25. Diseño final del ensamble de la SRM

2.2 El sistema electromecánico

Dentro de este sistema se encuentran los elementos encargados del movimiento de la silla de ruedas, los elementos que suministran la energía eléctrica necesaria para movilizar el mecanismo, así como los elementos que convierten la energía eléctrica a energía mecánica. Las partes principales de este sistema son:

2.2.1 Motores

Todos sabemos que el motor eléctrico es una máquina que transforma energía eléctrica recibida de la red en energía mecánica rotacional en el eje [23]. El motor da la potencia necesaria para movilizar a la SRM, lo que hace que su elección sea de mucha importancia, ya que de ellos depende en parte el tiempo de vida y durabilidad de la silla, así como permite maniobrar por diferentes entornos o superficies a la SRM. Para movilizar el sistema mecánico considerando el peso del mecanismo mencionado en el capítulo 1, se eligieron motores de corriente directa con número de parte Z5D120-12 (ver Fig. 2.26), en la tabla 2.2 se mencionan los parámetros de rendimiento del motor:

Tabla 2.2. Parámetros de rendimiento de motor CD Z5D120-12.

| <i>Voltaje</i> | <i>Potencia</i> | Parámetros sin carga | | Parámetros con carga | | | Peso |
|----------------|-----------------|-----------------------------|------------------|-----------------------------|---------------|------------------|-------------|
| | | <i>Velocidad</i> | <i>Corriente</i> | <i>Velocidad</i> | <i>Torque</i> | <i>Corriente</i> | |
| V | W | r/min | A | r/min | mNm | A | kg |
| 12 | 120 | 3100 | 2.0 Max. | 2500 | 458 | 10 | 2.2 |

2.2.2 Reductor

Los Reductores ó Motorreductores son apropiados para el accionamiento de toda clase de máquinas y aparatos de uso industrial, que necesitan reducir su velocidad en una forma segura y eficiente. Al emplear reductores se obtiene una serie de beneficios:

- Una regularidad perfecta tanto en la velocidad como en la potencia transmitida.
- Una mayor eficiencia en la transmisión de la potencia suministrada por el motor.
- Mayor seguridad en la transmisión, reduciendo los costos en el mantenimiento.
- Menor espacio requerido y mayor rigidez en el montaje.
- Menor tiempo requerido para su instalación.

Los reductores acoplados a los motores tienen una relación de transmisión 9:1, con número de parte 5GU9KB lo que amplifica el torque a la salida del motor y reduce la velocidad. En la tabla 2.3 se presentan las características mecánicas del reductor (ver Fig. 2.26).

Tabla 2.3. Parámetros mecánicos del reductor 5GU9KB.

| | |
|------------------------|-------|
| Gear Ratio | 9 |
| Velocidad (rpm) | 277.7 |
| Torque (Nm) | 3.3 |



Figura 2.26. Motorreductor Z5D120-12GU/5GU9KB.

Ahora al ensamblar ambos sistemas se obtiene un motorreductor que entrega a su salida una velocidad nominal de 277.7 rpm. El estándar de velocidad en las SRM comerciales

según los fabricantes es de aproximadamente $2.45 \frac{m}{seg}$ o $8.82 \frac{km}{h}$ [24]. Ahora se realizará el cálculo de la velocidad que puede alcanzar la SRM con la selección del Motorreductor anterior. Como se seleccionó una rueda de 10 pulgadas de diámetro exterior D_1 , se obtiene el siguiente avance por vuelta o perímetro:

$$L = \pi D_1, L = 31.415 \frac{in}{rev} = 0.798 \frac{m}{rev}. \quad (1)$$

Conociendo el avance de la rueda por cada revolución y teniendo la velocidad a la salida del reductor con carga (277.7 rpm) se puede estimar la velocidad que tendrá la SRM:

$$277.7 \frac{rev}{min} = 16,662 \frac{rev}{h} \rightarrow v = 13.3 \frac{km}{h}. \quad (2)$$

2.2.3 Baterías

Son compactas, recargables e intercambiables. Es la parte más pesada (10 Kg) y cara de una SRM, teniendo una vida media de dos años.

La duración o autonomía se suele expresar en tiempo (3-4 h), y a veces en km de recorrido. Dependiendo de multitud de factores: Distancia recorrida, uso de los dispositivos adicionales como luces, bocina y sistemas de controles secundarios (alarmas, ordenadores).

El parámetro más importante a la hora de especificar una batería industrial es la capacidad nominal. Para obtener una buena autonomía del sistema, y con base en los rangos de alimentación y consumo de energía de los motores.

Considerando que el tiempo efectivo de movilización del usuario sea de 4 horas por día y basándose en las especificaciones de autonomía de los fabricantes, se tiene [25]:

$$C = IT. \quad (3)$$

Con

C= Capacidad nominal de la batería (Ah o Coulombs).

I= Corriente de descarga expresada en A.

T= Tiempo de descarga expresada en horas.

Los motores con carga consumen 10 A. cada uno aproximadamente, entonces para que el sistema tenga una autonomía adecuada se realiza el siguiente cálculo:

$$C = 20A(4h) = 80 Ah$$

Se eligen dos baterías recargables selladas de ácido-plomo Power Sonic PS-12350 NB que suministran 12 Voltios y 35 Ah cada una (ver Fig. 2.27) las cuales se conectarán en configuración paralela para mantener el voltaje y tener una capacidad nominal total de 70 Ah. Se calcula el tiempo de descarga con las baterías seleccionadas:

$$T = \frac{C}{I} = \frac{70Ah}{20A} = 3.5 h$$

El tiempo de autonomía de la silla de ruedas será de aproximadamente 3.5 horas.



Figura 2.27. Batería Power Sonic 12 V, 35 AH.

2.3 Conclusiones

El diseño mecánico de la SRM es de fundamental importancia, ya que el tiempo de vida del mecanismo depende de éste, así como el buen desempeño del mecanismo, su robustez, rigidez y tolerancia a fuerzas estáticas o dinámicas, lo que caracterizarán al mecanismo, como un sistema apto para el uso continuo y seguro.

La implementación de perfil estructural de aluminio permite un ensamble ligero y adaptativo, es decir, en caso de querer variar alguna dimensión o longitud es posible recorrer las piezas sobre los rieles del perfil sin necesidad de cortarla, ya que cuenta con tornillos tipo “T” y con escuadras para el ensamble del mecanismo, únicamente para propósitos de diseño y observación del comportamiento, una vez que se tiene la medida ideal se ajusta la pieza y para zonas de alto esfuerzo se implementan tornillos pasados, para darle una rigidez y resistencia mayor.

La distribución de la estructura mecánica y de su masa, se diseñó con el fin de tener un centro de masa lo más abajo posible, lo que permite una maniobrabilidad mayor en escenarios externos donde se presentan desniveles, así como un mejor control y estabilidad.

La selección de los componentes electromecánicos juega un papel sumamente importante, ya que éstos determinarán el tiempo de autonomía del mecanismo, así como las características de movilidad y un buen desempeño.

Capítulo 3

3 Modelado del robot móvil diferencial (RMD)

En esta sección la SRM se modela matemáticamente; para abordar propiamente el tema, se hará referencia a la SRM como un robot móvil con diferencial (RMD), de acuerdo a la terminología expresada en la literatura.

El estudio de la temática del control en robots móviles ha sido de gran impacto, ya que responde a la extensión del campo de aplicación de la robótica. Desde un simple control de posicionamiento hasta un seguimiento de trayectoria de forma autónoma, para que el sistema tenga la capacidad de adaptarse a tareas no específicas o únicas, ya que actualmente no están limitadas a un espacio de trabajo predefinido, a diferencia de los robots manipuladores que son robots fijos en su base. Se pueden desarrollar nuevas tecnologías al implementar sistemas no sedentarios que tengan la tecnología necesaria para completar una navegación autónoma.

Un objetivo fundamental de la robótica móvil es responder a cómo podemos hacer que los robots puedan convivir, coexistir y cooperar con el ser humano en el futuro. Los robots móviles orientados a la medicina, a las áreas de la salud y a las discapacidades físicas del ser humano tienen un amplio espectro de aplicación. Aunado a esto, los robots deben de presentar la característica de tener un control robusto para evitar fallas en todo momento, tener una buena reacción, la reacción en robótica tiene que ver con conservar el equilibrio, usar los reflejos y la fuerza. En caso de robots móviles de rescate o de asistencia paramédica el robot no debe de patinar o caer si tiene que forcejear cuando encuentre a una persona que necesita ayuda, por ejemplo un anciano caído o una persona en situación de rescate.

Se entiende por modelo geométrico del robot la relación entre los valores de las variables asociadas a las articulaciones del robot y la situación (posición y orientación) de un sistema de referencia, solidario al robot, que se define teniendo en cuenta la tarea que se pretende desarrollar con el robot. En un robot manipulador, este sistema suele elegirse asociado al efector final del robot, con lo cual se trata de estudiar la relación entre las variables articulares y la posición y orientación de efector final con relación a la base del robot.

En vehículos robóticos, el sistema de referencia se elige normalmente asociado al punto de guía deseado [26].

Se desarrolla la cinemática directa del robot para conocer el punto en el que éste se encuentra en el espacio y posteriormente se realiza la dinámica del robot móvil mediante el método de ecuaciones de movimiento de Lagrange.

3.1 Cinemática

La cinemática es la parte de la física que aborda el problema de la descripción geométrica del movimiento de sistemas mecánicos sin tomar en cuenta las fuerzas que lo producen [27]. En estos términos, se considera, además del problema puramente geométrico involucrado en el posicionamiento estático, las variaciones en el tiempo de las posiciones y orientaciones; es decir, las velocidades.

En los modelos geométricos y cinemáticos se involucra esencialmente el estudio de las relaciones existentes entre el espacio de las variables articulares y el espacio de trabajo, o espacio operacional, que suele ser un espacio cartesiano [26].

3.2 Cinemática directa

El estudio de la cinemática directa de robots manipuladores industriales proporciona elementos para analizar y diseñar el desplazamiento de trayectorias del robot, así como la orientación de la herramienta de trabajo (sin tomar en cuenta las fuerzas que originan dicho movimiento). Dependiendo del tipo de articulaciones que se encuentran incluidas en la estructura mecánica del robot (lineales o rotacionales).

El posicionamiento del robot (pose) en el espacio tridimensional requiere de 6 coordenadas: 3 coordenadas para su posición cartesiana y 3 coordenadas para la orientación de la herramienta de trabajo [27]. En manipuladores planares, o en robots móviles que navegan en el plano, bastaría con un espacio de dimensión de tres para especificar la posición y el ángulo de orientación [26]. La relación entre las coordenadas articulares con las coordenadas cartesianas y su orientación, tomando en cuenta las propiedades geométricas del sistema mecánico del robot se denomina cinemática directa [27].

La cinemática directa de robots se refiere al estudio analítico del movimiento del robot con respecto a un sistema de referencia cartesiano fijo $\Sigma(x, y, z)$ relacionando la dependencia que existe entre las coordenadas articulares o generalizadas $\mathbf{q} \in \mathbb{R}^n$, sus parámetros geométricos y las coordenadas cartesianas $[x, y, z]^T \in \mathbb{R}^3$ y de orientación $[\theta, \phi, \psi]^T \in \mathbb{R}^3$ del robot.

Las coordenadas cartesianas resultan un medio natural para ser correctamente interpretadas para un mejor entendimiento del posicionamiento del robot, la cinemática directa realiza la función de convertir coordenadas articulares a coordenadas cartesianas.

3.2.1 Matrices de rotación

La matriz R_0^1 representa la orientación del sistema $\Sigma_1(x_1, y_1, z_1)$ respecto al sistema $\Sigma_0(x_0, y_0, z_0)$. R_1^2 representa la orientación del sistema $\Sigma_2(x_2, y_2, z_2)$ respecto al sistema $\Sigma_1(x_1, y_1, z_1)$, y así sucesivamente. Mientras que la transformación inversa R_1^0 significa la orientación del sistema de referencia relativa al sistema de referencia relativa al sistema de referencia $\Sigma_1(x_1, y_1, z_1)$. De manera análoga, R_2^1 es la transformación inversa de coordenadas del sistema de referencia $\Sigma_1(x_1, y_1, z_1)$ hacia el sistema $\Sigma_2(x_2, y_2, z_2)$ [27].

3.2.2 Matriz de rotación alrededor del eje Z_0

Considere que el sistema de referencia $\Sigma_1(x_1, y_1, z_1)$ (ver Fig. 3.1) el cual se encuentra rotado un ángulo θ alrededor del eje Z_0 del sistema $\Sigma_0(x_0, y_0, z_0)$. Obtener la matriz resultante de transformación R_0^1 .

Como se muestra en la figura 1, los ejes Z_0 y Z_1 son paralelos. El signo del ángulo θ esta dado por la regla de la mano derecha. Por convención, un ángulo positivo es aquel cuyo sentido de rotación es contrario al movimiento de las manecillas del reloj.

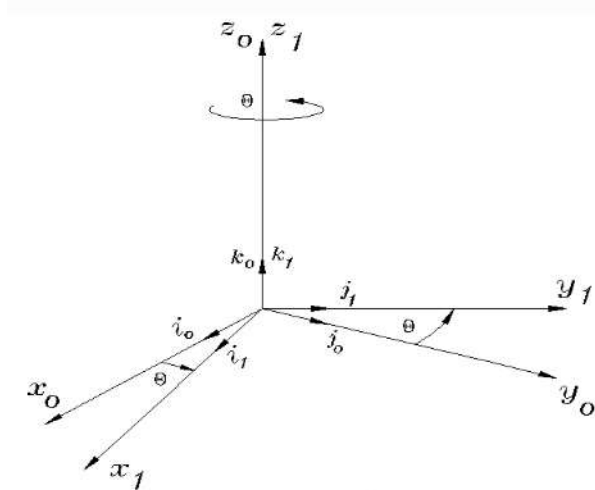


Figura 3.1. Rotación alrededor del eje z.

Los ejes z_0 y z_1 coinciden entre sí, y el plano $x_1 - y_1$ se desplaza un ángulo θ de derecha a izquierda con respecto al plano $x_0 - y_0$.

Notación:

La siguiente matriz se conoce como matriz de rotación alrededor del eje z y es representada por $R_z(\theta)$:

$$\begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\text{sen}(\theta) & 0 \\ \text{sen}(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

La matriz de rotación $R_z(\theta)$ se interpreta como una matriz que especifica la orientación del sistema de referencia $\Sigma_1(x_1, y_1, z_1)$ relativo al sistema de referencia $\Sigma_0(x_0, y_0, z_0)$. Por convención considérese que el ángulo θ es positivo en el sentido contrario al movimiento de las manecillas del reloj [27].

3.3 Análisis del modelo cinemático

En esta sección la SRM se modela matemáticamente, para abordar propiamente el tema, se hará referencia a la SRM como un robot móvil con diferencial (RMD), de acuerdo a la terminología expresada en la literatura.

Considerando que un RMD es un robot que debe moverse sobre una superficie mediante la acción de ruedas montadas en él, se asumen las siguientes hipótesis:

- El robot móvil se mueve sobre una superficie plana horizontal, es decir la energía potencial es constante.
- Los ejes de guiado son perpendiculares al suelo.
- No existen elementos flexibles en la estructura del robot, incluyendo las ruedas.
- El movimiento se realiza alrededor de un arco de circunferencia.
- El contacto entre cada rueda y el suelo se reduce a un solo punto.
- No existe deslizamiento.

De acuerdo con las hipótesis anteriores, se aborda el caso bidimensional debido a que el robot se mueve en un plano, así el problema se reduce a encontrar la terna (x, y, θ) asociada al sistema de referencia móvil del vehículo [28].

Es necesario definir un sistema de referencia en el cual se moverá el robot. Se establece un sistema coordenado inercial de referencia arbitrario el cual está fijo O , en el plano de movimiento, mientras que el punto de referencia denotado por A se define como el punto medio sobre el eje entre las ruedas y es el origen del sistema coordenado del robot $\Sigma_A(x_a, y_a, \theta)$, como se presenta en la Fig. 3.2.

El punto CM es el centro de masa del robot y se encuentra desplazado una distancia d sobre el eje de simetría. La posición del robot en cualquier punto del marco inercial queda completamente especificada por:

$$q = \begin{bmatrix} x_a \\ y_a \\ \theta \end{bmatrix}, \quad (5)$$

donde las dos primeras componentes corresponden a la traslación y la tercera a la orientación del robot móvil con respecto al eje coordenado fijo O .

Para conocer la orientación que existe entre el sistema de referencia fijo $\Sigma O(x_I, y_I, \theta_I)$, relativo al sistema de referencia móvil $\Sigma A(x_a, y_a, \theta)$ o viceversa, se definen las siguientes relaciones respectivamente:

$$\Sigma O = R(\theta)\Sigma A \text{ y } \Sigma A = R^T(\theta)\Sigma O. \quad (6)$$

donde $R(\theta)$ es una matriz de rotación de 3×3 , alrededor del eje z definida en (4) [29]. Esta transformación permite también el manejo del movimiento entre los sistemas de referencia:

$$\dot{O} = R(\theta)\dot{\Sigma A} \text{ y } \dot{\Sigma A} = R^T(\theta)\dot{O}. \quad (7)$$

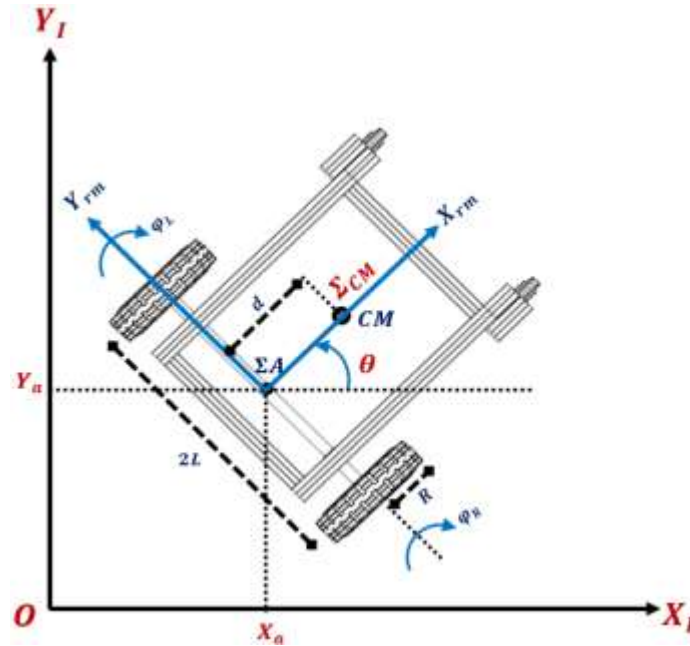


Figura 3.2. Coordenadas de la postura del robot móvil. Se denota el sistema coordenado inercial por O , y el sistema coordenado del robot con A .

3.3.1 Restricciones cinemáticas de un robot móvil diferencial

El sistema de direccionamiento diferencial usado en múltiples robots es esencialmente el mismo arreglo que es usado en una silla de ruedas. En la referencia [30] se muestra que existen restricciones cinemáticas en el espacio de trabajo de los robots móviles. Si una ecuación de restricción está en la forma $C(q, \dot{q}) = 0$ o puede ser integrado en esta forma, es una restricción holonómica. De lo contrario, es una restricción cinemática (no geométrica) y se denomina no holonómica [31].

El movimiento de un robot móvil diferencial (RMD) está caracterizado por 2 restricciones no holonómicas, las cuales son obtenidas por dos hipótesis principales [32]. La restricción no holonómica establece que el robot sólo puede moverse en la dirección normal al eje de las ruedas motrices. Se establece que el contacto entre la rueda y la superficie satisface ambas condiciones (ver Fig. 3.3), la de rodamiento puro y no deslizamiento [33].

- *No existe movimiento de deslizamiento lateral*: Esta restricción significa que el robot puede moverse únicamente en trayectorias curvas (hacia adelante o hacia atrás) pero el movimiento hacia los lados o lateral es imposible de realizar. En el marco del robot, esta condición significa que la velocidad del punto central **A** es cero a lo largo el eje lateral:

$$y_a = 0. \quad (8)$$

Empleando la ec. (7) para conocer la relación de la velocidad entre los marcos del sistema, y conocer la velocidad desde el marco inercial **O** se tiene:

$$\dot{O}_y = R(\theta)\dot{\Sigma}A_y = -\dot{x}_a \sin \theta + \dot{y}_a \cos \theta = 0. \quad (9)$$

Condición de rodamiento puro sin deslizamiento: cada una de las ruedas mantiene un único punto (**P**) de contacto con la superficie como se denota en la Fig. 3.3 No existe deslizamiento ni derrape en los puntos de contacto sobre el eje longitudinal (x_a). En la referencia [34] se muestra que la velocidad en la rueda motriz derecha, así como en la izquierda está dada por las siguientes ecuaciones respectivamente:

$$\begin{aligned} V_{PR} &= R\dot{\phi}_R, \\ V_{PL} &= R\dot{\phi}_L. \end{aligned} \quad (10)$$

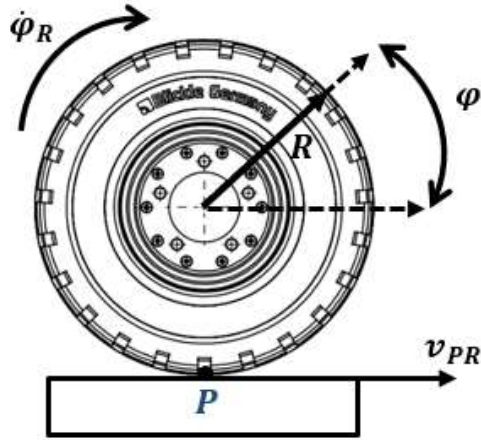


Figura 3.3. Restricción de rodadura pura. Cada rueda mantiene un solo punto de contacto “P” con la superficie.

Observando la Figura 3.2 y tomando en cuenta los puntos de contacto en cada rueda, en el marco inercial O se puede calcular geoméricamente las componentes de las velocidades de cada rueda en esos puntos, en función de las velocidades del punto central A del robot:

$$\begin{aligned} \dot{x}_{PR} &= \dot{x}_a + L\dot{\theta} \cos \theta, & \dot{y}_{PR} &= \dot{y}_a + L\dot{\theta} \sin \theta, \\ \dot{x}_{PL} &= \dot{x}_a - L\dot{\theta} \cos \theta, & \dot{y}_{PL} &= \dot{y}_a - L\dot{\theta} \sin \theta. \end{aligned} \quad (11)$$

Se aplican las matrices de rotación, ecuación (7) en ecuación (10), para conocer las velocidades vistas desde el marco inercial O :

$$\begin{aligned} \dot{x}_{PR} \cos \theta + \dot{y}_{PR} \sin \theta &= R\dot{\phi}_R, \\ \dot{x}_{PL} \cos \theta + \dot{y}_{PL} \sin \theta &= R\dot{\phi}_L. \end{aligned} \quad (12)$$

Para asociarlas con la primera restricción de movimiento, se sustituyen los valores de la ec. (11) en la ec. (12):

$$\begin{aligned} \dot{x}_a \cos \theta + \dot{y}_a \sin \theta + L\dot{\theta} - R\dot{\phi}_R &= 0, \\ \dot{x}_a \cos \theta + \dot{y}_a \sin \theta - L\dot{\theta} - R\dot{\phi}_L &= 0. \end{aligned} \quad (13)$$

Consideramos que todas las restricciones de igualdad cinemática son independientes del tiempo, y pueden expresarse de la siguiente manera [33]:

$$\Lambda(q)\dot{q} = 0 \quad (14)$$

donde:

$$\Lambda(q) = \begin{bmatrix} -\sin \theta & \cos \theta & 0 & 0 & 0 \\ \cos \theta & \sin \theta & L & -R & 0 \\ \cos \theta & \sin \theta & -L & 0 & -R \end{bmatrix}, \quad (15)$$

representa la matriz asociada con las restricciones cinemáticas, mientras que \dot{q} es el vector de velocidades en las coordenadas generalizadas.

$$\dot{q} = [\dot{x}_a \quad \dot{y}_a \quad \dot{\theta} \quad \dot{\phi}_R \quad \dot{\phi}_L]^T. \quad (16)$$

3.4 Modelo de la cinemática directa del RMD

Para conocer la postura final del robot q , estamos interesados en cómo las coordenadas del punto central del robot (x_a, y_a, θ) , cambian con respecto del tiempo.

Para un robot móvil de configuración diferencial, está ampliamente documentado que el modelo cinemático diferencial está representado mediante distintas estructuras como se muestra en la ecuación (19) y se emplea la que más convenga para fines de la dinámica del sistema.

Se define:

$$v = \frac{v_R + v_L}{2} = \frac{R(\dot{\phi}_R + \dot{\phi}_L)}{2}, \quad (17)$$

$$\omega = \frac{v_R - v_L}{2L} = \frac{R(\dot{\phi}_R - \dot{\phi}_L)}{2L}. \quad (18)$$

Donde v es la velocidad lineal del robot y ω es la velocidad angular. La cinemática diferencial se determina a partir de las ecuaciones (17) y (18) (ecuaciones de movimiento) como se demuestran en [35], y se expresa de la siguiente manera [36]:

$$\dot{q} = \begin{bmatrix} \dot{x}_a \\ \dot{y}_a \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{R}{2} \cos \theta & \frac{R}{2} \cos \theta \\ \frac{R}{2} \sin \theta & \frac{R}{2} \sin \theta \\ \frac{R}{2L} & -\frac{R}{2L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\phi}_R \\ \dot{\phi}_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 \\ \sin \theta & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} \quad (19)$$

Sustituyendo las ecuaciones (17) y (18) en la ecuación (19) e integrando con respecto del tiempo y con condiciones iniciales: $x(0) = x_0$, $y(0) = y_0$, $\theta(0) = \theta_0$, obtenemos la cinemática directa del robot móvil:

$$\begin{aligned}x_a(t) &= x_0 + \frac{L(v_R + v_L)}{(v_R - v_L)} \left[\sin\left(\frac{v_R - v_L}{2L}t + \theta_0\right) - \sin\theta_0 \right], \\y_a(t) &= y_0 - \frac{L(v_R + v_L)}{(v_R - v_L)} \left[\cos\left(\frac{v_R - v_L}{2L}t + \theta_0\right) - \cos\theta_0 \right], \\ \theta(t) &= \theta_0 + \frac{(v_R - v_L)}{2L}t.\end{aligned}\tag{20}$$

3.5 Teoría y ecuaciones de Lagrange para sistemas no holonómicos

Se denominan Coordenadas Generalizada a un conjunto de $n \leq 3N$ variables q_i ($i=1,2,3,\dots,n$) con las cuales es posible, para cualquier instante de tiempo t , describir la configuración de un sistema de partículas dado.

Estas coordenadas deben ser finitas, univaluadas, continuas y diferenciables con respecto al tiempo t . Son llamadas también, en algunos textos, Coordenadas Lagrangianas.

Las coordenadas generalizadas poseen las siguientes ventajas:

1. Pueden englobar en su propia elección las ligaduras del sistema (todas o al menos una parte de ellas). De esta forma se consigue una doble ventaja:
 - a) El número de coordenadas es menor que el correspondiente directamente a las coordenadas $x_{i,\alpha}$ de todas las partículas.
 - b) El número de ecuaciones de ligadura y el número de ecuaciones necesarias i ; para describir el sistema se ve igualmente reducido.
2. La introducción de las coordenadas generalizadas obedece al hecho de, que en muchos sistemas físicos formados por un número N de partículas no es necesario conocer, en cada instante, las coordenadas de posición de todas y cada una de ellas. Las coordenadas generalizadas se refieren al sistema como un todo y no individualmente a cada una de sus partículas.
3. Pueden ser de variada naturaleza e inhomogéneas en cuanto a dimensiones, sólo se exige que puedan describir completamente el sistema para cualquier instante de tiempo t . Dependiendo del problema en específico es probable que algunas de las coordenadas tengan dimensiones de energía, otras dimensiones de área, podrían ser adimensionales y así sucesivamente. De lo anterior se puede deducir que las coordenadas generalizadas q_i no siempre tienen significado físico.

4. Proveen la oportunidad de engrandecer el horizonte al poder aceptar, como coordenadas, las amplitudes de los desarrollos en series de Fourier o ciertas funciones de las coordenadas físicas ordinarias, por ejemplo.

En una situación física dada posiblemente existan varios conjuntos de coordenadas generalizadas que permitan describirla, es decir, no son únicas lo que es realmente ventajoso ya que permite una gran flexibilidad en su elección. Sin embargo, una elección apropiada puede simplificar el análisis considerablemente [37].

Para el caso de un RMD se emplean coordenadas generalizadas ligadas, debido a que es un sistema en el que existen ligaduras no holonómicas.

Se da el nombre de Coordenadas Generalizadas Impropias, Coordenadas Generalizadas No-libres o Coordenadas Generalizadas Ligadas a todas aquellas q_i que son dependientes las unas de las otras debido a que están condicionadas por las ligaduras presentes en el sistema y cuyo número n es superior al número de grados de libertad del mismo.

Este tipo de coordenadas generalizadas son las que se tienen cuando se está describiendo:

- Un sistema de partículas no-holónomo en el que sólo existen ligaduras no-holónomas $K^{(h)} = 0$ y $K^{(nh)} \neq 0$, ya que en estos sistemas las ecuaciones de ligadura no permiten eliminar las coordenadas dependientes. Para este caso $n = 3N > s = 3N - K^{(nh)}$, es decir, el número de coordenadas generalizadas es superior al número de grados de libertad. Estas coordenadas pueden ser tratadas como independientes al hacer entrar las ligaduras en forma explícita en la descripción del sistema, utilizando para ello denominado Método de los Multiplicadores de Lagrange. De esta manera se puede así obtener adicionalmente, a partir de dichos multiplicadores, las fuerzas de ligadura presentes en el sistema de partículas dado [37].

Las ecuaciones dinámicas de Lagrange para sistemas no holonómicos están dadas por:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \mathcal{L}(q)}{\partial \dot{q}_k} \right) - \frac{\partial \mathcal{L}(q)}{\partial q_k} = B(q)\tau + \Lambda^T(q)\lambda, \quad k = 1, 2, \dots, n, \quad (21)$$

donde $\mathcal{L}(q, \dot{q}) = \mathcal{K}(q, \dot{q}) - U(q)$ es la función Lagrangiana, $\mathcal{K}(q, \dot{q})$ es la energía cinética del sistema, $U(q)$ es la energía potencial del sistema, (q) son las coordenadas generalizadas y $B(q)$ es una matriz $m \times n$ que asigna las m entradas externas τ a los torques que realizan el trabajo en las coordenadas generalizadas [38].

La energía potencial es considerada igual a cero, debido a que el robot móvil se mueve en un plano horizontal.

3.6 Modelo dinámico del robot móvil diferencial

Un robot móvil no holonómico se considera un sistema mecánico con n coordenadas generalizadas (q_1, q_2, \dots, q_n) sujeto a m restricciones, se describe de la siguiente manera:

$$M(q)\ddot{q} + V_m(q, \dot{q})\dot{q} + F(\dot{q}) + G(q) + \tau_d = B(q)\tau - \Lambda^T(q)\lambda \quad (22)$$

donde $M(q) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ es la matriz de inercia definida positiva y es simétrica, $V_m(q, \dot{q}) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ es la matriz de fuerzas centrípetas y de coriolis, $F(\dot{q}) \in \mathbb{R}^{n \times 1}$ denota la fricción de la superficie, $G(q) \in \mathbb{R}^{n \times 1}$ es el vector de gravedad, τ_d denota perturbaciones desconocidas acotadas incluyendo dinámica no estructurada no modificada, $B(q) \in \mathbb{R}^{n \times r}$ es la matriz de entrada, $\tau \in \mathbb{R}^{r \times 1}$ es el vector de entrada, $\Lambda^T \in \mathbb{R}^{m \times n}$ es la matriz asociada con las restricciones cinemáticas y $\lambda \in \mathbb{R}^{m \times 1}$ es el vector de los multiplicadores de Lagrange [33].

Las coordenadas generalizadas para este robot diferencial son:

$$q = [\chi_a \quad y_a \quad \theta \quad \varphi_r \quad \varphi_L]^T. \quad (23)$$

La energía cinética de un RMD es la suma de la energía cinética de la plataforma del robot sin tomar en cuenta las ruedas, más las energías cinéticas de las ruedas con los actuadores empotrados a ellas [36].

La energía cinética de la plataforma del robot está dada por:

$$K_c = \frac{1}{2} m_c V_c^2 + \frac{1}{2} I_c \dot{\theta}^2, \quad (24)$$

Aquí, m_c es la masa del robot sin las ruedas y actuadores, I_c es el momento de inercia del robot alrededor del eje vertical a través del centro de masa.

Las energías cinéticas de la rueda derecha e izquierda, respectivamente son:

$$K_{wR} = \frac{1}{2} m_w V_{wR}^2 + \frac{1}{2} I_m \dot{\theta}^2 + \frac{1}{2} I_w \dot{\varphi}_R^2, \quad (25)$$

$$K_{wL} = \frac{1}{2} m_w V_{wL}^2 + \frac{1}{2} I_m \dot{\theta}^2 + \frac{1}{2} I_w \dot{\varphi}_L^2. \quad (26)$$

Aquí, m_w es la masa de cada rueda motriz con actuadores, I_w es el momento de inercia de cada rueda motriz alrededor del eje de la rueda, e I_m es el momento de inercia de cada rueda motriz alrededor del diámetro de la rueda.

Ahora se toma en cuenta la distancia d del eje central de las ruedas hacia el centro de masa, para incluirlo en el modelo dinámico. Es necesario conocer las componentes x_{CM} y y_{CM} del centro de masa con respecto al marco inercial (ver Fig. 41):

$$\begin{aligned} x_{cm} &= x_a + d \cos \theta \rightarrow \dot{x}_{cm} = \dot{x}_a - d\dot{\theta} \sin \theta, \\ y_{cm} &= y_a + d \sin \theta \rightarrow \dot{y}_{cm} = \dot{y}_a + d\dot{\theta} \cos \theta. \end{aligned} \quad (27)$$

Todas las velocidades pueden ser expresadas en términos de las coordenadas generalizadas, usando la ecuación general de velocidad:

$$v_i^2 = \dot{x}_i^2 + \dot{y}_i^2. \quad (28)$$

Reescribiendo la suma de las energías cinéticas de las ecuaciones (24)-(26):

$$\begin{aligned} k &= \frac{1}{2} m_c v_c^2 + \frac{1}{2} I_c \dot{\theta}^2 + \frac{1}{2} m_w (v_{mR}^2 + v_{wL}^2) \\ &+ I_m \dot{\theta}^2 + \frac{1}{2} I_w (\dot{\phi}_R^2 + \dot{\phi}_L^2). \end{aligned} \quad (29)$$

A partir de las ecuaciones (27), (28) y (29) se obtiene la energía cinética total del sistema:

$$\begin{aligned} k &= \frac{1}{2} m (\dot{x}_a^2 + \dot{y}_a^2) + m_c d \dot{\theta} (\dot{y}_a \cos \theta - \dot{x}_a \sin \theta) \\ &+ \frac{1}{2} \dot{\theta}^2 I + \frac{1}{2} I_w (\dot{\phi}_R^2 + \dot{\phi}_L^2) \end{aligned} \quad (30)$$

donde $m = m_c + 2m_w$; $I = m_c d^2 + 2m_w L^2 + I_c + 2I_m$.

Aplicando las ecuaciones de Lagrange, ecuación (21) con $\mathcal{L}(q, \dot{q}) = \mathcal{K}(q, \dot{q})$ y separando el Lagrangiano en coordenadas generalizadas, se obtienen las siguientes ecuaciones de movimiento:

Para x :

$$m\ddot{x}_a - m_c d \ddot{\theta} \sin \theta - m_c d \dot{\theta}^2 \cos \theta = C_1, \quad (31)$$

Para y :

$$m\ddot{y}_a + m_c d \ddot{\theta} \cos \theta - m_c d \dot{\theta}^2 \sin \theta = C_2, \quad (32)$$

Para θ :

$$I\ddot{\theta} - m_c d \ddot{x}_a \sin \theta + m_c d \ddot{y}_a \cos \theta = C_3, \quad (33)$$

Para φ_R :

$$I_w \ddot{\varphi}_R = \tau_R + C_4, \quad (34)$$

Para φ_L :

$$I_w \ddot{\varphi}_L = \tau_L + C_5. \quad (35)$$

Con base en las ecs. (31)-(35) la dinámica del robot se puede reescribir como la ec. (22):

$$M(q)\ddot{q} + V(q, \dot{q})\dot{q} = B(q)\tau + \Lambda^T(q)\lambda, \quad (36)$$

con:

$$M(q) = \begin{bmatrix} m & 0 & -m_c d \sin \theta & 0 & 0 \\ 0 & m & m_c d \cos \theta & 0 & 0 \\ -m_c d \sin \theta & m_c d \cos \theta & I & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_w & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & I_w \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_a \\ \ddot{y}_a \\ \ddot{\theta} \\ \ddot{\varphi}_R \\ \ddot{\varphi}_L \end{bmatrix}, \quad (37)$$

$$V(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -m_c d \dot{\theta} \cos \theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -m_c d \dot{\theta} \sin \theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_a \\ \dot{y}_a \\ \dot{\theta} \\ \dot{\varphi}_R \\ \dot{\varphi}_L \end{bmatrix}, \quad (38)$$

$$B(q) = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau_R \\ \tau_L \end{bmatrix}; \quad \Lambda^T(q)\lambda = \begin{bmatrix} -\sin \theta & \cos \theta & \cos \theta \\ \cos \theta & \sin \theta & \sin \theta \\ 0 & L & -L \\ 0 & -R & 0 \\ 0 & 0 & -R \end{bmatrix}. \quad (39)$$

El modelo dinámico no holonómico presentado tiene el inconveniente de ser un sistema subactuado, ya que tiene más variables a controlar que grados de libertad actuados, sin embargo, es posible reducir su dimensión y convertirlo en un sistema totalmente actuado. Para lograr esta reducción es necesario representar a las restricciones no holonómicas como en las consideraciones hechas para las restricciones cinemáticas dadas en la ecuación (15). El tema principal de este tipo de modelos es eliminar los multiplicadores de Lagrange ya que

no son conocidos. Implementando la simplificación de restricciones no holonómicas reportada en [33]:

$$S^T(q)\Lambda^T(q) = \mathbf{0}, \quad (40)$$

donde $S(q)$ es una matriz de rango completo (n-m), está formada por un conjunto de vectores linealmente independientes que abarcan el espacio nulo de $\Lambda(q)$.

A partir de las ecuaciones (15) y (40) es posible encontrar un vector auxiliar en función del tiempo $\eta(t)$ tal que:

$$\dot{q} = S(q)\eta(t). \quad (41)$$

Esto se hace definiendo el vector reducido [36]:

$$\eta = \begin{bmatrix} \dot{\phi}_R \\ \dot{\phi}_L \end{bmatrix}. \quad (42)$$

Al expresar las coordenadas generalizadas de velocidades usando el modelo de la cinemática diferencial de la ecuación (19) se tiene:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_a \\ \dot{y}_a \\ \dot{\theta} \\ \dot{\phi}_R \\ \dot{\phi}_L \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} R \cos \theta & R \cos \theta \\ R \sin \theta & R \sin \theta \\ R & -R \\ 2 & 0 \\ 0 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\phi}_R \\ \dot{\phi}_L \end{bmatrix}. \quad (43)$$

Con ayuda de la ec. (42), la expresión en la ec. (43) puede reescribirse en forma compacta como la ec. (41), si además se deriva con respecto del tiempo se obtiene:

$$\ddot{q} = \dot{s}(q)\eta + s(q)\dot{\eta} \quad (44)$$

A partir de las ecs. (36), (41) y (44), la dinámica del robot toma la forma:

$$\begin{aligned} M(q)[\dot{s}(q)\eta + s(q)\dot{\eta}] + V(q, \dot{q})[s(q)\eta] \\ = B(q)\tau - \Lambda^T(q)\lambda \end{aligned} \quad (45)$$

Aplicando la ec. (40) en la expresión anterior se obtiene:

$$\begin{aligned} S^T(q)M(q)S(q)\dot{\eta} + S^T(q)[M(q)\dot{s}(q) + V(q, \dot{q})S(q)]\eta \\ = S^T(q)B(q)\tau - S^T(q)\Lambda^T(q)\lambda. \end{aligned} \quad (46)$$

Reduciendo y reagrupando términos se obtienen las siguientes matrices:

$$\bar{M}(q) = S^T(q)M(q)s(q), \quad (47)$$

$$\bar{V} = S^T(q)M(q)\dot{S}(q) + S^T(q)V(q, \dot{q})\dot{S}(q), \quad (48)$$

$$\bar{B} = S^T(q)B(q). \quad (49)$$

El nuevo modelo dinámico se reduce a:

$$\bar{M}(q)\dot{\eta} + \bar{V}(q, \dot{q})\eta = \bar{B}(q)\tau, \quad (50)$$

donde:

$$\bar{M}(q) = \begin{bmatrix} I_w + \frac{R^2}{4L^2}(mL^2 + I) & \frac{R^2}{4L^2}(mL^2 - I) \\ \frac{R^2}{4L^2}(mL^2 - I) & I_w + \frac{R^2}{4L^2}(mL^2 + I) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\phi}_R \\ \ddot{\phi}_L \end{bmatrix}, \quad (51)$$

$$\bar{V}(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} 0 & \frac{R^2 m_c d \ddot{\theta}}{2L} \\ \frac{R^2 m_c d \dot{\theta}}{2L} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\phi}_R \\ \dot{\phi}_L \end{bmatrix}, \quad (52)$$

$$\bar{B}(q) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad \tau = \begin{bmatrix} \tau_R \\ \tau_L \end{bmatrix}. \quad (53)$$

Al desarrollar los términos en función de los torques de entrada para obtener las ecuaciones de cada grado de libertad, incluyendo las ecs. (17) y (18) se tiene:

$$\tau_R = \left(\frac{R}{2} m \dot{v} + \frac{R^2}{2L^2} I \dot{\omega} + \frac{R^2}{2L^2} m_c d \dot{\theta} \dot{\phi}_L + I_w \ddot{\phi}_R \right), \quad (54)$$

$$\tau_L = \left(\frac{R}{2} m \dot{v} - \frac{R^2}{2L^2} I \dot{\omega} - \frac{R^2}{2L^2} m_c d \dot{\theta} \dot{\phi}_R + I_w \ddot{\phi}_L \right). \quad (55)$$

Otra forma de expresar las ecuaciones del modelo dinámico es darles una estructura similar al modelo de la cinemática, es decir, en función de la suma y resta de los torques:

$$\frac{\tau_R + \tau_L}{R} = \left(m + \frac{2I_w}{R^2} \right) \dot{v} - m_c d \omega^2, \quad (56)$$

$$\frac{L(\tau_R - \tau_L)}{R} = \left(I + \frac{2L^2 I_w}{R^2} \right) \dot{\omega} + m_c d \theta v. \quad (57)$$

3.7 Control proporcional-derivativo (PD) y ecuación en lazo cerrado del sistema

El control proporcional derivativo más compensación de gravedad (PD) está dado por la siguiente ecuación:

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{K}_p \tilde{\mathbf{q}} - \mathbf{K}_v \dot{\mathbf{q}} + \mathbf{g}(\mathbf{q}) \quad (58)$$

Donde $\tilde{\mathbf{q}} \in \mathbb{R}^n$ es el vector de error de posición que se define como la diferencia entre la posición deseada $\mathbf{q}_d \in \mathbb{R}^n$ y la posición actual del robot $\mathbf{q} \in \mathbb{R}^n$; $\mathbf{K}_p \in \mathbb{R}^{n \times n}$ es una matriz definida positiva, $\mathbf{K}_v \in \mathbb{R}^{n \times n}$ es la ganancia derivativa la cual es una matriz definida positiva.

La ecuación en lazo cerrado en variables de estado que definen el problema de control de posición es [27]:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{q}} \\ \dot{\mathbf{q}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{q}} \\ \mathbf{M}(\mathbf{q})^{-1} [\mathbf{K}_p \tilde{\mathbf{q}} - \mathbf{K}_v \dot{\mathbf{q}} - \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \dot{\mathbf{q}}] \end{bmatrix}, \quad (59)$$

Sustituyendo la ec. (50) en (59) se obtiene la ecuación de lazo cerrado que combina la estrategia de control PD con el modelo dinámico del RMD:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{q}} \\ \dot{\mathbf{q}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\eta} \\ \bar{\mathbf{M}}(\mathbf{q})^{-1} [\mathbf{K}_p \tilde{\mathbf{q}} - \mathbf{K}_v \boldsymbol{\eta} - \bar{\mathbf{V}}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \boldsymbol{\eta}] \end{bmatrix}. \quad (60)$$

3.8 Simulaciones

Se realizan simulaciones del modelo cinemático y dinámico del RMD con la finalidad de comprender el comportamiento del sistema o evaluar nuevas estrategias de modelado de robots móviles para el correcto funcionamiento del sistema.

3.8.1 Cinemática directa del RMD

Se realiza la simulación de la cinemática directa para comprobar que se calculó correctamente. En la Figura 3.4 se representa el modelo cinemático a través de bloques Simulink para corroborar la correcta trayectoria en el plano cartesiano del robot móvil al variar las velocidades de cada rueda, así como la posición inicial y la orientación inicial, mediante de simulaciones.

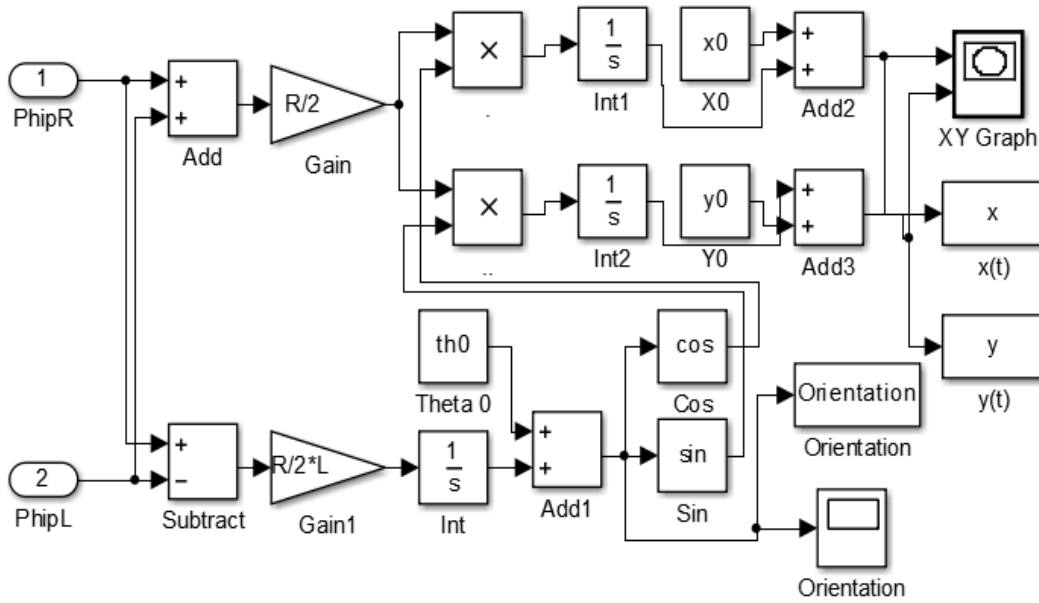


Figura 3.4. Cinemática directa de un RMD simulada con bloques de Simulink para graficar la posición del mecanismo en el espacio bidimensional.

Se realiza una simulación suministrando al sistema velocidades de igual magnitud en cada rueda, y una orientación inicial del RMD de $\theta_0 = \pi/4$. Se observa la gráfica obtenida representada en la Fig. 3.5 el comportamiento del robot es seguir una trayectoria recta con un ángulo de orientación precisamente de $\pi/4$, lo que representa el principio básico de funcionamiento de un robot móvil de configuración diferencial, al aplicar velocidades iguales en ambas ruedas, el RMD avanza en línea recta.

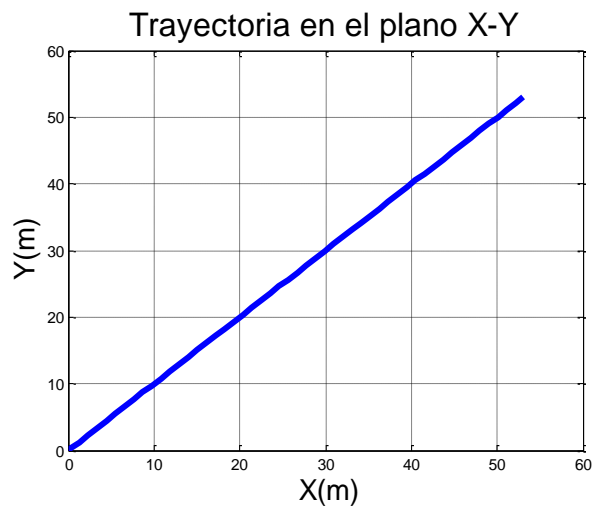


Figura 3.5. Gráfica obtenida al simular la cinemática directa del RMD en Simulink. Se aplican velocidades iguales en ambas ruedas y una orientación inicial.

En la segunda simulación que se lleva a cabo de la cinemática directa del RMD, se aplica una velocidad positiva en una de las ruedas y en la otra una velocidad 0, con una orientación inicial $\theta_0 = 0$. Se observa la gráfica obtenida al simular el modelo, representado en la Fig. 3.6 y se obtiene una trayectoria circular con centro en el origen, lo que hace referencia nuevamente al principio de funcionamiento de un RMD, ya que al aplicar una velocidad de cualquier magnitud a una de las ruedas, y la otra mantenerla en 0, la trayectoria a seguir será una circunferencia, lo que demuestra que la cinemática directa previamente calculada es correcta.

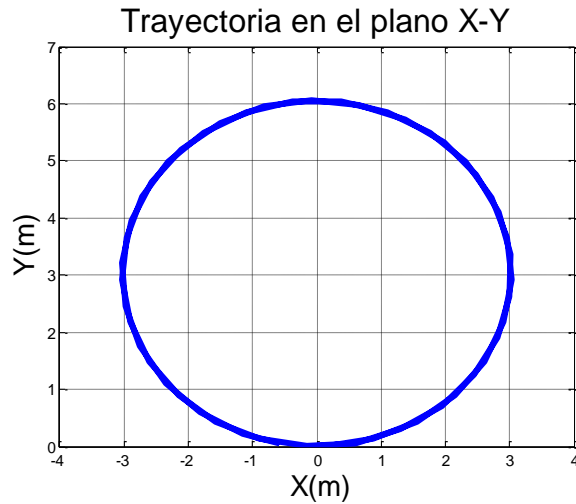


Figura 3.6. Velocidad positiva en una rueda y cero en la otra, con $\theta_0 = 0$.

3.8.2 Dinámica del RMD

De igual forma que en la cinemática, se simula el modelo dinámico en lazo abierto con bloques de Simulink para introducir los parámetros físicos del mecanismo y corroborar que el modelo dinámico está desarrollado de manera adecuada, así como para observar el comportamiento del sistema y conocer la trayectoria recorrida por el robot móvil al variar los torques de entrada de los motores. En la Fig. 3.7 se observa el diagrama a bloques implementado para realizar las simulaciones.

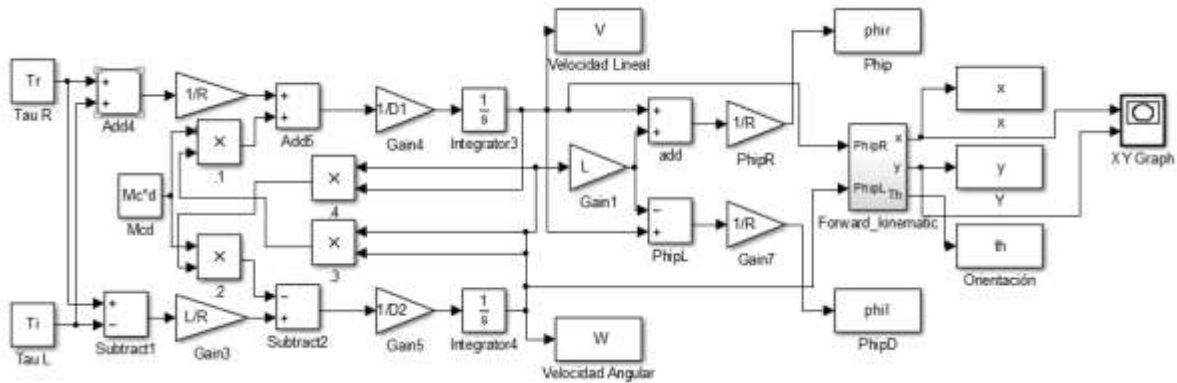


Figura 3.7. Modelo dinámico de un RMD, realizado en Simulink para graficar la trayectoria y observar el comportamiento del robot al variar los pares aplicados a cada motor.

Las primeras simulaciones realizadas para el modelo dinámico se presentan en la Fig. 3.8. Para Fig. 3.8 a) se aplica un torque de 3Nm en la rueda motriz derecha, y un torque de igual magnitud pero de signo contrario, es decir, de -3Nm para la rueda izquierda.

Para Fig. 3.8 b) se aplica un torque de 3 Nm a la rueda derecha y a la rueda izquierda se le aplica la mitad del torque de la rueda derecha, es decir, 1.5 Nm. A continuación se presentan las gráficas obtenidas en la simulación:

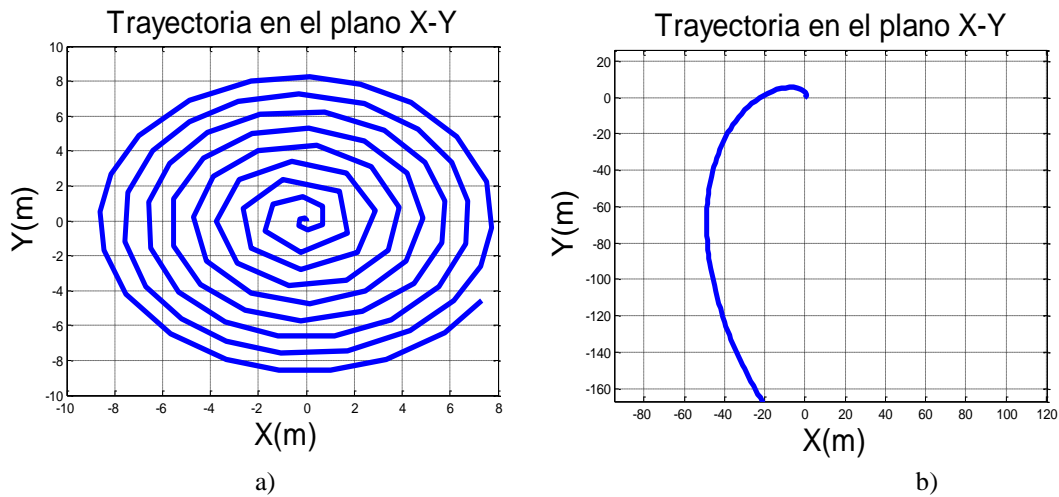


Figura 3.8. Trayectorias obtenidas al graficar la dinámica del RMD. a)

$$\tau_R = 3\text{Nm}, \tau_L = -3\text{Nm} \quad \text{b) } \tau_R = 3\text{Nm}, \tau_L = \tau_R/2.$$

Las respuestas obtenidas al simular el modelo dinámico del RMD son distintas a las de la cinemática, ya que ahora se introducen todos los parámetros físicos del mecanismo y se observa que no son trayectorias ideales debido a la distribución de la masa en el robot, y a la distancia d que existe entre el eje de giro de las ruedas y el centro de masa del sistema (ver Fig. 3.2). Se realiza una nueva simulación de la dinámica del robot cambiando los parámetros de entrada. Ahora en la Fig. 3.9 a) se aplica un torque de 3 Nm a la rueda derecha y a la rueda izquierda un torque de 0 Nm. Para la Fig. 3.9 b) se aplican torques de magnitudes iguales a ambas ruedas, en este caso 3 Nm para cada rueda.

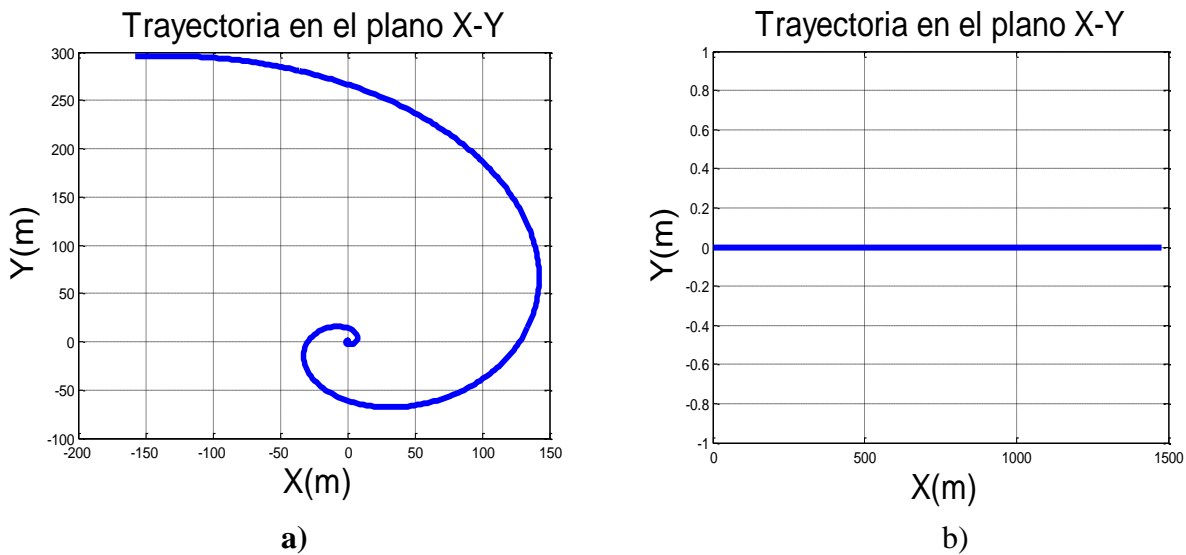


Figura 3.9. Trayectorias obtenidas al graficar la dinámica del RMD. a)

$$\tau_R = 3Nm, \tau_L = 0Nm \quad \text{b) } \tau_R = 3Nm, \tau_L = 3Nm.$$

De igual forma en la Fig. 3.9 a) se observa que la trayectoria no es ideal, ya que debería de ser una circunferencia como en el caso de la cinemática directa, pero debido a la distancia d que existe entre el eje de giro de los motores y el centro de masa, se genera una curva más prolongada que se va alejando de la forma ideal conforme el tiempo evoluciona, es decir genera una trayectoria no ideal afectada por los parámetros físicos del robot. Para el caso de la Fig. 3.9 b) se observa que la trayectoria es correcta, ya que ambas ruedas tienen aplicado un torque de igual magnitud y signo, como consecuencia se genera una trayectoria recta, y complementa la idea de que el modelo dinámico realizado es correcto.

3.9 Conclusiones

Mediante el estudio de la cinemática de los robots móviles y los métodos aquí implementados se puede conocer la posición final de dicho robot en todo momento en el plano bidimensional, esto es de suma importancia debido a que se necesita saber el espacio

de trabajo de un robot, sin importar la aplicación que se le dé a éstos, ya sea un robot de rescate, un robot aplicado a la medicina o de cualquier otro rubro.

Al obtener el modelo dinámico del RMD es posible predecir el comportamiento del robot al moverse incluyendo todos los parámetros físicos que actúan sobre él, a través de simulaciones, lo que nos da una aproximación o estimación de su comportamiento. Este es un requisito cada vez más importante en las etapas de diseño y elaboración de cualquier robot. Aunado a esto, permite sumergirse en un estudio de algoritmos de control para el robot, lo que implica tener un sistema robusto capaz de adaptarse al medio en el que esté trabajando. Gracias a esto se puede implementar controles de trayectoria, control punto a punto del robot, así como una navegación autónoma. El control de posición de robots móviles es de gran importancia ya que mediante estos métodos el robot es capaz de realizar correctamente gran variedad de actividades, que en la mayoría de los casos requieren de exacta precisión.

Las ecuaciones de movimiento de Lagrange, se emplean en este capítulo, ya que resultan una herramienta necesaria para estos casos de modelado matemático donde se incluyen las restricciones holonómicas de movimiento del RMD, además de que se basan en coordenadas generalizadas, éstas permiten describir la dinámica del robot en términos de las variables de cada grados de libertad del sistema

Capítulo 4

4 Instrumentación electrónica de la silla de ruedas

En este capítulo se explica el diseño de la electrónica requerida para movilizar a la SRM, los componentes electrónicos implementados en la tarjeta de control y adquisición de datos que permiten el correcto funcionamiento de la lógica programada y de la adquisición de los datos enviados por los dispositivos de control, que representan las entradas al sistema. Se explican las características de cada módulo instrumentado y su funcionalidad, así como la electrónica de potencia requerida para controlar los actuadores y drenar las altas corrientes que consume el sistema general.

En la Fig.4.1 se presenta el diagrama a bloques del sistema electrónico instrumentado para el funcionamiento de la SRM.

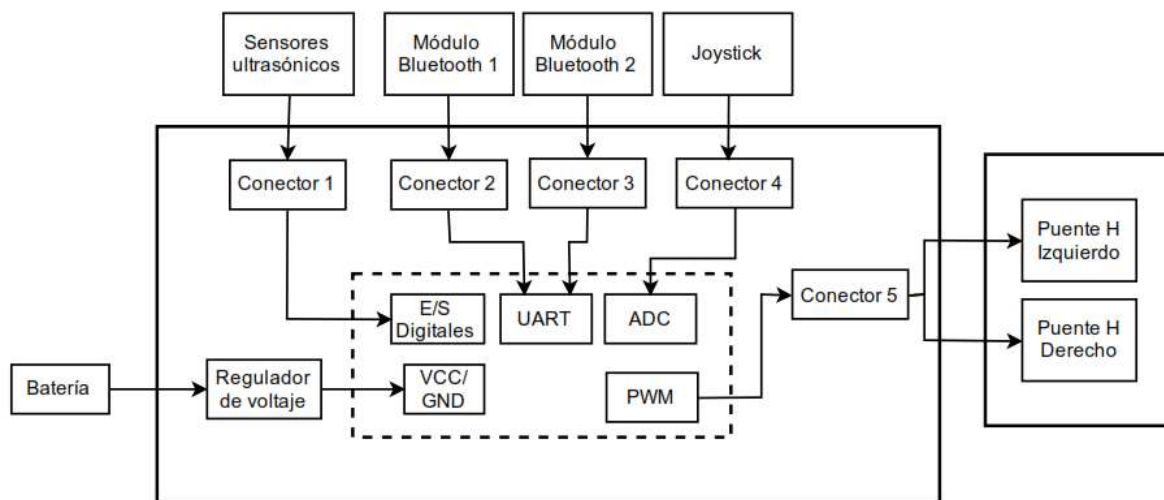
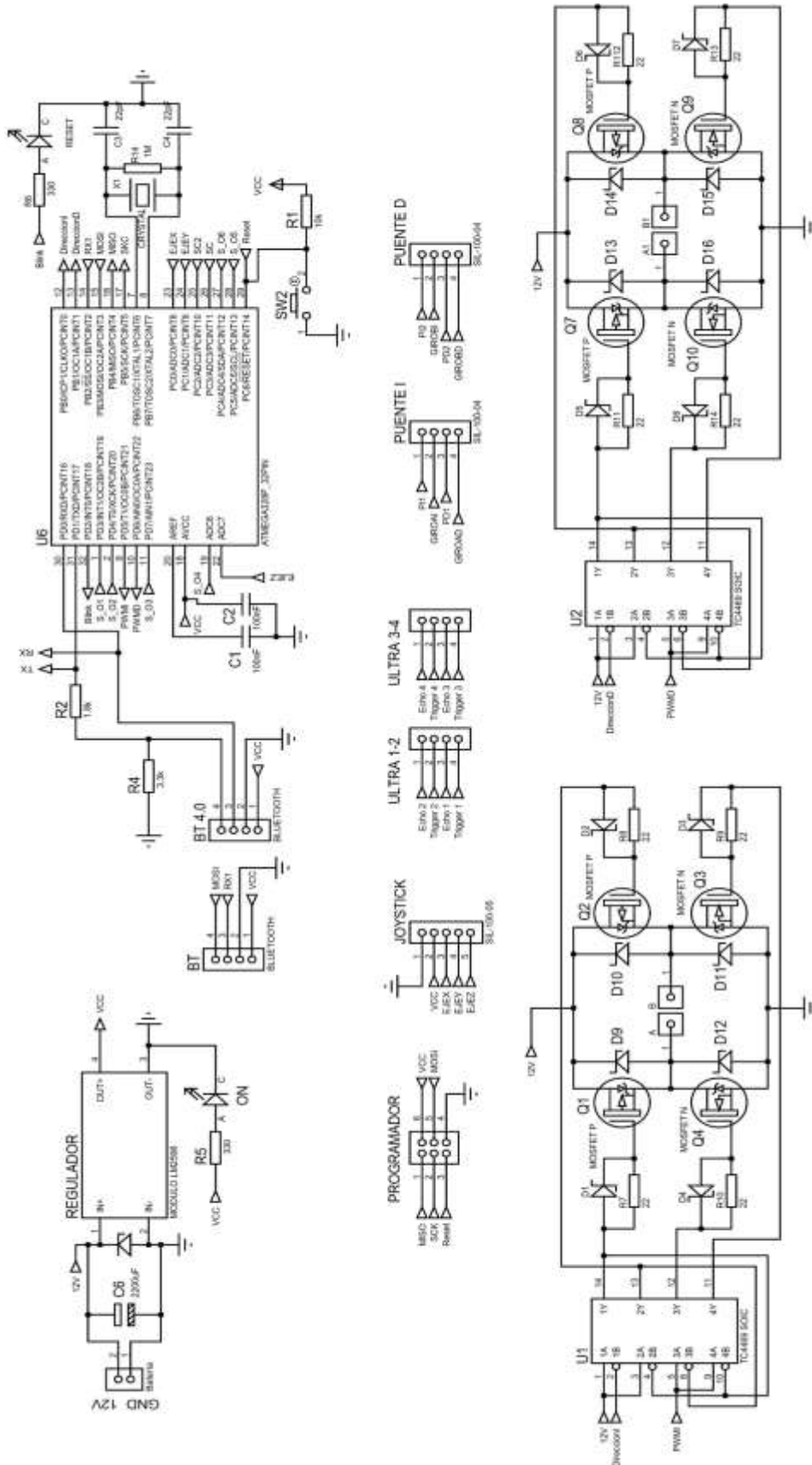


Figura 4.1. Diagrama a bloques del sistema electrónico de la SRM.

En la Fig. 4.2 se presenta el diagrama de conexión electrónica del circuito general de la SRM.



El sistema

Figura 4.2. Diagrama electrónico de la SRM.

electrónico se compone de dos tarjetas, una representa a la etapa de control y adquisición de datos, y la segunda es la tarjeta de potencia, que involucra los MOSFET requeridos para los puentes H.

4.1 Tarjeta de adquisición de datos y control

La tarjeta de adquisición de datos y control permite recibir las señales de dispositivos inalámbricos (aplicación en Android y brazalete Myo) a través del protocolo de comunicación bluetooth, de un control manual (Joystick) a través de señales analógicas que van a los convertidores analógicos a digital (CAD) y señales de los sensores de obstáculos a través de sus entradas digitales. Estas señales representan las entradas al sistema. Las salidas de la tarjeta están programadas a través de canales PWM (modulación por ancho de pulso) mediante canales digitales, para controlar el ancho de pulso de la señal de activación de los MOSFET, lo que es análogo a controlar la cantidad de voltaje suministrada a los motores. En la tabla 6 se describen las características de la tarjeta de control diseñada.

Tabla 4.1. Características principales de la tarjeta de control.

| | |
|-------------------------|-----------|
| Voltaje de alimentación | 12 V |
| Voltaje de operación | 5 V |
| Entradas digitales | 4 |
| Entradas analógicas | 3 |
| Salidas digitales | 9 |
| Salidas PWM | 2 |
| Comunicación serial | 2 puertos |

Los módulos o partes que componen a la tarjeta son las siguientes:

- Etapa de alimentación y regulación de voltaje.
- Microcontrolador.
- Módulos bluetooth.
- Módulo para comunicación con joystick.
- Módulos para sensores ultrasónicos.

4.1.1 Etapa de alimentación y regulación de voltaje

Debido a que las baterías de la SRM son de 12 V es necesario regular el voltaje que se va a suministrar para alimentar la etapa lógica y de control, es decir, reducir el voltaje a 5 V. Para esta etapa se implementa un módulo LM2596 (ver Fig. 4.3).

Este es un convertidor de voltaje Step Down DC-DC tipo buck, con un potenciómetro multivuelta para regular el voltaje deseado. Es capaz de manejar una carga de hasta 3A con una alta eficiencia. Este circuito te permite tener un voltaje regulado a partir de una fuente de alimentación con un voltaje mayor.

Este módulo está basado en el Regulador DC-DC Step Down LM2596 que es un circuito integrado monolítico adecuado para el diseño fácil y conveniente de una fuente de conmutación tipo buck. El módulo convertidor LM2596 es un regulador de tipo conmutado, así que su eficiencia es significativamente mayor en comparación con los populares reguladores lineales de tres terminales, especialmente con tensiones de entrada superiores [39].



Figura 4.3. Módulo regulador DC-DC conmutado LM2569.

El diagrama esquemático de conexión electrónica se presenta en la Fig. 4.4.

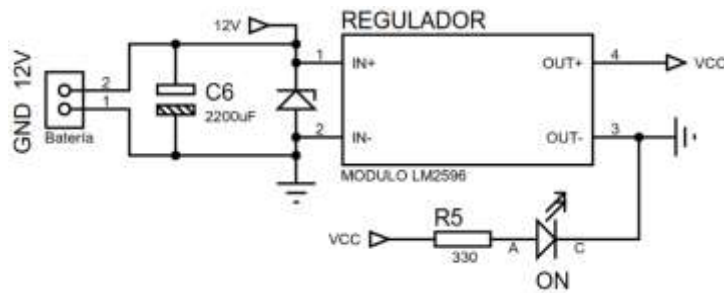


Figura 4.4. Diagrama de conexión para el módulo LM2569.

4.1.2 Microcontrolador

La tarjeta de control está basada en un microcontrolador ATmega328P de Microchip, en la tabla 4.2 se presentan las características principales de éste [40].

Tabla 4.2. Características principales del microcontrolador ATmega328P

| | |
|------------------------------|---|
| Microcontrolador | ATmega328 |
| Voltaje de operación | 5V |
| Pines digitales E/S | 14 (de los cuales 6 proporcionan salidas PWM) |
| Pines de entradas analógicas | 8 |

| | |
|--------------------|--------|
| Memoria flash | 32 KB |
| SRAM | 2 KB |
| EEPROM | 1 KB |
| Velocidad de reloj | 16 MHz |
| Puertos seriales | 2 |

El ATmega328P se comunica utilizando el protocolo original STK500 (basado en lenguaje C). Para su programación se implementa la tecnología ICSP, que es el acrónimo de la frase en inglés: "In Circuit Serial Programming" (Programación Serial En Circuito), con el objetivo de reprogramar la tarjeta sin que sea necesaria la extracción del microcontrolador. Esto ahorra tiempo y trabajo, además de dar la posibilidad de reprogramar el mismo “en el campo”, ya sea para corregir errores de software o para la mejora del sistema al agregar más funciones al momento de observar el comportamiento del mecanismo.

En la Fig. 4.5 se presenta el diagrama de conexión del microcontrolador.

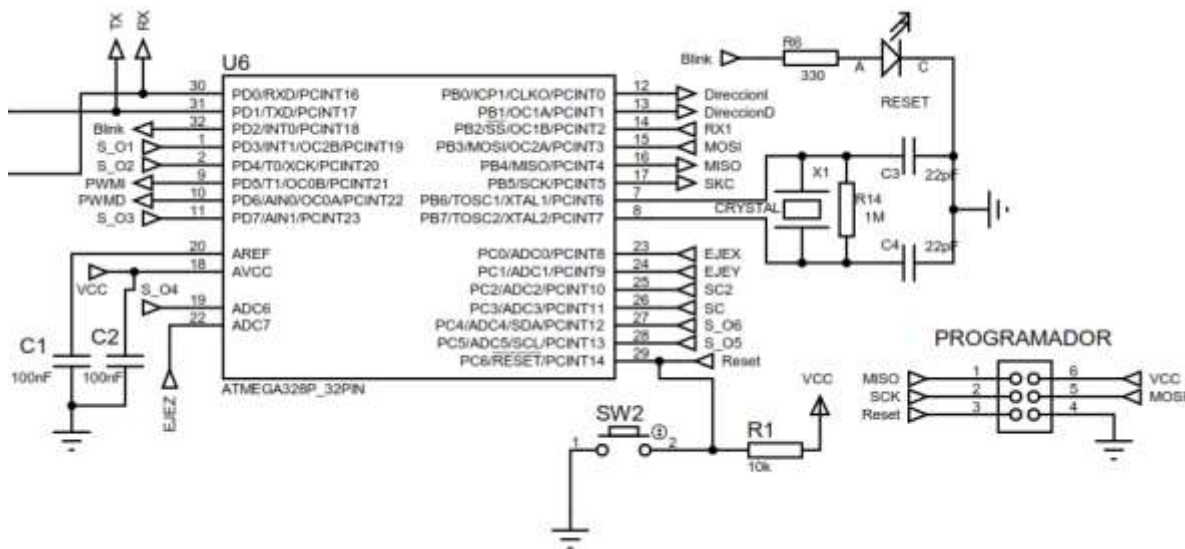


Figura 4.5. Diagrama de conexión para el microcontrolador ATmega328P.

4.1.3 Módulos bluetooth

La tarjeta de control permite la comunicación con dos módulos bluetooth a través de su puerto serial USART. Un módulo está destinado para realizar la comunicación del brazalete MYO con la SRM. Es un módulo bluetooth HM-10 que representa la tecnología 4.0 o Bluetooth Smart Ready, está basado en el BLE (Bluetooth Low Energy) CSR BlueCore o TI CC2540 de Texas Instruments. Cuenta con las funciones maestro y esclavo en uno, versión de transmisión y versión de control remoto y las funciones de adquisición de estado

PIO (Programmed Input/Output) en uno y admite los parámetros de módulo de modificación de comando AT (ver Fig. 54 a)) [41].

Este módulo es programable y se implementa para lograr emparejar el brazalete MYO con la tarjeta de control sin necesidad de utilizar el conector “Dongle” USB que éste trae para su comunicación.

El segundo módulo es un bluetooth HC-05 (ver Fig. 54 b)), es un módulo Maestro-Esclavo, es capaz de generar conexiones hacia otros dispositivos bluetooth. Esto nos permite conectar dos módulos de bluetooth y formar una conexión punto a punto para transmitir datos entre dos microcontroladores o dispositivos, en este caso entre la SRM y el teléfono móvil a través de la aplicación desarrollada. De igual forma admite los parámetros de módulo de modificación de comando AT,



Figura 4.6. Módulos de comunicación Bluetooth. a) Módulo BLE 4.0 HM-10. b) Módulo HC-05.

En la tarjeta de control se diseñan dos terminales para realizar la conexión de los módulos a los pines de emisión y recepción en el microcontrolador (TX y RX respectivamente), y de sus alimentaciones (ver Fig. 4.7).

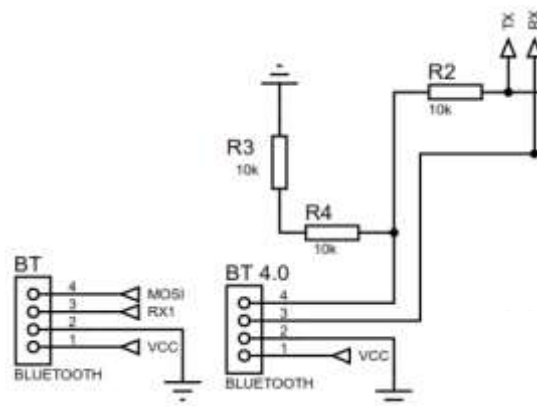


Figura 4.7. Diagrama de conexión para los módulos Bluetooth.

4.1.4 Módulo para comunicación con joystick

La comunicación entre el joystick y la tarjeta de control se lleva a cabo a través de los módulos de conversión analógica a digital (CAD) del microcontrolador, son puertos de 10 bits y se ocupan 3 de los 8 disponibles del microcontrolador. Se diseña una terminal de 5 canales para realizar la conexión entre los 3 ejes del joystick y su alimentación. En la Fig. 4.8 se presenta el diagrama de conexión.

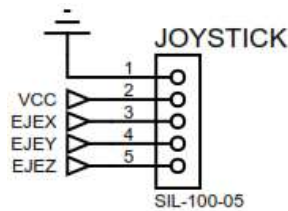


Figura 4.8. Diagrama de conexión del joystick con la tarjeta de control.

4.1.5 Módulo para comunicación con sensores de distancia

Para la etapa de sensado de objetos y prevención de impactos se implementan sensores ultrasónicos HC-SR04 (Ver Fig. 4.9). Los sensores ultrasónicos miden la distancia mediante el uso de ondas ultrasónicas. El cabezal emite una onda ultrasónica y recibe la onda reflejada que retorna desde el objeto.



Figura 4.9. Sensor ultrasónico HC-SR04 para detección de objetos que obstruyan la trayectoria de la SRM.

La interfaz digital se logra mediante 2 pines digitales: el pin de trigger (disparo) y echo (eco):

- El primero (trigger) recibe un pulso de habilitación de parte del microcontrolador, mediante el cual se le indica al módulo que comience a realizar la medición de distancia.
- A través de un segundo pin (echo) el sensor “muestra” al microcontrolador un pulso cuyo ancho es proporcional al tiempo que tarda el sonido en viajar del transductor al obstáculo y luego de vuelta al módulo.

Como se puede observar en la Fig. 4.10 el HC-SR04 genera un pulso en el pin marcado como “echo” cuya duración es proporcional a la distancia medida por el sensor. Para obtener la distancia en centímetros, solamente debemos dividir el tiempo en microsegundos entre 58.

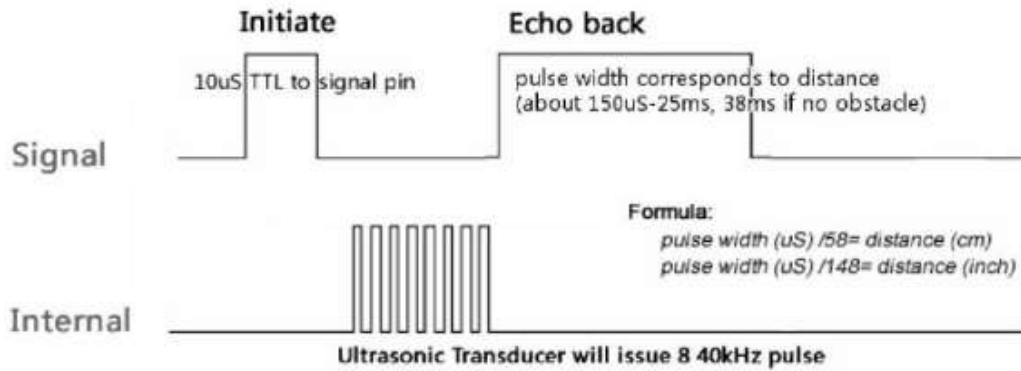


Figura 4.10. Cálculo de distancia detectada por el sensor ultrasónico con base en el tiempo de respuesta de la señal que rebota.

Las características del sensor HC-SR04 se presentan en la tabla 4.3 [42].

Tabla 4.3. Características principales del sensor HC-SCR04.

| |
|---|
| Alimentación de 5 volts. |
| Interfaz de cuatro hilos (VCC, trigger, echo, GND). |
| Rango de medición: 2 cm a 400 cm. |
| Corriente de alimentación: 1.5 mA. |
| Frecuencia de pulso: 40Khz. |
| Apertura del pulso ultrasónico: 15°. |
| Señal de disparo: 10us. |
| Dimensiones del módulo: 45x20x15mm. |

Se diseñan dos conexiones de 4 canales las cuales interconectan los pines de “echo” y “trigger” de los 4 sensores ultrasónicos con los que está equipada la silla (ver Fig. 4.11).

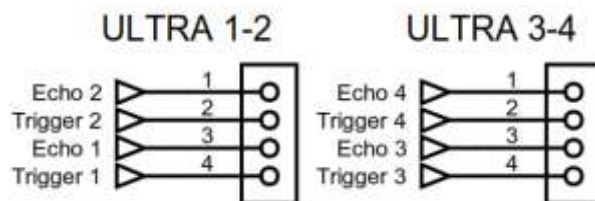


Figura 4.11. Diagrama de conexión entre los sensores ultrasónicos y la tarjeta de control.

El diseño de la tarjeta final se muestra en la Fig. 4.12.

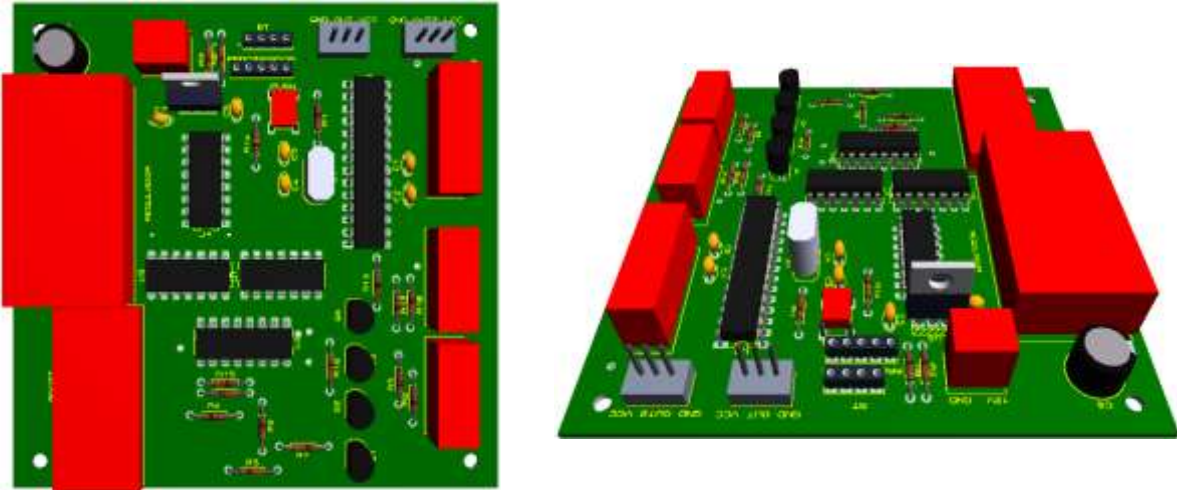


Figura 4.12. Diseño final de la tarjeta de control para la SRM.

El diseño e instrumentación de la tarjeta de control es el cerebro de la SRM, por lo que su diseño fue minucioso al tener en cuenta aspectos de fácil conexión, por si es necesario realizar algún cambio de cables, de componentes o para su fácil mantenimiento.

La tarjeta dispone de 2 módulos para recibir las señales provenientes de los dispositivos de control externo por enlace inalámbrico, 1 conector para la comunicación con el joystick. Tiene un conector para la recepción de las señales de los sensores de distancia para la detección de obstáculos. Dispone de un conector para la comunicación con la etapa de potencia, mediante el cual se envían las señales de sentido de giro, así como las señales moduladoras de PWM, ambas para cada motor.

En la Fig. 61 se presenta la instrumentación final de la tarjeta de control y adquisición de datos y en la tabla 4.4 se nombran los módulos que la integran.

Tabla 4.4. Descripción de los elementos que conforman la tarjeta de control y de adquisición de datos.

| | |
|---|--|
| 1 | Conector para alimentación (12 V). |
| 2 | Módulo bluetooth HM-10. |
| 3 | Conectores para módulo bluetooth HC-06. |
| 4 | Conector para señales del joystick. |
| 5 | Conector para señales de control de MOSFET. |
| 6 | Conector para señales de sensores de obstáculos. |
| 7 | Módulo LM2906 fuente reguladora conmutada (5 V). |

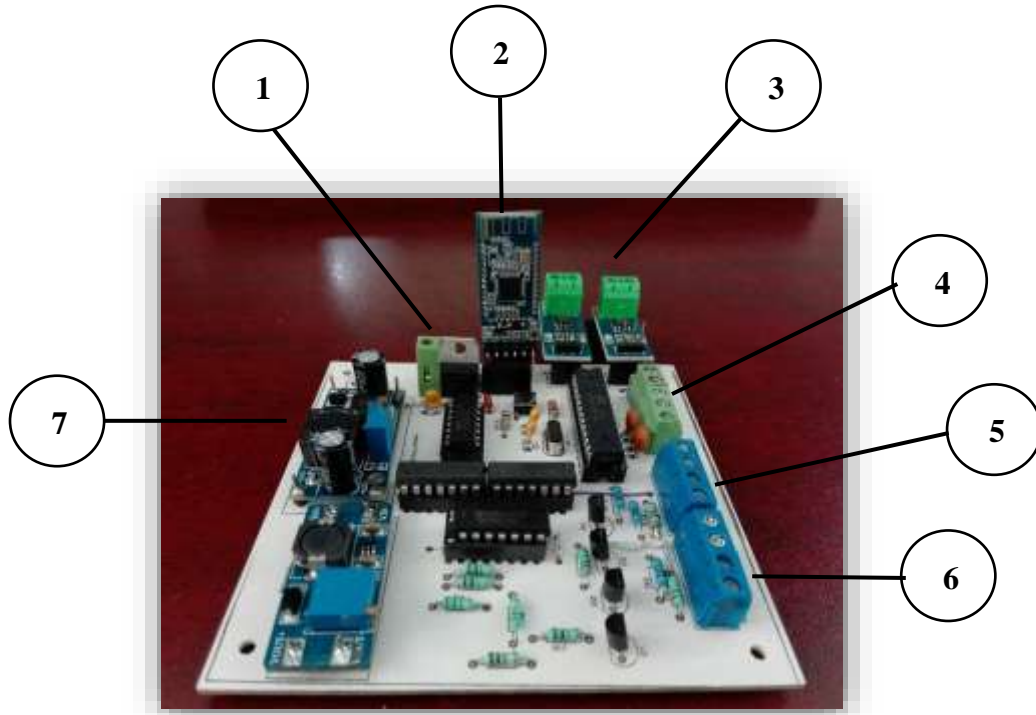


Figura 4.13. Tarjeta de adquisición de datos y de control instrumentada.

4.2 Etapa de potencia

Debido al alto consumo de corriente de los motores, la instrumentación de la etapa de potencia está basada en transistores MOSFET, los cuales son activados mediante un controlador buffer de entrada lógica y de 4 salidas para MOSFET, cada salida entrega 1.2 A picos, lo que lo hace adecuado para el control de las compuertas (gate) de los MOSFET.

Este controlador permite unir la etapa de control, que son las señales generadas por los moduladores PWM y la etapa de potencia representada por los MOSFET. La estructura interna del controlador se presenta en la Fig. 4.14.

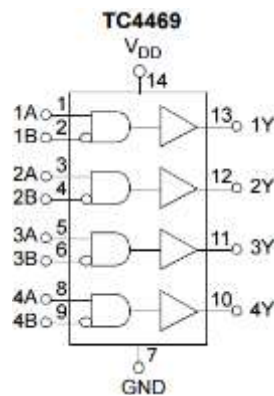


Figura 4.14. Diagrama de la estructura interna del controlador TC4469.

Mediante un arreglo de las compuertas internas del controlador se puede generar un circuito de protección para evitar que los transistores de una misma rama o lado se activen al mismo tiempo y ocasionen el efecto llamado “Shoot-through”, el cual se define como la condición cuando ambos MOSFET se encienden total o parcialmente, proporcionando una ruta para que la corriente “dispare” desde VIN a GND [43]. Para minimizar ese paso de corriente, los CI emplean uno de dos técnicas para asegurar la operación “romper antes de hacer” de Q1 y Q2 (ver Fig. 4.15) para minimizar la penetración: “Tiempo muerto fijo” o “Accionamiento de compuerta adaptativo”.

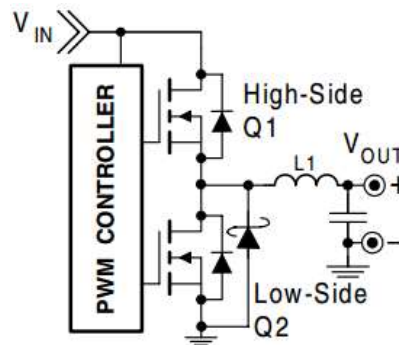


Figura 4.15: Rama izquierda de un puente H diseñado con MOSFET.

El tiempo muerto se reduce gracias al controlador debido a que la estructura de salida se basa en un circuito “tótém-pole MOSFET” (ver Fig. 4.16), lo que acelera el tiempo de apagado de los MOSFET.

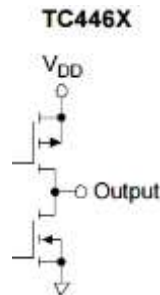


Figura 4.16. Circuito Totem-pole para acelerar el tiempo de apagado de un MOSFET.

En la Fig. 4.17 se presenta el diagrama electrónico de la etapa de potencia instrumentada, que está diseñada para drenar corrientes de hasta 40 A.

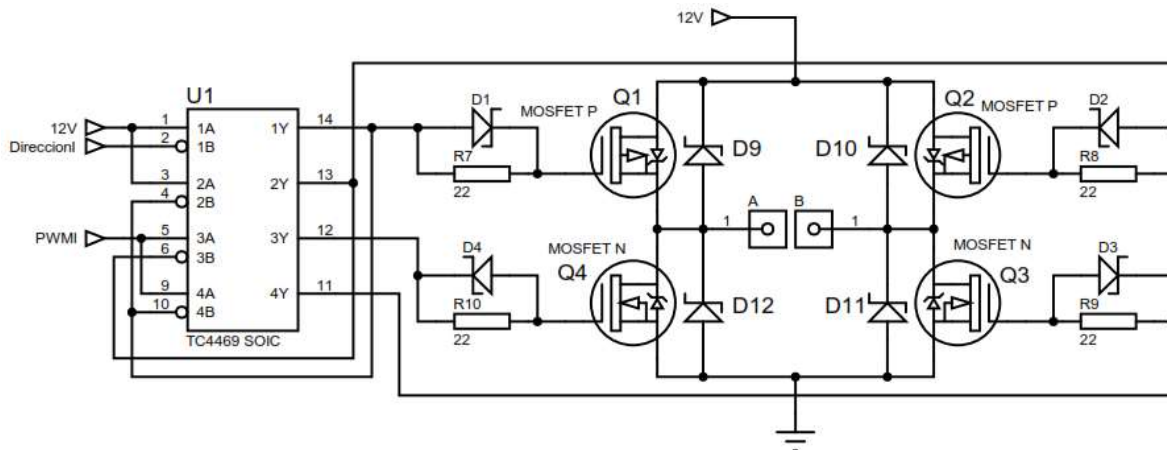


Figura 4.17. Diagrama electrónico de un puente H diseñado con MOSFET para drenar corrientes de 40 Amperios y controlar un motor CD de 12 V.

El controlador TC4469 se conecta de modo que el sistema tenga una sola señal de control de dirección (para cada motor), en este caso el pin 2, el cual permite la inversión de giro del motor. El pin 5 y 9 se encargan de la transmisión del PWM generado por la tarjeta de control. En la tabla 4.5 se presenta una tabla de verdad del funcionamiento que genera la conexión de los pines en el controlador.

Tabla 4.5. Tabla de verdad de la combinación de entradas al controlador.

| Pin 2 | Pin 5 y 9 | Pin 14 | Pin 13 | Pin 11 | Pin 12 |
|-----------|-----------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| Dirección | PWM | Gate Q1 | Gate Q2 | Gate Q3 | Gate Q4 |
| 1 | 1 | 0 (Q1 Saturado) | 1 (Q2 Corte) | 1 (Q3 Saturado) | 0 (Q4 Corte) |
| 1 | 0 | 0 (Q1 Saturado) | 1 (Q2 Corte) | 0 (Q3 Corte) | 0 (Q4 Corte) |
| 0 | 1 | 1 (Q1 Corte) | 0 (Q2 Saturado) | 0 (Q3 Corte) | 1 (Q4 Saturado) |
| 0 | 0 | 1 (Q1 Corte) | 0 (Q2 Saturado) | 0 (Q3 Corte) | 0 (Q4 Corte) |

Se observa en la tabla anterior que el PWM únicamente está conectado a las compuertas de los MOSFET tipo N (Q3 y Q4), entonces los MOSFET tipo P únicamente toman valores de saturación o corte, por lo que la combinación de “Dirección” con un 1 lógico y el PWM en alto genera un giro del motor hacia una dirección (determinada por la posición del motor) y al cambiar “Dirección” a un 0 lógico y el PWM en alto invierte la dirección de giro. Por lo tanto el paro total del sistema lo determina el PWM, es decir, la SRM estará en reposo cuando las señales de PWM estén en 0. Las salidas del controlador van conectadas a una resistencia de amortiguación de 22 ohms en paralelo a un diodo Schottky (D1-D4 y R7-R10), esta combinación proporciona una protección cruzada de

conducción simple al retrasar el encendido de los MOSFET sin demorar su apagado. Además el diodo Schottky reduce la duración del paso del “shoot-through”.

La etapa de control y de potencia se realizaron en distintas tarjetas PCB para poder realizar una buena disipación de calor de la etapa de potencia, así como para realizar cambios rápidos en los MOSFET por si alguno de estos sufre algún daño. La tarjeta de potencia se presenta en la Fig. 4.18.



Figura 4.18. Tarjeta de potencia instrumentada con MOSFET.

La etapa de potencia y control instrumentada para la SRM se presenta en la Fig. 4.19.

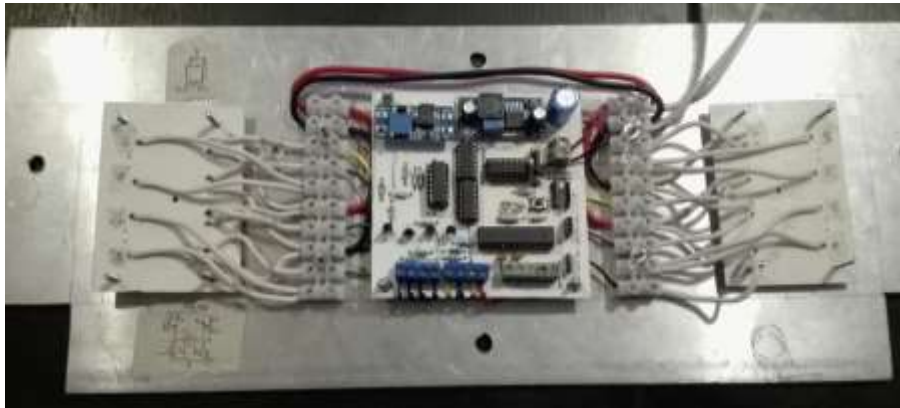


Figura 4.19. Sistema de control de y potencia para controlar la SRM.

4.3 Sistema de control de velocidad de lazo abierto

Los sistemas en los cuales la salida no afecta la acción de control se denominan *sistemas de control en lazo abierto*. En otras palabras, en un sistema de control en lazo abierto no se mide la salida ni se realimenta para compararla con la entrada. Por tanto, a cada

entrada de referencia le corresponde una condición operativa fija; como resultado, la precisión del sistema depende de la calibración [44].

En la Fig. 4.20 se presenta el diagrama a bloques del control de velocidad de la SRM en lazo abierto.

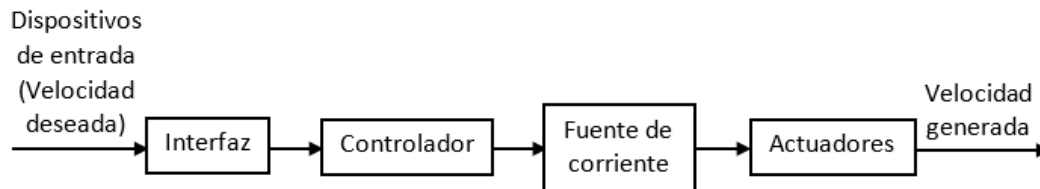


Figura 4.20. Diagrama a bloques del sistema de control de velocidad en lazo abierto.

Mediante cada uno de los dispositivos de entrada, el usuario controlará al sistema con la velocidad que él desea, y al ser un robot móvil de tipo diferencial esto se traduce a una velocidad determinada en cada rueda, lo que permite realizar una trayectoria de la SRM basada en la diferencia de dichas velocidades. La interfaz permite la comunicación con los dispositivos de entrada, ya sea inalámbrico para el caso del brazalete y la aplicación, o alámbrico para el joystick, y al realizar o emparejar esta comunicación envía los datos recibidos al controlador.

El controlador se encarga de detectar que tipo de señal recibe para reconocer el dispositivo con el que trabajará y saber qué acción va a realizar, es decir, asocia los movimientos de los dispositivos de entrada que son las velocidades deseadas en cada rueda con el movimiento de la SRM. A través de funciones que modulan el ancho de pulso (PWM) de señales que se transmiten a la etapa de potencia, es posible controlar la velocidad que se le asigna a cada rueda. Las señales generadas por el controlador activan la fuente de corriente que se encarga de suministrar la potencia necesaria para hacer que los motores funcionen a la velocidad previamente calculada en el controlador y muevan el peso de todo el mecanismo. Los actuadores reciben la cantidad de voltaje y corriente que ha sido calculada por los bloques anteriores y trabajan a una velocidad determinada en función de dichos cálculos, cada motor gira a una velocidad propia, es decir, la velocidad de un motor no depende del otro, lo que genera el movimiento total de la SRM y una trayectoria dirigida por el usuario.

4.4 Control del sistema mediante joystick

El joystick que se utiliza para controlar la SRM es un joystick analógico de 3 ejes modelo JH-D300X-R2 (ver Fig. 4.21), cuenta con 3 potenciómetros para controlar el eje X, eje Y y giros alrededor del eje Z respectivamente, mediante los movimientos de éste. A continuación se mencionan las características básicas del joystick:

- Regreso a su centro a través retorno de resorte.
- Cada eje está conectado a un potenciómetro lineal de 5 k ohmios.
- Movimiento del joystick 25 grados en cada dirección, de extremo a extremo presenta un rango de 50 grados, de este modo se utiliza el rango completo del potenciómetro de 5 K ohmios para máxima sensibilidad.
- El tercer eje es una perilla de giro con retorno de resorte.



Figura 4.21. Joystick JH-D300X-R2 de 3 ejes basado en potenciómetros.

El control de la SRM a través del joystick está basado en las lecturas analógicas de sus 3 potenciómetros. La tarjeta de control realiza la conversión de las señales analógicas de cada potenciómetro a señales digitales para que se puedan manipular dentro de la programación. El principio básico de funcionamiento es detectar los movimientos en los ejes del joystick, lo que representa el giro de los potenciómetros. Cada potenciómetro es lineal y al conectarse en modo variador de voltaje está enviado una señal analógica constantemente, y al mínimo movimiento esta señal se ve alterada. Con base en estas lecturas el sistema de adquisición permite asignar valores de salida en proporción de la variación de las entradas.

4.4.1 Etapa de conversión y acoplamiento de señales

Para la asignación de valores de salida es necesario realizar la conversión de las señales analógicas a digitales. El microcontrolador dispone de 8 entradas analógicas de 10 bits cada una, es decir, cuenta con 1024 estados o cambios para su manipulación en cada canal. Se utilizan 3 CAD del microcontrolador, el rango de movilidad basado en las características del joystick es de 25° en cada dirección (ver Fig. 4.22), entonces es necesario conocer los valores que el joystick entrega al abarcar el rango completo de movimiento, es decir, se necesita caracterizar el joystick. El voltaje de alimentación para los potenciómetros es de 5 V, por lo que tendremos resultados con un rango de 0 (0 V) como mínimo a 1023 (5 V) como máximo. El ADC realiza la conversión por medio de aproximaciones sucesivas dentro del rango de referencia especificada V_{ref+} y V_{ref-} , donde V_{ref+} es 5 V y V_{ref-} es 0

V. La resolución de cada bit está definida de acuerdo al rango de referencias de voltaje, y queda dada por la fórmula:

$$\text{Resolución} = \frac{V_{ref+} - V_{ref-}}{2^n - 1} = 4.88 \text{ mV}. \quad (61)$$

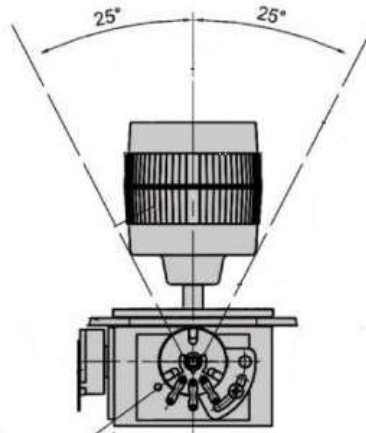


Figura 4.22. Rango de movimiento del joystick para los ejes X y Y.

Debido a los ángulos de movimiento del joystick no es posible obtener el rango completo de lecturas de 0 a 5 V de los potenciómetros, al realizar la caracterización de los movimientos se obtienen los valores máximos y mínimos para cada eje del joystick y se presentan en las tablas 4.6, 4.7 y 4.8.

Para el eje X:

Tabla 4.6. Rangos de voltaje del joystick en el eje X y asignación de valores según el DAC.

| Eje X | | | | | |
|----------------|-------|---------|-------|----------------|-------|
| -X | | Origen | | X | |
| Voltaje mínimo | Valor | Voltaje | Valor | Voltaje máximo | Valor |
| 1.7 V | 346 | 2.5 V | 512 | 3.3 V | 676 |

Para el eje Y:

Tabla 4.7. Rangos de voltaje del joystick en el eje Y y asignación de valores según el DAC.

| Eje Y | | | | | |
|----------------|-------|---------|-------|----------------|-------|
| -Y | | Origen | | Y | |
| Voltaje mínimo | Valor | Voltaje | Valor | Voltaje máximo | Valor |
| 1.75 V | 355 | 2.5 V | 512 | 3.3 V | 680 |

Para el eje Z:

Tabla 4.8. Rangos de voltaje del joystick en el eje X y asignación de valores según el DAC.

| Eje Z | | | | | |
|----------------|-------|---------|-------|----------------|-------|
| -Z | | Origen | | Z | |
| Voltaje mínimo | Valor | Voltaje | Valor | Voltaje máximo | Valor |
| 1.54 V | 315 | 2.5 V | 512 | 3.54 V | 725 |

Debido a los valores que se obtienen en la lectura de los ejes del joystick es necesario realizar un acondicionamiento de valores para poder trabajar con ellos de manera más simple. El objetivo es tener un valor de 0 en el origen del joystick para que el mecanismo no tenga ningún movimiento en ese punto y valores incrementales al moverlo en cualquier dirección. Se desea tener un control análogo a un automóvil, en el que se controla la dirección de giro y avance (el volante), y la velocidad (el acelerador). El eje X representa entonces a la dirección y el eje Y representa al acelerador. El eje Z está destinado a controlar la silla mediante giros sobre su propio eje, es decir, aplicar velocidades de igual magnitud pero de signo contrario en cada rueda. Entonces para el eje Y y para el eje Z se requieren valores positivos incrementales, ya sea que se mueva hacia arriba o hacia abajo (eje Y) o giro hacia la derecha o a la izquierda (eje Z). Esto se logra realizando una resta del valor leído en el DAC menos el valor central o del origen y viceversa. A continuación se presenta la manera en la que se obtienen únicamente valores positivos incrementales para ambos ejes:

$$Eje Y_{arriba} = (lectura\ real\ ADC) - 530 \Rightarrow \text{Valores de 0 a 150}$$

$$Eje Y_{abajo} = 495 - (lectura\ real\ ADC) \Rightarrow \text{Valores de 0 a 140}$$

$$Eje Z_{izquierda} = (lectura\ real\ ADC) - 535 \Rightarrow \text{Valores de 0 a 190}$$

$$Eje Z_{derecha} = 495 - (lectura\ real\ ADC) \Rightarrow \text{Valores de 0 a 180}$$

Se implementa un rango de tolerancia o histéresis entre los límites del valor medio, idealmente el valor medio es 512, pero debido a la sensibilidad del joystick, produce cambios abruptos o switcheos entre un cuadrante y otro, por este motivo se deja el rango de tolerancia como se ve en las ecuaciones.

Ahora que se tienen valores positivos para el acelerador y para el eje Z, se realiza un mapeo de éstos para trabajar con el rango de valores que se desee, esto se lleva a cabo mediante la siguiente fórmula [45]:

$$y = \frac{(x - in_min) * (out_max - out_min)}{(in_max - in_min) + out_min} \quad (62)$$

donde

x =Variable a mapear.

in_min = Valor mínimo de la variable de entrada.

in_max = Valor máximo de la variable entrada.

out_min = Valor mínimo de la variable de salida.

out_max =Valor máximo de la variable de salida.

De esta manera mapeamos todos los valores del joystick, el movimiento positivo del eje Y se define como “Avance” y está mapeado para entregar valores de 0 a 200, el movimiento negativo del eje Y se define como “Retroceso” y está mapeado para entregar valores de 0 a 200, el movimiento a lo largo de todo el eje X se define como “Dirección” y entrega valores de un extremo a otro de 0 a 200, estos valores se definen para aplicar una ecuación cuadrática que describe el comportamiento del ancho de pulso (PWM) en función de la dirección, esto se explica en la sección 4.3.2. Finalmente el giro a la derecha del eje Z entrega valores de 0 a 255 al igual que el giro a la izquierda, este rango de valores se elige debido a que las salidas PWM del microcontrolador son de 8 bits, es decir un rango de 0 a 255 valores, entonces se aplica el valor mapeado del potenciómetro a los puertos de salida de la tarjeta de control directamente.

4.4.2 Etapa de procesamiento

Ahora que las variables se encuentran en los rangos deseados o de conveniencia, se necesita controlar la velocidad que el usuario desea, es decir, asociar las variables de entrada con las de salida, en este caso se debe de controlar la velocidad que debe de tener cada rueda de la SRM en función proporcional al movimiento del joystick.

Debido a que el mecanismo se basa en una estructura de tipo diferencial la dirección del sistema estará dada en la diferencia de velocidades de cada rueda. Es necesario asociar la variable “Dirección” a las señales PWM que van a controlar los motores, el movimiento del joystick sobre el eje X determinará que rueda se moverá, mientras que el movimiento en el eje Y determinará la velocidad con la que éstas se moverán, por lo tanto la variable “Dirección” y las variables “Avance” y “Retroceso” determinarán el valor del modulador PWM de cada rueda, lo que indica que estas variables se encuentran una en función de otra.

Se requiere de una ecuación que permita abarcar el espacio de trabajo del joystick incluyendo ambas variables, la dirección y el acelerador. Se propone una función cuadrática del tipo $y = ax^2 + bx + c$ [46].

$$Dir = \left(\frac{(Dirección_x - 100)^2}{10000} + 1 \right) \quad (63)$$

Mediante esta ecuación es posible calcular la dirección que tendrá la SRM con base en el movimiento del joystick sobre el eje X, ahora es necesario relacionar el movimiento con el eje Y, es decir, agregar el acelerador al sistema. Esto es posible gracias a la siguiente ecuación que calcula el valor que tendrán los moduladores PWM (en una dirección) de cada rueda con base en el movimiento del joystick.

$$\begin{aligned} PWMI &= Dir * Acelerador \\ PWMD &= Acelerador * 200 \end{aligned} \quad (64)$$

Ahora que se tienen estas ecuaciones definidas se desarrolla el algoritmo de control para realizar el cálculo de las variables PWM que son traducidas como la velocidad de cada rueda del sistema, las cuales proporcionan la dirección y la velocidad que el usuario desea. En la Fig. 70 se presenta un diagrama de flujo del algoritmo implementado y a continuación se describe de manera general su funcionamiento.

Se realiza la declaración de variables donde se almacenan los datos leídos y previamente acondicionados de los potenciómetros. La variable “Avance” almacena los datos que genera el potenciómetro al moverse sobre el eje Y, la variable “Retroceso” almacena los datos del potenciómetro al moverse en el eje Y negativo, ambas variables se utilizan como el acelerador del sistema, determinan la rapidez con la que se moverán las ruedas y la dirección de avance (avanzar o retroceder). La variable “Dirección” almacena los datos recopilados por el movimiento del joystick a lo largo del eje X y se utiliza para determinar la orientación de giro de la silla, esta variable tiene la información de la dirección que el usuario desea.

Se calcula la ecuación cuadrática anterior y el resultado se almacena en una nueva variable llamada “Dir”. El algoritmo está monitoreando las entradas y al mínimo movimiento del joystick pregunta si el acelerador está en modo avance o en modo retroceso, si el mecanismo está en modo avance, se activa la señal de sentido de giro y se pone en alto o en uno lógico, lo que indica que el mecanismo irá hacia adelante, posteriormente se pregunta si la variable de dirección es menor que 100, si esta condición se cumple indica que la silla avanzará hacia la izquierda, de lo contrario el giro será a la derecha. Con base en esta información es posible generar el ancho de pulso que tendrá cara motor, es decir, se controla que rueda va a girar y a qué velocidad. Se calcula la ecuación para abarcar ambos movimientos del joystick, la dirección y el acelerador y estos valores se almacenan en las variables “PWMI” y “PWMD”, las cuales ahora tienen la información correspondiente a la

orientación y velocidad deseada por el usuario. Finalmente estas variables son mapeadas en un rango de 0 a 255 debido a que como se mencionó antes, los puertos PWM del microcontrolador son de 8 bits, y de esta manera se ocuparía todo el rango del ancho de pulso. Si el algoritmo detecta que la condición de avance no se cumple entonces pregunta por la condición de retroceso, si esta se cumple el proceso es el mismo pero ahora la señal de sentido de giro se invierte lo que ocasiona activar señales de inversión de giro de los motores, esto mediante el driver de la etapa de potencia que se explica en la sección 4.6, y únicamente se invierten los valores de las señales del PWM en las ruedas, es decir, la señal de que era para la rueda izquierda en la función de avance se asigna a la rueda derecha, y de igual forma para la señal de la rueda derecha. Si la condición de retroceso tampoco se cumple, indica que el sistema está en reposo y las señales de PWM se apagan.

Las ecuaciones 63 y 64 permiten el control de dirección y velocidad de la SRM en todo el rango de movimiento del joystick, cuando el joystick se mueva en línea recta hacia adelante o hacia atrás, los moduladores PWM tendrán el mismo valor en ambas ruedas, lo que indica un movimiento en línea recta, conforme el joystick se vaya moviendo hacia uno de los lados, se traducirá como un movimiento curvo, lo que ocasiona que los moduladores tengan valores diferentes entre ellos, es decir, una rueda irá más rápida que otra, dependiendo el sentido de giro.

El código desarrollado sobre la plataforma Arduino del procesamiento se presenta en el apéndice D.1.

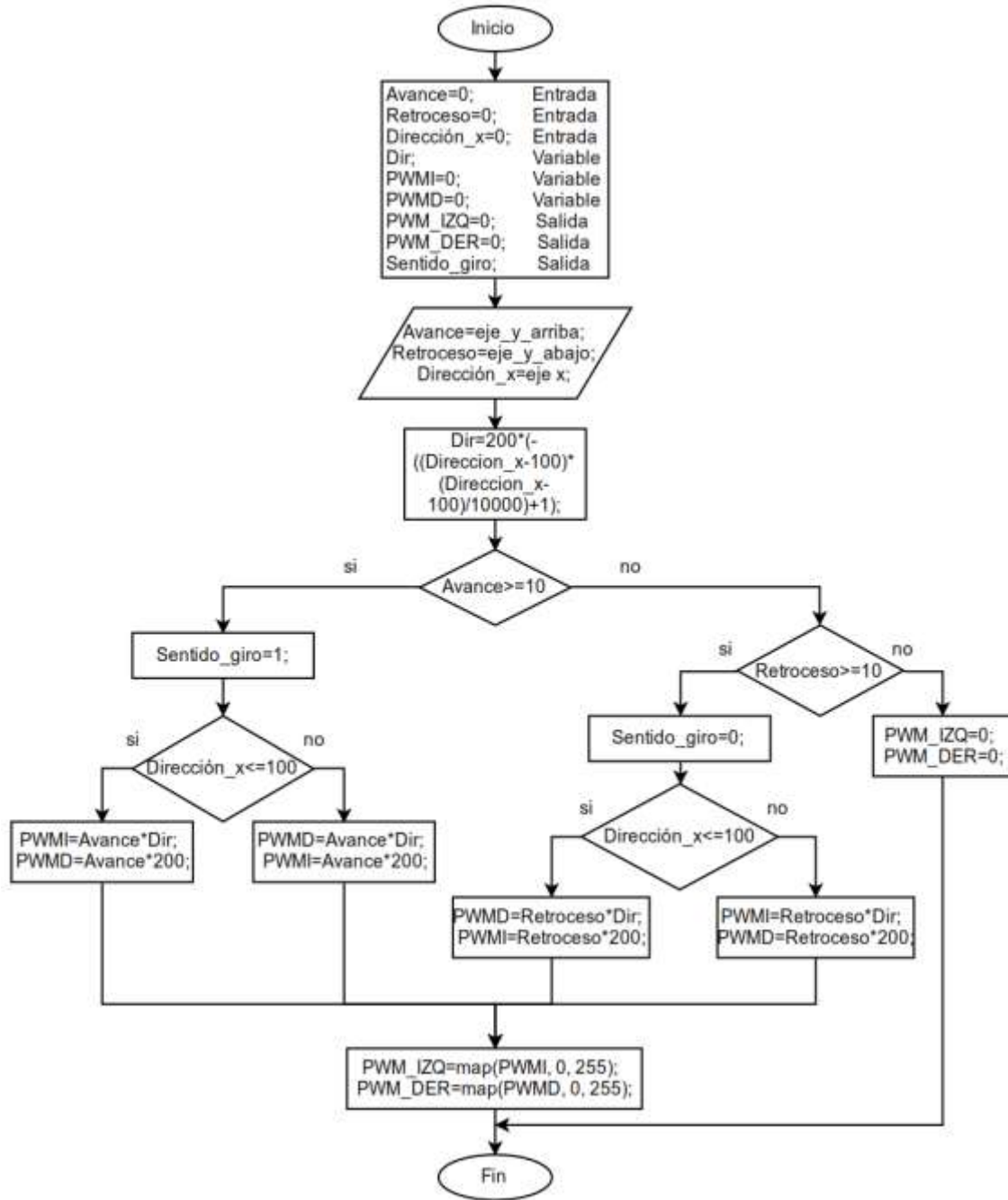


Figura 4.23. Diagrama de flujo del cálculo del ancho de pulso en función del joystick para mover las ruedas de la SRM.

4.5 Control del sistema mediante la aplicación móvil

Se desarrolla una aplicación bajo la plataforma de Android, con la finalidad de controlar inalámbricamente la silla de ruedas. La transferencia de datos es mediante el

protocolo de comunicación bluetooth a una velocidad de 9600 baudios por segundo. El módulo que permite la transmisión de datos es un módulo HC-05 mencionado en la sección 4.2.3. El funcionamiento del protocolo es básicamente el siguiente:

- El módulo empotrado en la SRM funciona como servidor, crea un socket de tipo Bluetooth ServerSocket y lo pone a la escucha de peticiones de conexión.
- El cliente que en este caso es la aplicación desarrollada realiza, a través del socket, una solicitud de conexión. Esta llamada es bloqueante, por lo que el resultado sólo podrá ser éxito o fracaso.
- El servidor acepta la conexión, notificándose al cliente. A continuación, abre un socket de tipo BluetoothSocket como resultado de aceptar la conexión. El cliente recibe la notificación del servidor, dando como resultado una conexión correcta. Tanto cliente como servidor obtienen los flujos de entrada y salida de su respectivo socket [47].

El módulo receptor (HM-10) transmite los datos enviados por la aplicación a través del puerto UART del microcontrolador. De igual manera el microcontrolador puede enviar datos a la aplicación para monitorear el sistema.

4.5.1 La interfaz y diseño de la aplicación

La interfaz que permite la comunicación entre el teléfono móvil y la SRM está diseñada y programada en el ambiente App Inventor. App Inventor es un entorno de desarrollo de software creado por Google Labs para la elaboración de aplicaciones destinadas al sistema operativo Android. El usuario puede, de forma visual y a partir de un conjunto de herramientas, enlazar bloques para crear la aplicación.

El editor de bloques de la plataforma App Inventor está basado en Blockly de JavaScript para crear un lenguaje visual. Estas librerías están distribuidas por Massachusetts Institute of Technology bajo su licencia libre. El compilador que traduce el lenguaje visual de los bloques para la aplicación en Android utiliza Kawa como lenguaje de programación, distribuido como parte del sistema operativo GNU de la Free Software Foundation [48].

El proceso de diseño y desarrollo de una aplicación, abarca desde la concepción de la idea hasta el análisis de su funcionamiento. A continuación se explican las etapas realizadas para el desarrollo de la aplicación.

- **Conceptualización.** La idea de realizar una aplicación que controle la SRM de manera inalámbrica surge por la necesidad que presentan algunas personas con discapacidad de trasladarse en un ambiente controlado y se les dificulta o les es imposible utilizar sus extremidades superiores.
- **Definición.** La aplicación está desarrollada y orientada a la facilitación y comodidad del usuario para el control del mecanismo, además permite el control de éste por un tercero desde la comodidad de su teléfono.

La aplicación permite la comunicación bluetooth con la SRM y es capaz de controlarla mediante trayectorias definidas, en este caso: “Movimiento en línea recta hacia adelante”, “Movimiento en línea recta hacia atrás”, “Giro hacia la derecha”, “Giro hacia la izquierda” y “Paro”. La aplicación permite así mismo el control de manera deliberada de las trayectorias, es decir, el usuario puede dirigir a la SRM a través de la trayectoria que desee.

- **Diseño y desarrollo.** Mediante la aplicación se elige el dispositivo con el cual se desea realizar la comunicación inalámbrica para emparejarse y comenzar a compartir datos. Para realizar el diseño de la interfaz es necesario realizar el Wireframing, que es el proceso de crear una maqueta o prototipo de la aplicación, es una representación visual o boceto de ésta. Este wirefaming se desarrolla en una herramienta online llamada “Ninjamock”, la cual permite colocar y estructurar todos los datos y gráficos representativos en su lugar, además de añadir funcionalidad con la colocación de botones, de modo que se pueda navegar a través de la aplicación.

El prototipo de la interfaz deseada se presenta en la Fig. 4.24, posteriormente se explica cada parte de la interfaz, su funcionamiento, así como la manera en la que ésta es programada. El diseño de la aplicación o interfaz se compone de 4 elementos principales:

1. Botón de conectar.
2. Sistema de dirección para trayectorias definidas.
3. Control manual para trayectorias deseadas.
4. Botón de desconectar.

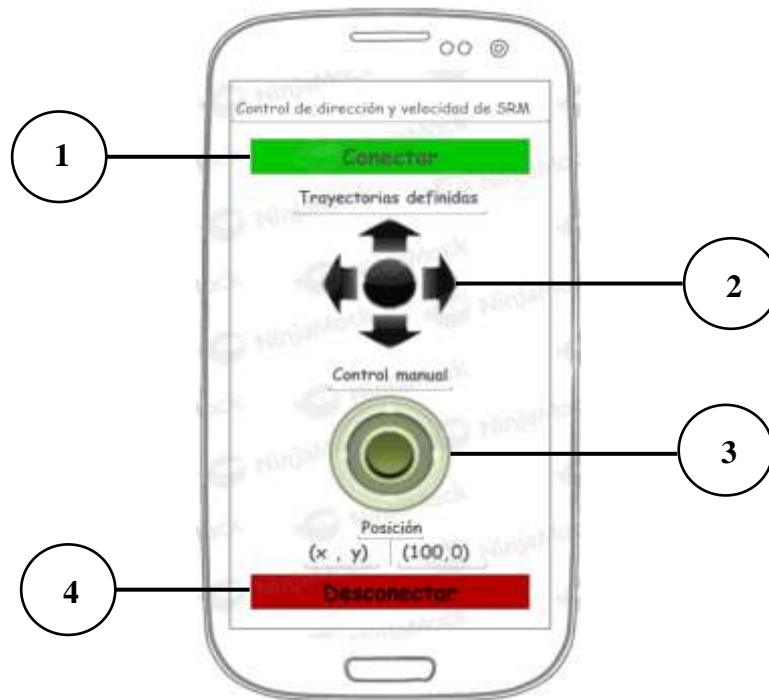


Figura 4.24. Representación visual o boceto de la aplicación para controlar la SRM.

En el apartado siguiente se explica la función de cada elemento así como su programación.

4.5.1.1 Descripción del programa

Como se mencionó anteriormente la aplicación está desarrollada en la plataforma App Inventor. Se describe a continuación la manera en la que funciona cada elemento de la interfaz y la programación que requiere para su funcionalidad.

1. Botón de conectar.

Al presionar el botón conectar, la aplicación muestra una lista de los dispositivos bluetooth disponibles para establecer comunicación (ver Fig. 4.25). Se programa una acción que se realiza al presionar el botón “Conectar”, el cual es un evento que ocurre antes de que se muestre la lista o los elementos a conectarse, y se utiliza precisamente para preparar dicha lista antes de ser mostrada (ver Fig. 4.26).



Figura 4.25. Representación visual de la lista de dispositivos disponibles para la comunicación.



Figura 4.26. Bloque para preparar la lista de dispositivos bluetooth disponibles.

Después de la selección de un dispositivo bluetooth, se envía un mensaje a la pantalla de “Conectado” y se habilita el reloj (Timer) en caso de que la conexión con el dispositivo bluetooth se haya realizado (ver Fig. 74). La comunicación bluetooth entre la aplicación y la tarjeta de control de la SRM se realiza a una velocidad de 9600 baudios por segundo.

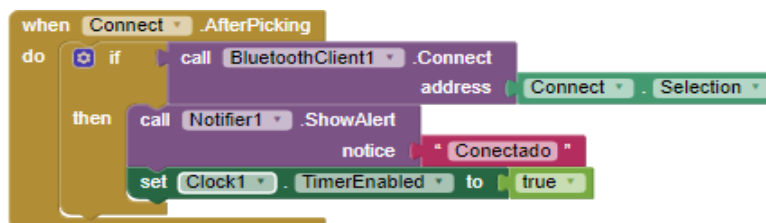


Figura 4.27. Bloque para activar el reloj de la aplicación y para alertar al usuario que tuvo una conexión exitosa.

2. Sistema de dirección para trayectorias definidas.

Esta etapa de la aplicación permite al usuario seleccionar un movimiento definido como “Avance en línea recta”, “Retroceso en línea recta”, “Giro hacia la derecha”, “Giro hacia la izquierda” o “Paro”, estos movimientos se activan al presionar las flechas de dirección en la interfaz (marcadas con el número 2), mientras que el botón de “paro” detiene la silla y está representado por el botón central del conjunto de flechas de dirección.

Cuando se presiona el botón “GoForward” se envía dos caracteres vía bluetooth. El primer carácter es distintivo del botón y el segundo carácter indica que finaliza la trama de datos que se envía y está representado con una letra “f” (ver Fig. 4.28). Lo mismo ocurre con el resto de los botones que se muestran en la Fig. 4.29.

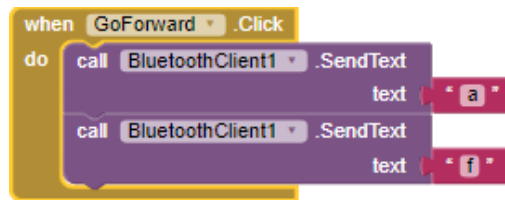


Figura 4.28. Envío de caracteres del botón “GoForward” a la tarjeta de control para su procesamiento.

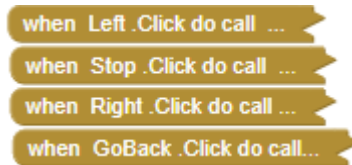


Figura 4.29. Envío de caracteres de los botones de dirección y paro a la tarjeta de control.

Caracteres que se envían con cada botón:

- “GoForward”: af
- “Left”: if
- “Stop”: pf
- “Right”: df
- “GoBack”: rf

3. Control manual para trayectorias deseadas.

Esta parte de la aplicación permite al usuario controlar la SRM en la dirección que el desee, esto a través de un joystick virtual que determina la dirección y la velocidad que el usuario precisa a través del movimiento de éste.

Para el diseño del joystick se requiere un espacio de trabajo denominado “Canvas” el cual es un marco definido por las dimensiones deseadas por el diseñador, su función es que cuando el usuario presione ese espacio devuelve un valor con las coordenadas del lugar que se tocó. Con base en esto, se introduce un elemento móvil redondo, al que se hará referencia como joystick, para efectos de diseño y visualización se dibujan circunferencias alrededor de dicho joystick.

A continuación se presenta la sección del programa que dibuja los círculos alrededor del radio del joystick para hacerlo más amigable al usuario (ver Fig. 4.30). Los círculos blancos se dibujaron para dar la apariencia de tener anillos, ya que los círculos que se dibujan son rellenos.

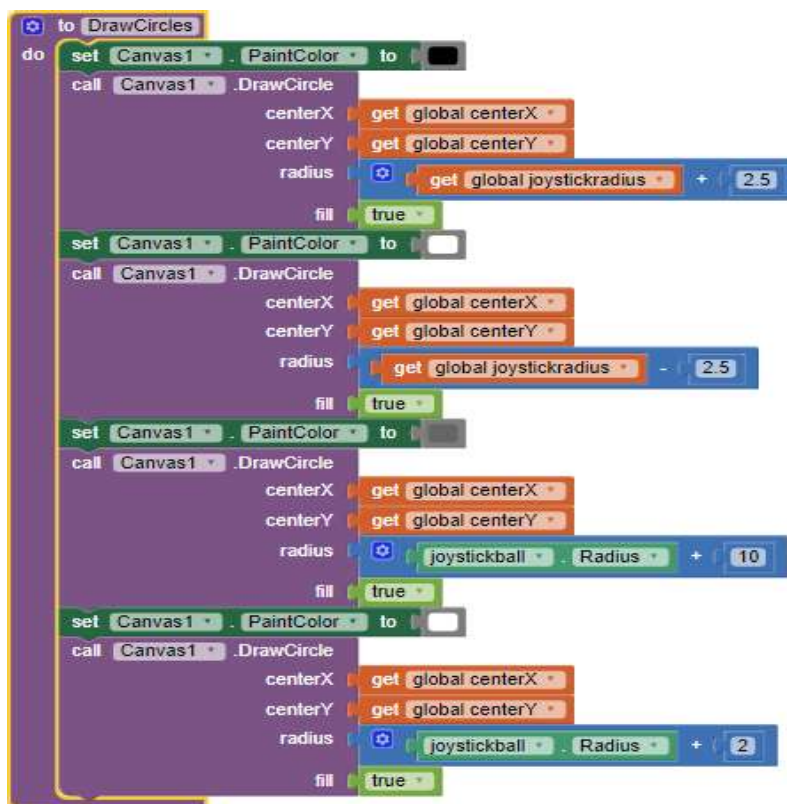


Figura 4.30: Bloques destinados al trazado de circunferencias para estética del joystick.

Es necesario definir las variables con las que la aplicación trabajará, son variables globales para el movimiento del joystick (ver Fig. 4.31):

- “D” es la dimensión del cuadrado que tiene inscrito el círculo con el radio del joystick. En caso de que el Canvas sea un rectángulo este toma el lado más corto del Canvas
- “Xposition” es la coordenada X actual del joystick
- “Yposition” es la coordenada Y actual del joystick

- “centerX” es la coordenada X del centro del círculo exterior del joystick (CanvasWidth/2)
- “centerY” es la coordenada Y del centro del círculo exterior del joystick (CanvasHight/2)
- “joystickradius” es el radio del círculo delimitador generado
- “A” es la distancia que se genera al mover el joystick con respecto al punto central u origen.



Figura 4.31. Declaración de variables globales para movimiento del joystick,

El algoritmo para la variable A retorna la distancia que existe desde el centro hasta el joystick al ser movido (ver Fig. 4.33). Esto hace posible tener joystick dentro de cierto radio. La sentencia *if-then-else* revisa si la distancia del joystick desde el centro (variable A) es más grande que el radio exterior. Si esto es cierto entonces el joystick se mueve dentro del círculo y sobre los límites de la circunferencia, sin exceder el área de trabajo previamente definida.

Se pretende tener un sistema de adquisición de datos genérico que permita la manipulación de la SRM mediante diversos dispositivos sin tener que modificar el código de programación al cambiar de dispositivo, por este motivo los valores generados por el movimiento del joystick virtual se mapean en un rango de 0 a 200 como se explicó en la sección 4.3.1. En la Fig. 4.32 se presenta el procedimiento para mapear las variables “Xposition” y “Yposition” e reinterpretas en un rango de 0 a 200.



Figura 4.32. Mapeo de variables que representan las coordenadas de movimiento del joystick.

The code block is titled 'when Canvas1 .Dragged'. It starts with a 'do' loop containing several 'initialize local' and 'set' blocks for variables AX, AY, and global A. Global A is calculated as the square root of the sum of squares of AX and AY. An 'if' block checks if global A is greater than global joystickradius. If true, it calculates global Xposition and global Yposition using trigonometric formulas: $X = \frac{AX \times \text{joystickradius}}{A} + \text{global centerX}$ and $Y = \frac{AY \times \text{joystickradius}}{A} + \text{global centerY}$. It then calls joystickball .MoveTo with x = global Xposition - joystickball .Radius and y = global Yposition - joystickball .Radius. If the 'if' condition is false, it sets global Xposition to currentX and global Yposition to currentY, and calls joystickball .MoveTo with x = global Xposition - joystickball .Radius and y = global Yposition - joystickball .Radius. Finally, it calls getAngle, sets xy .Text to join round, call xyB, and xy get global Xposition, and another block with 200, round, call xyB, and xy get global Yposition.

Figura 4.33. Bloques para generar las coordenadas del movimiento del joystick.

Para simular el retorno de resorte de un joystick real es necesario regresar el elemento móvil o joystick al origen del Canvas. La sección de código representada en la Fig. 81 regresa el joystick al origen una vez que el usuario deja de tocar la pantalla.

The code block is titled 'when Canvas1 .TouchUp'. It contains a 'do' loop with 'set global Xposition to get global centerX' and 'set global Yposition to get global centerY'. It then calls joystickball .MoveTo with x = global Xposition - joystickball .Radius and y = global Yposition - joystickball .Radius. Finally, it sets xy .Text to join round, call xyB, and xy get global Xposition, and another block with 200, round, call xyB, and xy get global Yposition.

Figura 4.34: Bloques para simular el retorno de resorte del joystick virtual.

Cuando se muestra la pantalla de la aplicación por primera vez, esta ejecuta los procedimientos Reset y DrawCircles, en la Fig. 4.35 se presenta el bloque que realiza esta función.

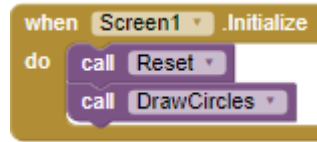


Figura 4.35. Bloques para resetear la interfaz de la aplicación al abrirse por primera vez.

En la Fig. 4.36 se presenta el procedimiento que deshabilita el reloj (que se encarga de las interrupciones cada intervalo de tiempo), envía una notificación en caso de que el bluetooth del teléfono esté deshabilitado, mide el tamaño del joystick, dibuja los círculos del joystick y regresa el joystick al centro.

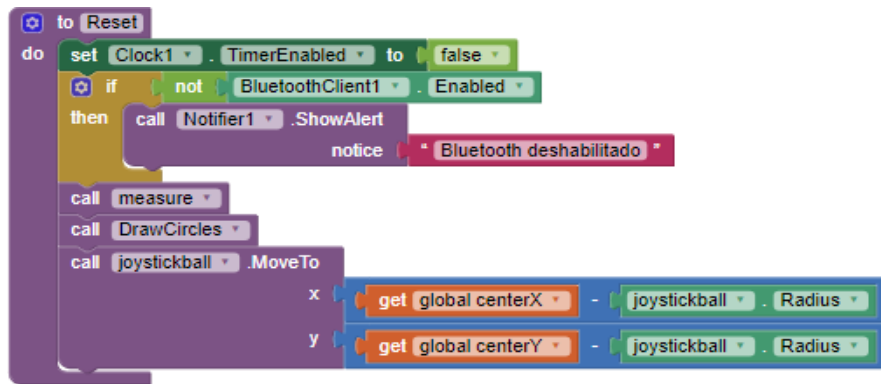


Figura 4.36: Bloques para resetear el sistema.

En cada intervalo de tiempo definido por el usuario, se ejecutan las acciones dentro de Clock1.Timer. Primero se pregunta si el joystick está en el centro, de ser así se envía la coordenada de éste una sola vez, de lo contrario, se envía constantemente la coordenada mediante bluetooth. Al final de cada coordenada se envía el carácter “f” para finalizar la trama de datos enviados (ver Fig. 4.37).

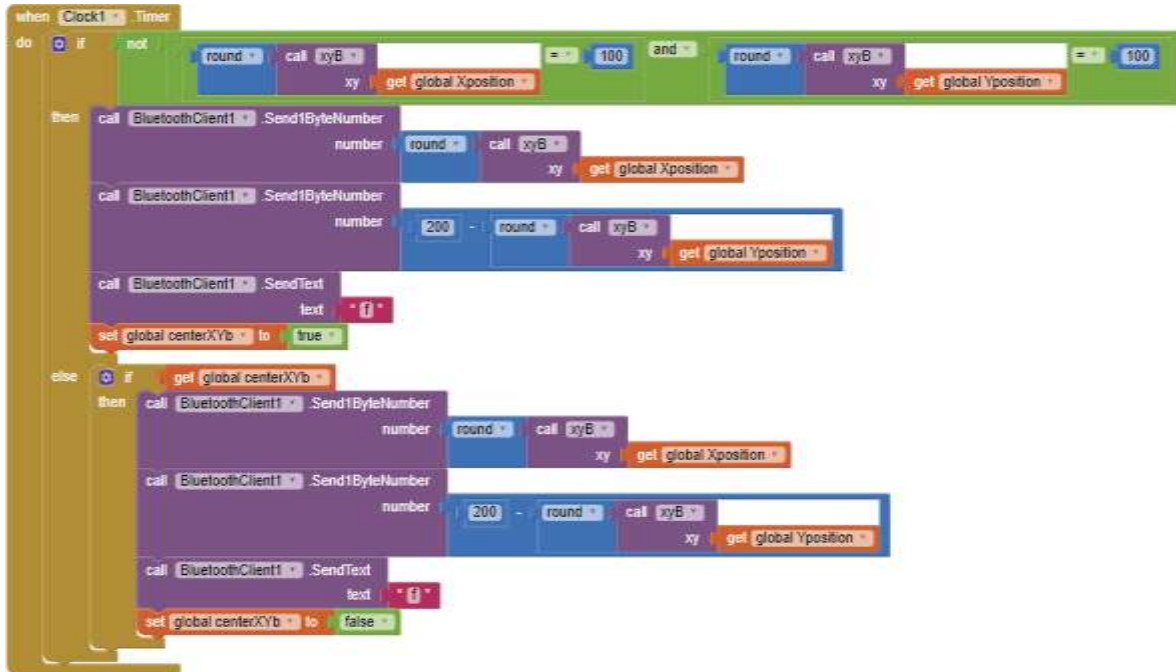


Figura 4.37. Envío de datos de coordenadas del joystick a la tarjeta de control.

4. Botón de desconectar.

Cuando se presiona el botón “Disconnect” se deshabilita el reloj, se desconecta el dispositivo bluetooth anteriormente vinculado con el teléfono y se envía el mensaje “Desconectado” a la pantalla (ver Fig. 4.38).

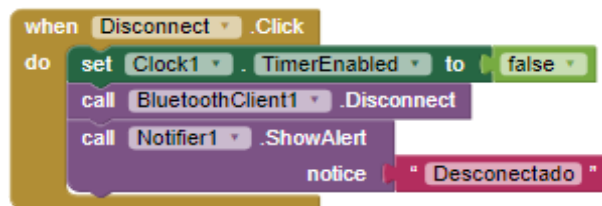


Figura 4.38: Bloques para desconectar el bluetooth y finalizar la transmisión de datos.

4.5.2 Etapa de procesamiento de señales

El código programado en el microcontrolador permite realizar las acciones correspondientes al presionar cada botón de la aplicación, de manera que el sistema sepa en qué dirección moverse mediante las señales enviadas a la etapa de potencia. El algoritmo para recibir las señales provenientes de la aplicación se encarga de almacenar los datos en variables de tipo “Byte” ya que como se explicó anteriormente, al finalizar cada acción realizada en la

aplicación por el usuario, ésta envía una letra “f” para indicar el final de la trama de valores procesados según el movimiento realizado.

Se definen las variables que almacenarán las coordenadas de la circunferencia móvil que representa al joystick (“x” y “y”) enviado desde el teléfono, la variable “y” se inicializa en 0, que hace alusión al acelerador y la variable “x” se inicializa en 100 y hace referencia a la dirección, estos valores indican el estado de reposo de la silla, es decir, que el joystick está el origen. Estos valores se definen así para implementar el mismo código de interpretación explicado en la sección 4.3.2. A cada botón de dirección de la aplicación se le asigna un carácter que representa un movimiento determinado y una acción específica dentro del procesamiento:

- **Botón de avance:** envía la letra “a” e indicará que la silla tiene que realizar un movimiento en línea recta hacia adelante, lo que implica que los moduladores PWM tendrán el mismo valor para conseguir esta trayectoria.
- **Botón de retroceso:** envía la letra “r” e indicará que la silla tiene que realizar un movimiento en línea recta hacia atrás, lo que implica que los moduladores PWM tendrán el mismo valor para conseguir esta trayectoria.
- **Botón de dirección izquierdo:** envía la letra “i” e indicará que la silla tiene que realizar un movimiento hacia la izquierda, lo que implica que los moduladores PWM tendrán valores distintos, el modulador de la rueda derecha tendrá el máximo valor y el de la rueda izquierda tendrá 0, de esta manera se produce el giro hacia la izquierda.
- **Botón de dirección derecho:** envía la letra “d” e indicará que la silla tiene que realizar un movimiento hacia la derecha, lo que implica que los moduladores PWM tendrán valores distintos, el modulador de la rueda izquierda tendrá el máximo valor y el de la rueda derecha tendrá 0, de esta manera se produce el giro hacia la derecha.
- **Botón de central o de paro:** envía la letra “p” e indicará que la silla tiene que estar en reposo, lo que implica que los moduladores PWM estarán apagados o tendrán un valor de 0.

Después de enviar el carácter correspondiente a cada botón, la aplicación envía una letra “f” para indicar el final de la trama de datos enviada. Se define una variable de salida llamada “Dirección”, la cual se inicializa con un carácter “p”. La variable “Dato” recibe toda la información que viene de la aplicación a través del puerto UART, es decir, almacena los valores enviados al presionar un botón o realizar un movimiento en el joystick. La variable “i” nos permite discernir si la información recibida proviene del joystick virtual o de alguno

de los botones restantes de la aplicación. Se lee esa información del puerto serial y se almacena en la búfer “Dato”, la función “Serial.readBytesUntil” devuelve el número de bytes que leyó en el búfer hasta encontrar el carácter terminador “f” o hasta que 10 bytes hayan sido leídos y este número se almacena en “i”. Si “i” es igual a 1, significa que la información almacenada en “Dato” proviene de un botón de la aplicación y no del joystick, por lo tanto el único valor almacenado en “Dato” es asignado a “Dirección”, pero en caso de que esta información no sea la esperada, a “Dirección” se le asigna por default “p”. Cuando “i” es mayor que 1, significa que la información proviene del joystick de la aplicación y por lo tanto se reciben las coordenadas del joystick y se almacenan en “x” y “y”. En la Fig. 4.39 se presenta el diagrama de flujo del algoritmo implementado.

El código desarrollado para el procesamiento aquí descrito se presenta en el apéndice D.2.

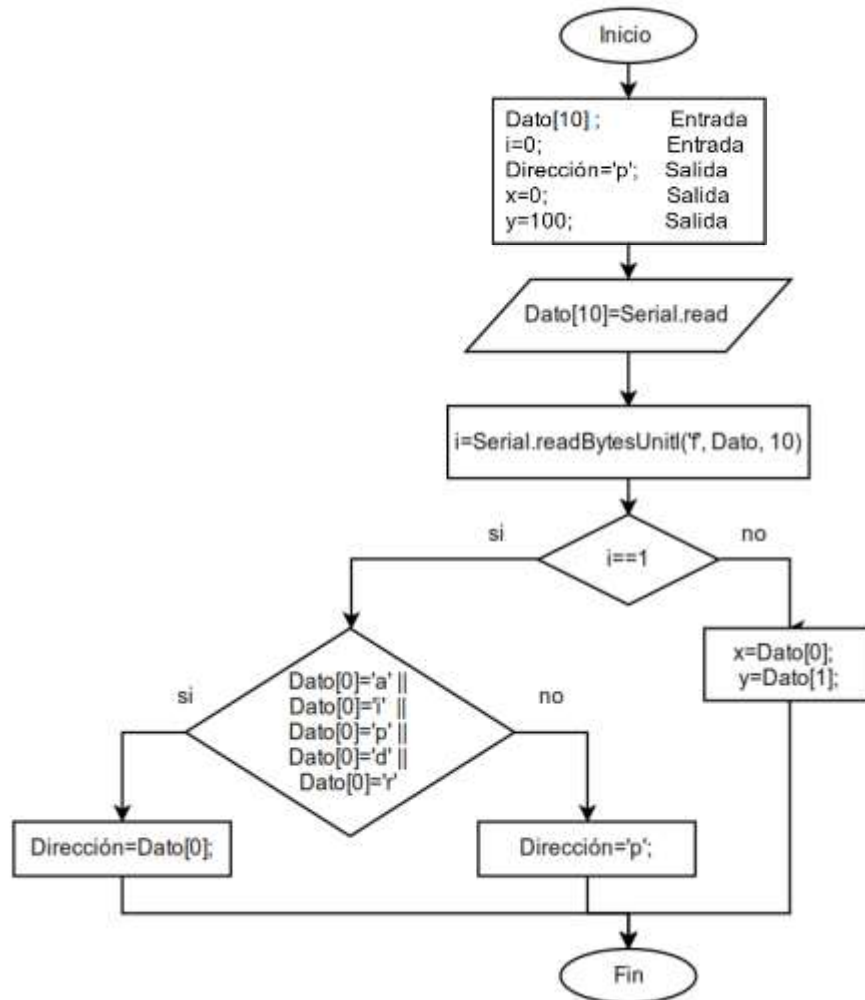


Figura 4.39: Diagrama de flujo para la adquisición de datos enviados por la aplicación.

4.6 Control del sistema mediante brazalete de lecturas EMG

Se lleva a cabo la implementación de un brazalete Myo (ver Fig. 4.40), el cual es capaz de recoger los impulsos eléctricos que generan los músculos del brazo, detectando gran cantidad de movimientos, incluidos los de la muñeca y los dedos, así el abanico de posibilidades a la hora de configurar gestos es enorme (ver Fig. 4.41).



Figura 4.40. Brazalete Myo.

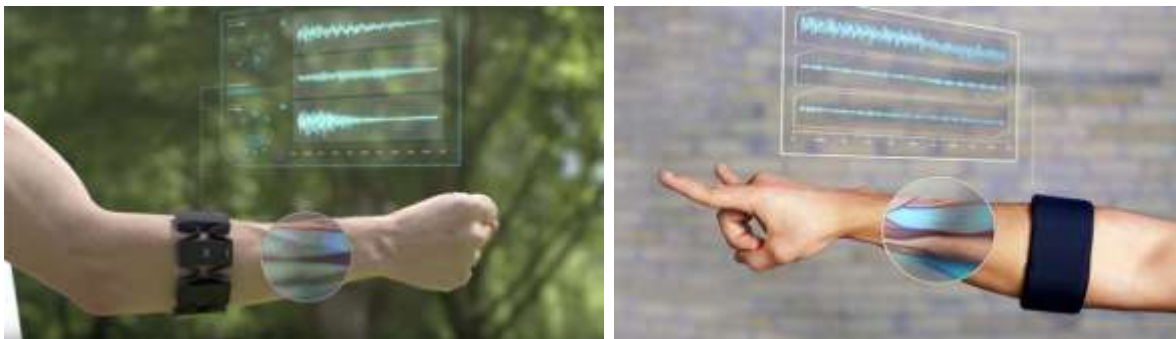


Figura 4.41. Detección de movimientos musculares con el brazalete Myo.

El dispositivo Myo está compuesto por un conjunto de eslabones que integran sensores de grado médico de acero inoxidable de alta sensibilidad. Estos dispositivos son capaces de reconocer e interpretar la actividad eléctrica de los músculos y utilizar estas señales como instrucciones para controlar los aparatos electrónicos a distancia y sin necesidad de cables.

Las señales EMG devueltas por los sensores representan el potencial eléctrico de los músculos como resultado de la activación muscular [49]. Sin embargo, dado que el potencial eléctrico del músculo es pequeño, en el rango de milivoltios. El rango de potenciales proporcionados por el brazalete Myo está entre -128 y 128 en unidades de activación

Estas unidades de activación son valores enteros de la amplificación de los potenciales medidos por los sensores EMG. El brazalete Myo es capaz de extraer datos EMG a una frecuencia de muestreo de 200Hz.

El brazalete Myo también tiene una unidad de medición inercial (IMU) de nueve ejes que contienen un giroscopio de tres ejes, un acelerómetro de tres ejes y un magnetómetro de tres ejes [50].

4.6.1 Etapa de adquisición de señales

Para configuraciones que pretenden obtener datos gestuales usando el brazalete Myo, se requieren el brazalete y un USB Bluetooth o “Dongle” para la conexión con una computadora para el procesamiento y detección de la señales. Para el caso de la SRM no se requiere un enlace con la computadora para la manipulación de las señales, por lo que es necesario eliminar el “Dongle” y realizar una comunicación directamente con la tarjeta de adquisición de datos y control.

La comunicación entre el brazalete y el sistema mecánico es a través del módulo Bluetooth HM-10 mencionado anteriormente, a una velocidad de transferencia de datos de 115200 baudios por segundo. Es necesario flashear el módulo para que permita detectar el GAP (Generic Access Profile) del brazalete, emparejarse y realizar la comunicación entre los dispositivos, para enviar la información a la tarjeta de control. Para poder adquirir los datos en la tarjeta es necesario implementar una librería llamada “MyoBridge”. MyoBridge es una librería de código abierto C++ para el brazalete Myo. Los componentes subyacentes de Myo están escritos en C ++. La librería MyoBridge proporciona acceso a las funciones SDK de Myo. Las funciones incluyen identificar un brazalete Myo conectado e interceptar eventos que incluyen datos EMG e IMU. El firmware de MyoBridge es un firmware personalizado para el Módulo BLE HM-10 y está desarrollado para ejecutarse sobre la plataforma de Arduino y conectarse directamente al brazalete Myo. Cuando el MyoBridge está conectado a un brazalete de control gestual de Myo, el Arduino puede enviar comandos o recibir datos del sensor del Myo utilizando la biblioteca MyoBridge. La comunicación entre HM-10 / MyoBridge y Arduino usa una conexión en serie simple de dos cables, mientras que el módulo HM-10 se conecta directamente al Myo Armband (ver Fig. 4.42). Al usar la librería para Arduino, puede leer fácilmente los datos de Myo, sin la necesidad de ningún PC o teléfono intermedio.

De esta manera, mediante las señales recibidas por el brazalete, la tarjeta de control realiza una asignación de valores, que posteriormente se utilizan para la caracterización y clasificación de los movimientos, permitiendo así enviar señales de control para la manipulación de la SRM.

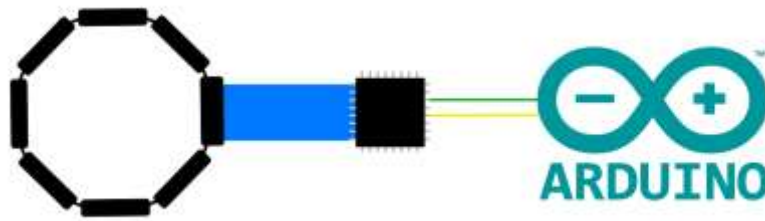


Figura 4.42. Conexión directa entre el brazalete Myo y una tarjeta Arduino a través de un módulo BLE HM-10.

4.6.2 Etapa de procesamiento de señales

Ahora que se tiene la comunicación entre el brazalete Myo y la tarjeta de control a través de la librería MyoBridge, es necesario procesar las señales, de modo que permita el control deseado de la SRM.

Se definen 5 acciones para 5 movimientos específicos de la mano para el control de la SRM:

- **Cerrar mano:** Este gesto indica que la silla tiene que realizar un movimiento en línea recta hacia adelante, lo que implica que los moduladores PWM tendrán el mismo valor para conseguir esta trayectoria (ver Fig. 4.43).



Figura 4.43. Representación del movimiento de cerrar mano.

- **Abrir mano:** Este gesto indica que la silla tiene que estar en reposo, lo que implica que los moduladores PWM estarán apagados o tendrán un valor de 0 (ver Fig. 4.44).



Figura 4.44. Representación del movimiento de abrir mano.

- **Movimiento de aducción:** Este gesto indica que la silla tiene que realizar un movimiento hacia la izquierda, lo que implica que los moduladores PWM tendrán valores distintos, el modulador de la rueda derecha tendrá el máximo valor y el de la rueda izquierda tendrá 0, de esta manera se produce el giro hacia la izquierda (ver Fig. 4.45).



Figura 4.45. Representación del movimiento de aducción.

- **Movimiento de abducción:** Este gesto indica que la silla tiene que realizar un movimiento hacia la derecha, lo que implica que los moduladores PWM tendrán valores distintos, el modulador de la rueda izquierda tendrá el máximo valor y el de la rueda derecha tendrá 0, de esta manera se produce el giro hacia la derecha (ver Fig. 4.46).



Figura 4.46. Representación del movimiento de abducción.

- **Doble toque:** Este gesto indica que la silla tiene que realizar un movimiento en línea recta hacia atrás, lo que implica que los moduladores PWM tendrán el mismo valor para conseguir esta trayectoria (ver Fig. 4.47).



Figura 4.47 Representación del movimiento chocar dedos.

Con la clasificación de movimientos anterior, se desarrolla un algoritmo de interpretación y selección de operaciones que la SRM ejecutará. La librería MyoBridge se encarga de leer la información enviada por el brazalete y almacenarla a través del puerto UART en una variable denominada “pose”, esta función reconoce los 5 movimientos específicos mencionados y devuelve un valor numérico para cada una: 0 para el brazalete no detecta ningún movimiento, 1 para “cerrar mano”, 2 para “aducción”, 3 para “abducción”, 4 para “extender dedos” y 5 para “doble toque”. Con base en la asignación de valores anterior se define una estructura “switch” que permite relacionar los movimientos del brazo del usuario con las 5 acciones específicas previamente mencionadas. Esto se traduce a asignar los valores que irán directamente a los moduladores PWM. En la Fig. 4.48 se presenta el diagrama de flujo del algoritmo implementado.

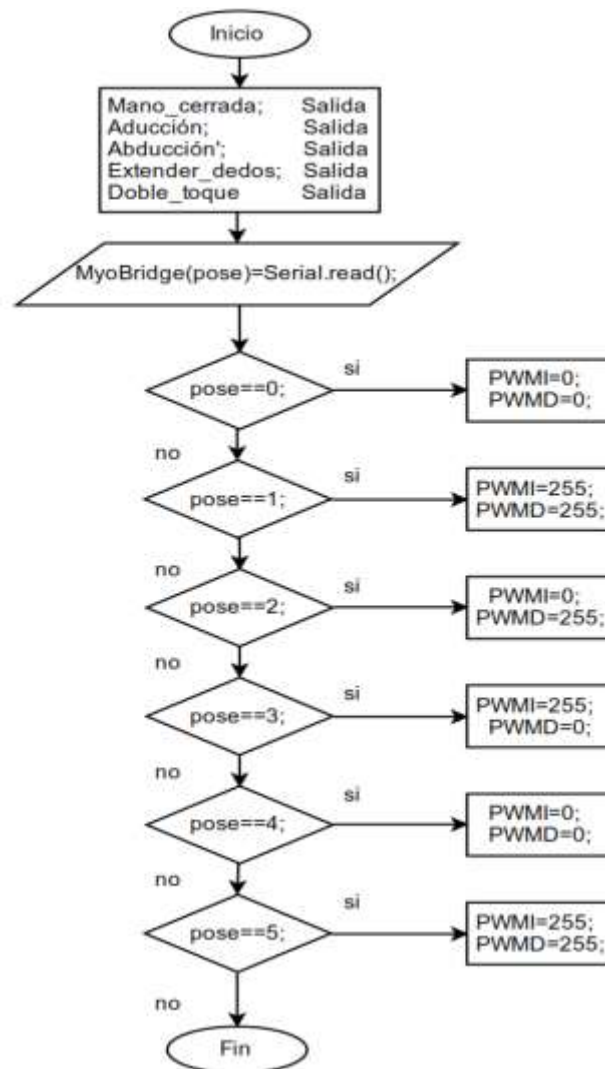


Figura 4.48. Diagrama de flujo del algoritmo para configurar los moduladores PWM en función de los movimientos del brazo.

El código desarrollado para el proceso aquí descrito se presenta en el apéndice D.3.

4.7 Sistema de detección de obstáculos

La instrumentación de los sensores ultrasónicos permite a la silla saber si existen objetos o personas que interrumpan su trayectoria, y para evitar accidentes o colisiones ésta se detiene de manera automática. Se realiza un algoritmo que permite la detección de los objetos a una distancia de 30 cm y realizar el paro de emergencia de la SRM. Como primer paso se declaran las variables que permiten el envío y recepción de las ondas del sensor denominadas como “pinecho” y “pintrigger”, las variables para almacenar el tiempo y calcular la distancia “tiempo” y “distancia” respectivamente y las salidas de los moduladores PWM “PWMI” y “PWMD”. Se configura el pulso para generar la onda ultrasónica con una señal en alto por 10 microsegundos a través de “pintrigger”, se mide el tiempo en estado alto de “pinecho” el pulso es proporcional a la distancia medida. La velocidad del sonido es de 340 m/s o 29 microsegundos por centímetro, para calcular la “distancia” dividimos el tiempo del pulso entre 58, tiempo que tarda recorrer ida y vuelta un centímetro la onda sonora. Posteriormente se pregunta por la distancia, si “distancia” es menor que 30 cm la tarjeta apaga los moduladores de PWM para generar un paro de emergencia en la SRM. En la Fig. 4.49 se presenta el diagrama a bloques del algoritmo implementado que permite el paro de emergencia. El código desarrollado para el proceso descrito se presenta en el apéndice D.4.

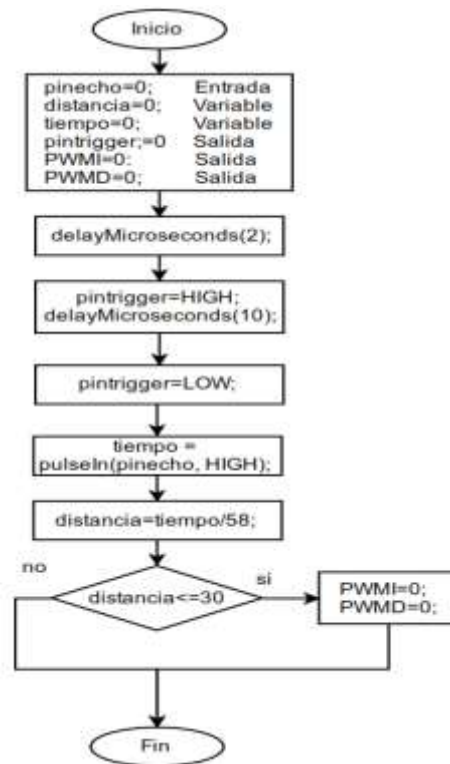


Figura 4.49. Diagrama de flujo de la recepción y procesamiento de datos del sensor ultrasónico.

4.8 Conclusiones

La tarjeta de control y adquisición de datos presenta altas prestaciones como recibir múltiples señales de controladores distintos, cabe mencionar que el protocolo diseñado para la adquisición de señales Bluetooth permite controlar la silla a cualquier dispositivo que desee conectarse, mientras que cumpla con los parámetros y señales requeridas por el protocolo implementado, este sistema se considera un host universal para cualquier dispositivo inteligente externo que desee controlar a la SRM.

La implementación de un dispositivo lector de señales EMG y de movimientos inerciales realizados por el brazo de una persona, permite ampliar el panorama de control de dispositivos enfocados a personas con discapacidad, aunado a esto, el control inalámbrico de múltiples dispositivos que pueden tener aplicaciones de control de alto impacto.

Capítulo 5

5 Resultados experimentales

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos de la tesis en general. En la primera sección se exponen los resultados del ensamble mecánico, las ventajas e inconvenientes que se presentaron al ensamblarlo. En la siguiente sección se presentan los resultados obtenidos de la instrumentación electrónica de la tarjeta, de la adquisición y procesamiento de los datos, la experiencia al utilizar los elementos externos de control y su puesta en marcha.

Al realizar el ensamble mecánico se observaron varios factores importantes referentes a las dimensiones de una SRM estándar, por ejemplo la altura del reposabrazos, la altura del reposapiés respecto de la superficie, la altura y distancia de éste respecto al asiento, la separación del joystick hacia el reposabrazos, la comodidad del asiento; todos estos aspectos se presentan al realizar las pruebas con usuarios, y con base en la información recopilada, se ajustaron tales aspectos mecánicos. Las medidas reales de la SRM se presentan en el apéndice C.2.

La ventaja de tener una estructura ensamblada con perfiles estructurales de aluminio se ve potencializada al momento de cubrir estas necesidades, ya que al utilizar tornillos tipo “T” que van sobre los rieles medios del perfil estructural, permite realizar ajustes en el ensamble sin necesidad de perforar la estructura, por ejemplo recorrer ciertos perfiles para disminuir o aumentar una medida o distancia, sin necesidad de cortar la pieza, sino hasta que el prototipo final sea el adecuado.

Cuando se realizaron las primeras pruebas de movimiento del mecanismo se tuvieron problemas con los MOSFET, debido a que se quemaban por regresos de voltaje generados por los motores al detenerse rápidamente o al realizar inversiones de giro.

El diagrama del puente H requiere de una red snubber en paralelo al motor, debido a que el motor es un inductor, y su comportamiento es el de conservar la corriente, entonces se sabe que el voltaje en el inductor está dado por:

$$V_L = L \frac{di}{dt} = L \frac{\Delta i}{\Delta t} \quad (65)$$

Lo que ocasiona daños al circuito cuando el suministro de corriente de detiene en un periodo de tiempo muy pequeño, ya que hace que se dispare enormemente el voltaje. En la Fig. 5.1 se presenta la gráfica del voltaje medido en el inductor sin una red snubber.

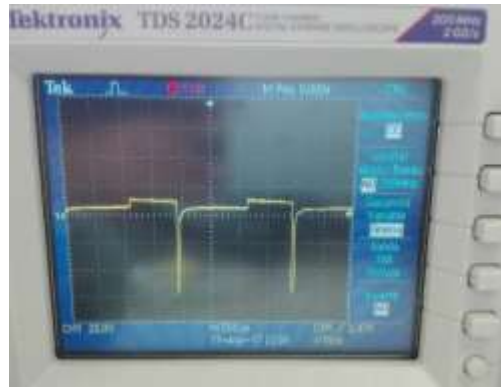


Figura 5.1. Voltaje medido en el inductor sin una red snubber.

Se observa que el pico de regreso de voltaje en cada pulso generado por el PWM es de una amplitud de aproximadamente -60 V , lo que hace que los MOSFET se calienten y al ser un pulso repetitivo éstos se quema. Se implementa una red snubber como amortiguador de picos de voltaje (ver Fig. 5.2), se fija una resistencia de 0.22 ohms y se varía el valor del capacitor para observar la reacción que producen al medir los bornes del motor (ver Fig. 5.3y Fig. 5.4).

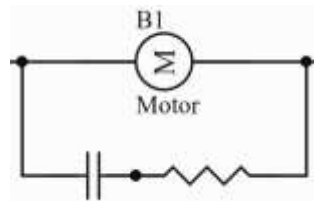


Figura 5.2. Diagrama de una red snubber para amortiguar picos de regreso de voltaje.

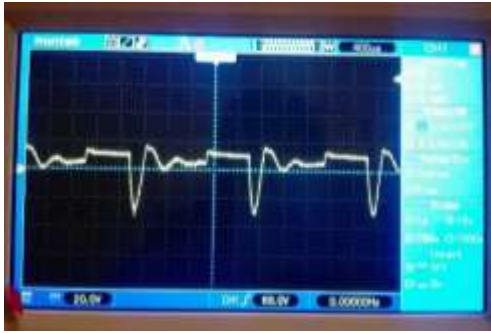


a)



b)

Figura 5.3. Voltaje medido en el inductor con una red snubber. a) $R=0.22\text{ ohms}$ y $C=10\text{ uF}$. b) $R=0.22\text{ ohms}$ y $C=12\text{ uF}$.



a)



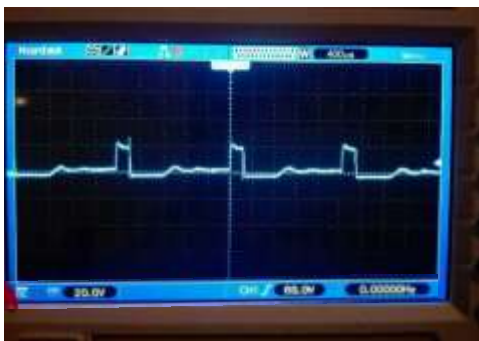
b)

Figura 5.4: Voltaje medido en el inductor con una red snubber. a) $R=0.22$ ohms y $C=12$ uF. b) $R=0.22$ ohms y $C=15$ uF.

Se observa que los picos de regreso de voltajes disminuyen conforme se aumenta el valor del capacitor, disminuyen hasta aproximadamente -25 V de amplitud. Para el circuito de protección de cada motor de la SRM se define un capacitor de marcha 25 uF a 250 V y una resistencia de 0.22 ohms de 10 W (ver Fig. 5.5), y en la Fig. 5.6 y Fig. 5.7 se observan las curvas que generan los motores al ser activados con la señal PWM.



Figura 5.5. Red snubber para protección de los motores de la SRM. $R=0.22$ ohms y 10 W, $C=25$ uF a 250 V.



a)



b)

Figura 5.6. Voltaje medido en el inductor con una red snubber de $R=0.22$ ohms y 10 W, $C=25$ uF a 250 V. a) PWM=15%. b) PWM=45%.



Figura 5.7. Voltaje medido en el inductor con una red snubber de $R=0.22$ ohms y 10 W, $C=25$ uF a 250 V. a) PWM=80%. b) PWM=90%.

Se observa que en los bornes del motor los voltajes pico de regreso son casi nulos, por lo que la red snubber instrumentada es adecuada para el sistema, y esto evita que los MOSFET se dañen por sobretensión y ayuda a que se calienten menos.

Con base en los comentarios obtenidos al realizar pruebas con los usuarios, se observa que el momento del arranque de la SRM es abrupto debido a que la programación de los algoritmos de control basados en las entradas es de manera lineal, es decir, la respuesta de la SRM es proporcional a los movimientos generados por los dispositivos de entrada. En el caso del joystick que es el ejemplo más claro, al realizar un movimiento de éste hacia adelante, el algoritmo calcula el modulador PWM en forma proporcional al movimiento, esto ocasiona que la SRM no se mueva instantáneamente aun así el joystick se haya movido, esto se debe a que el PWM generado no es suficiente para romper el estado de reposo de la silla, entonces el usuario comienza a mover más el joystick, hasta que el modulador PWM alcance el valor necesario para romper el reposo y la silla avance. Esto genera un arranque brusco y agitado, ya que el joystick fue movido un ángulo considerable y el modulador ya contiene un ancho de pulso considerable, entonces cuando ese valor de PWM pasa el límite entre el valor necesario para romper el reposo, de un momento a otro la SRM se activa y comienza a moverse con una velocidad inicial alta.

Se realiza el ajuste de velocidad en cuanto al sistema de arranque al mover el joystick, se controla el par aplicado a cada motor para evitar movimientos bruscos al maniobrar con él, es decir, se regula el modulador PWM al inicio de cada movimiento del joystick (y de todos los dispositivos de entrada) para generar un arranque suave. Esto se logra con una función impulso inicial, que genera un valor medio de PWM al mínimo movimiento del joystick para romper el reposo y el arranque sea suave. Se define una ganancia proporcional que multiplica al valor leído de las entradas durante un tiempo de medio segundo, en este caso particular, se define una constante con valor 15 que multiplica los valores leídos de la entrada para amplificarlos por medio segundo después de generar la primera lectura. Esto

otorga a los moduladores PWM el valor adecuado para romper el reposo desde el inicio de movimiento del dispositivo controlador, por ejemplo si el movimiento inicial del joystick envía un valor de 10 (se toma en cuenta que el PWM es de 8 bits y funciona de 0 a 255), este impulso inicial generará un valor de 150, lo que es un valor alto en el PWM y por consecuencia la silla romperá el reposo por unos instantes y después tendrá un funcionamiento lineal en proporción a los movimientos de entrada. En la Fig. 5.8 y 5.9 se presentan los valores leídos a través del monitor serial de la plataforma Arduino al realizar los movimientos iniciales del joystick a distintas velocidades, en donde se observan los valores del “impulso” calculado al arranque de la SRM.

```
SRM avanzando
Impulso PWM Rueda Izquierda = 135   Impulso PWM Rueda Derecha = 150
PWM Rueda Izquierda = 54   PWM Rueda Derecha = 128
PWM Rueda Izquierda = 54   PWM Rueda Derecha = 128
PWM Rueda Izquierda = 54   PWM Rueda Derecha = 130
PWM Rueda Izquierda = 53   PWM Rueda Derecha = 108
PWM Rueda Izquierda = 42   PWM Rueda Derecha = 63
```

```
SRM avanzando
Impulso PWM Rueda Izquierda = 135   Impulso PWM Rueda Derecha = 150
PWM Rueda Izquierda = 36   PWM Rueda Derecha = 43
PWM Rueda Izquierda = 38   PWM Rueda Derecha = 45
PWM Rueda Izquierda = 36   PWM Rueda Derecha = 43
PWM Rueda Izquierda = 39   PWM Rueda Derecha = 47
PWM Rueda Izquierda = 36   PWM Rueda Derecha = 43
PWM Rueda Izquierda = 37   PWM Rueda Derecha = 45
```

Figura 5.8. Impulso generado en el PWM para romper el reposo de la SRM cuando avanza.

```
SRM retrocediendo
Impulso PWM Rueda Izquierda = 195   Impulso PWM Rueda Derecha = 210
PWM Rueda Izquierda = 107   PWM Rueda Derecha = 127
PWM Rueda Izquierda = 104   PWM Rueda Derecha = 124
PWM Rueda Izquierda = 108   PWM Rueda Derecha = 127
PWM Rueda Izquierda = 104   PWM Rueda Derecha = 124
PWM Rueda Izquierda = 108   PWM Rueda Derecha = 127
PWM Rueda Izquierda = 103   PWM Rueda Derecha = 123
```

```
SRM retrocediendo
Impulso PWM Rueda Izquierda = 150   Impulso PWM Rueda Derecha = 120
PWM Rueda Izquierda = 89   PWM Rueda Derecha = 40
PWM Rueda Izquierda = 95   PWM Rueda Derecha = 40
PWM Rueda Izquierda = 95   PWM Rueda Derecha = 40
PWM Rueda Izquierda = 98   PWM Rueda Derecha = 41
PWM Rueda Izquierda = 98   PWM Rueda Derecha = 39
PWM Rueda Izquierda = 98   PWM Rueda Derecha = 39
```

Figura 5.9. Impulso generado en el PWM para romper el reposo de la SRM cuando retrocede.

Se realiza la adquisición de datos proveniente del joystick para corroborar que el acoplamiento y procesamiento de las señales analógicas fue correcto. Se toman muestras de las lecturas de los diferentes movimientos del joystick y con ayuda del monitor serial es posible observar los valores de los moduladores PWM generados por los movimientos característicos del joystick. En la Fig. 5.10 y Fig. 5.11 se presentan los resultados de la respuesta que tiene la SRM al realizar movimientos del joystick y el valor PWM de cada rueda según el movimiento realizado.

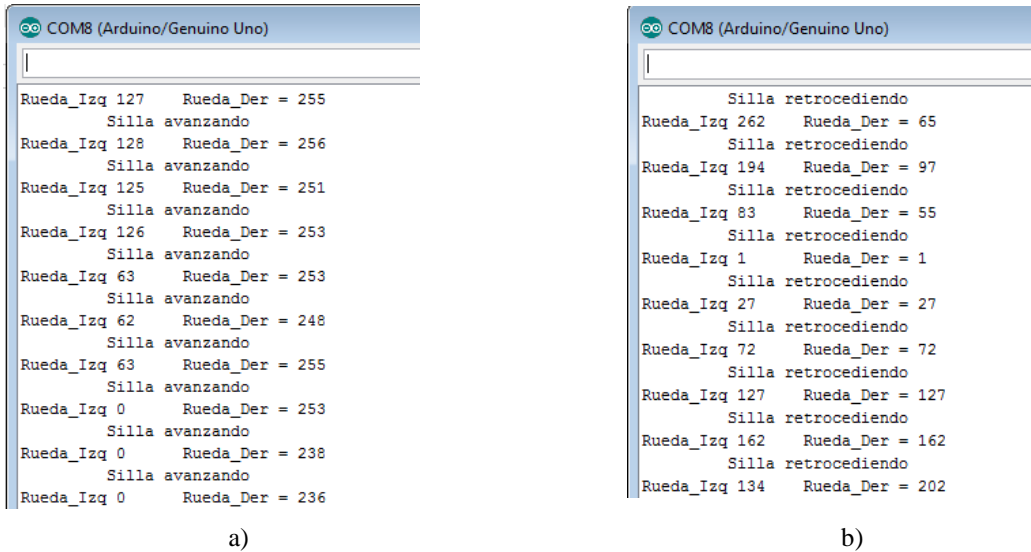


Figura 5.10. Direcciones que la SRM sigue, así como valores de PWM en cada rueda con respecto a los movimientos del joystick. a) Movimiento hacia adelante del joystick. b) Movimiento hacia atrás del joystick.

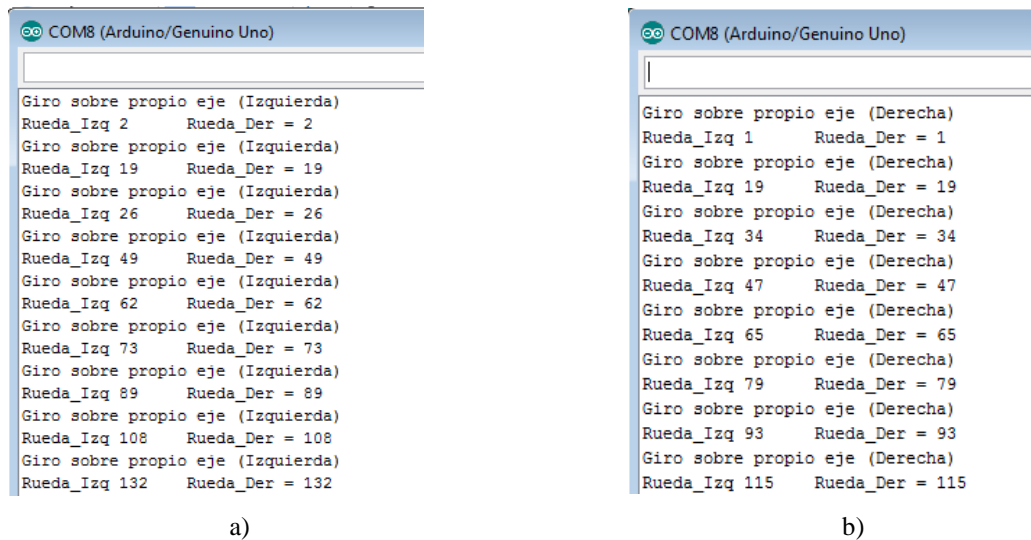


Figura 5.11: Direcciones que la SRM sigue, así como valores de PWM en cada rueda con respecto a los movimientos del joystick. a) Rotación del eje Z del joystick hacia la izquierda. b) Rotación del eje Z del joystick hacia la derecha.

La aplicación desarrollada para controlar la SRM de manera inalámbrica se sometió a pruebas de comunicación, así como de envío de datos correctamente. Se utiliza el monitor serial del IDE de Arduino para facilitar la comprobación de la comunicación entre la aplicación y la tarjeta de control, de modo que se puedan observar los datos enviados por los botones de la aplicación y el joystick virtual, así como el correcto funcionamiento del algoritmo programado para el procesamiento de dichos datos. En la Fig. 5.12 se presenta el diseño final de la aplicación desarrollada.

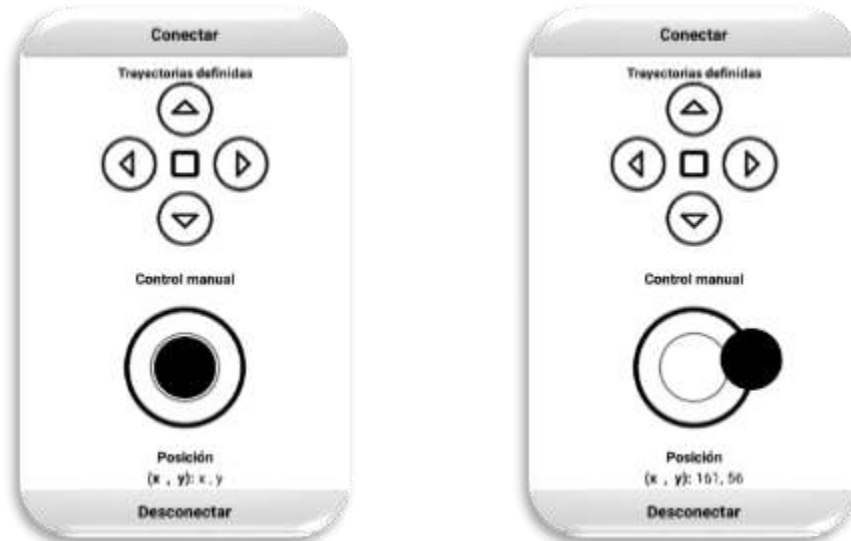


Figura 5.12. Aplicación para controlar la SRM desarrollada para el Sistema Operativo Android.

En la Fig. 5.13 y la Fig. 5.14 se presentan los datos recopilados por la tarjeta de adquisición en función de los botones presionados por el usuario en la aplicación y detecta que botón se presionó, así como asigna el valor correspondiente de la acción seleccionada al modulador de PWM.

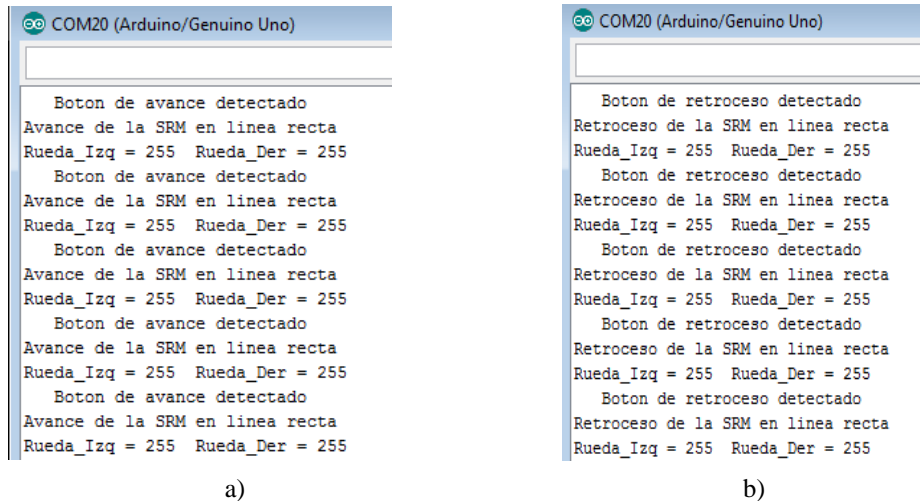


Figura 5.13. Detección de teclas presionadas por el usuario en la aplicación y asignación de valores de PWM conforme al movimiento que realizará la SRM. a) Detección del botón de avance. b) Detección del botón de retroceso.

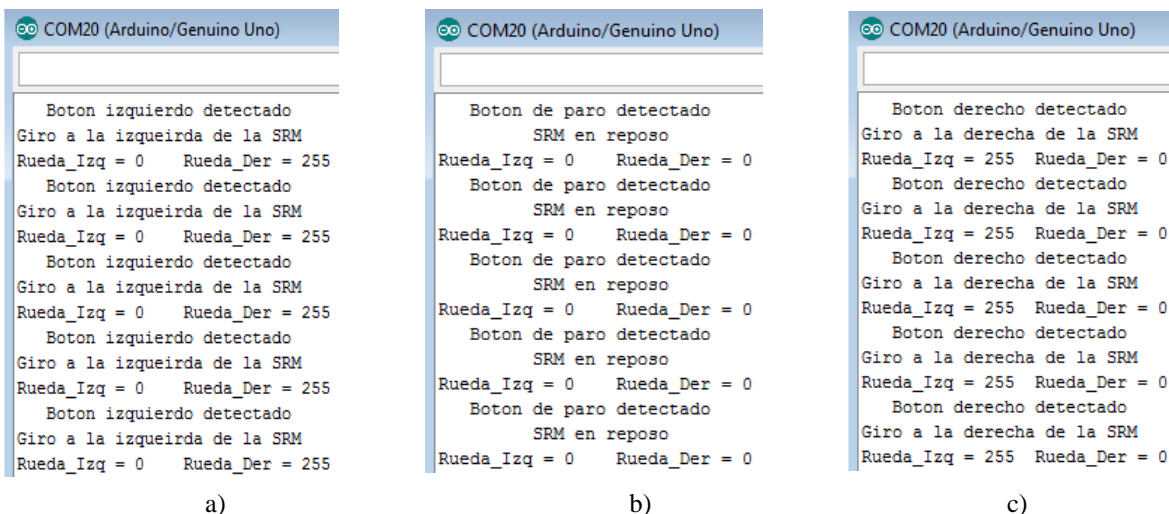
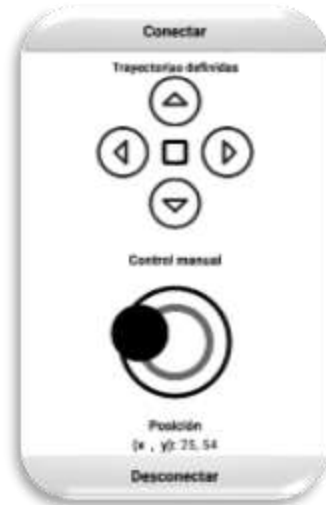


Figura 5.14: Detección de teclas presionadas por el usuario en la aplicación y asignación de valores de PWM conforme al movimiento que realizará la SRM. a) Detección del botón izquierdo. b) Detección del botón de paro, c) Detección del botón derecho.

Para el procesamiento de las señales adquiridas por el joystick virtual se implementa el algoritmo de adquisición de las señales del joystick físico diseñado en la sección 4.3.2., entonces se detectan las coordenadas generadas por el movimiento del joystick virtual y se procesan por el firmware desarrollado en la sección 4.4.2. Se realizan las pruebas para corroborar el envío correcto de las coordenadas, así como el buen funcionamiento del firmware. En la Fig. 5.15 y Fig. 5.16 se presentan los resultados obtenidos al manipular el joystick virtual y se comprueba el funcionamiento del algoritmo de procesamiento de las

señales. Se realiza un movimiento del joystick en cualquier dirección y el algoritmo detecta el tipo de movimiento y procesa las coordenadas que este movimiento genera, posteriormente calcula el ancho de pulso para cada rueda.



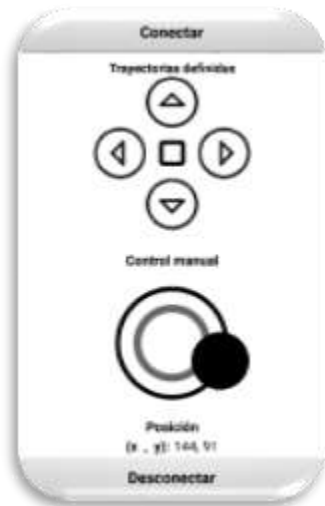
a)

```
COM20 (Arduino/Genuino Uno)

Movimiento del joystick detectado
Avance hacia la izquierda de la SRM
Rueda_Izq = 30 Rueda_Der = 68
Movimiento del joystick detectado
Avance hacia la izquierda de la SRM
Rueda_Izq = 30 Rueda_Der = 68
Movimiento del joystick detectado
Avance hacia la izquierda de la SRM
Rueda_Izq = 30 Rueda_Der = 68
Movimiento del joystick detectado
Avance hacia la izquierda de la SRM
Rueda_Izq = 30 Rueda_Der = 68
Movimiento del joystick detectado
Avance hacia la izquierda de la SRM
Rueda_Izq = 30 Rueda_Der = 68
```

b)

Figura 5.15. Control de la SRM a través del joystick virtual de la aplicación desarrollada. a) Movimiento del joystick a las coordenadas (25, 54). b) Procesamiento de las coordenadas recibidas y conversión a PWM en cada una de las ruedas.



a)

```
COM20 (Arduino/Genuino Uno)

Movimiento del joystick detectado
Retroceso hacia la derecha de la SRM
Rueda_Izq = 116 Rueda_Der = 93
Movimiento del joystick detectado
Retroceso hacia la derecha de la SRM
Rueda_Izq = 116 Rueda_Der = 93
Movimiento del joystick detectado
Retroceso hacia la derecha de la SRM
Rueda_Izq = 116 Rueda_Der = 93
Movimiento del joystick detectado
Retroceso hacia la derecha de la SRM
Rueda_Izq = 116 Rueda_Der = 93
Movimiento del joystick detectado
Retroceso hacia la derecha de la SRM
Rueda_Izq = 116 Rueda_Der = 93
```

b)

Figura 5.16. Control de la SRM a través del joystick virtual de la aplicación desarrollada. a) Movimiento del joystick a las coordenadas (144, 91). b) Procesamiento de las coordenadas recibidas y conversión a PWM en cada una de las ruedas.

El brazalete MYO dispone de 8 sensores de lectura muscular que permiten caracterizar los movimientos del brazo; existen múltiples opciones para obtener estos datos, así como los cambios inerciales que se realizan al moverlo. Gracias a la implementación de la librería MyoBridge es posible identificar 5 movimientos específicos del brazo. Se realiza la caracterización del dispositivo para asignar un movimiento determinado a la SRM con base en los movimientos realizados por el brazo del usuario.

En la Fig. 5.17 se presenta el reconocimiento del dispositivo por la tarjeta de control. El módulo HM-10 envía la invitación al brazalete para iniciar la comunicación, la interfaz busca al brazalete para poder que los dispositivos se emparejen, hasta que es detectado y el brazalete se conecta.



```
COM20 (Arduino/Genuino Uno)
|
Searching for Myo...
Searching for Myo...
connected!
```

Figura 5.17. Reconocimiento del brazalete Myo por la tarjeta de adquisición de datos.

Cuando el brazalete se conecta a la tarjeta de control se realiza la detección de movimientos y el algoritmo implementado en la sección 4.5.2 permite realizar la clasificación de estos movimientos para asignarlos a una trayectoria específica de la SRM. En la Fig. 5.18 se observa el movimiento de “Abducción” que representa un “Giro a la derecha de la SRM”, y se presenta el valor que el algoritmo le asocia a los moduladores PWM de cada rueda debido a ese movimiento.



```
Movimiento de abduccion detectado
  Giro a la derecha de SRM
Rueda_Izq 255   Rueda_Der 0
  Movimiento de abduccion detectado
    Giro a la derecha de SRM
Rueda_Izq 255   Rueda_Der 0
  Movimiento de abduccion detectado
    Giro a la derecha de SRM
Rueda_Izq 255   Rueda_Der 0
  Movimiento de abduccion detectado
    Giro a la derecha de SRM
```

Figura 5.18. Reconocimiento del movimiento de Abducción.

En la Fig. 5.19 se observa el movimiento de “Aducción” que representa un “Giro a la izquierda de la SRM” y se presenta el valor que el algoritmo le asocia a los moduladores PWM de cada rueda debido a ese movimiento.



```
Movimiento de aduccion detectado
  Giro a la izquierda de SRM
Rueda_Izq: 0   Rueda_Der: 255
  Movimiento de aduccion detectado
    Giro a la izquierda de SRM
Rueda_Izq: 0   Rueda_Der: 255
  Movimiento de aduccion detectado
    Giro a la izquierda de SRM
Rueda_Izq: 0   Rueda_Der: 255
  Movimiento de aduccion detectado
    Giro a la izquierda de SRM
```

Figura 5.19. Reconocimiento de un movimiento de Aducción.

En la Fig. 5.20 se observa el movimiento de “Cerrar mano” que representa “Avance de la SRM en línea recta” y se presenta el valor que el algoritmo le asocia a los moduladores PWM de cada rueda debido a ese movimiento.



```
Movimiento de cerrar mano detectado
  Avance de la SRM en línea recta
Rueda_Izq: 255  Rueda_Der: 255
Movimiento de cerrar mano detectado
  Avance de la SRM en línea recta
Rueda_Izq: 255  Rueda_Der: 255
Movimiento de cerrar mano detectado
  Avance de la SRM en línea recta
Rueda_Izq: 255  Rueda_Der: 255
Movimiento de cerrar mano detectado
  Avance de la SRM en línea recta
Rueda_Izq: 255  Rueda_Der: 255
```

Figura 5.20. Reconocimiento de un movimiento de cerrar mano.

En la Fig. 5.21 se observa el movimiento de “Doble toque” que representa “Retrosceso de la SRM en línea recta” y se presenta el valor que el algoritmo le asocia a los moduladores PWM de cada rueda debido a ese movimiento.



```
Movimiento de doble toque detectado
  Retrosceso de la SRM en línea recta
Rueda_Izq 255  Rueda_Der 255
Movimiento de doble toque detectado
  Retrosceso de la SRM en línea recta
Rueda_Izq 255  Rueda_Der 255
Movimiento de doble toque detectado
  Retrosceso de la SRM en línea recta
Rueda_Izq 255  Rueda_Der 255
Movimiento de doble toque detectado
  Retrosceso de la SRM en línea recta
Rueda_Izq 255  Rueda_Der 255
```

Figura 5.21. Reconocimiento de un movimiento de Doble toque.

En la Fig. 5.22 se observa el movimiento de “Extender dedos” que representa la “SRM en reposo” y se presenta el valor que el algoritmo le asocia a los moduladores PWM de cada rueda debido a ese movimiento.



```
Movimiento extender dedos detectado
SRM en reposo
Rueda_Izq 0      Rueda_Der 0
Movimiento extender dedos detectado
SRM en reposo
Rueda_Izq 0      Rueda_Der 0
Movimiento de abduccion detectado
```

Figura 5.22. Reconocimiento de un movimiento de Extender dedos.

La sensibilidad del brazalete Myo para detectar los movimientos de los músculos es muy alta, lo que provoca que en ocasiones confunda el movimiento de “Extender dedos” con el de “Abducción”. En la Fig. 5.23 se presenta la lectura que realiza la tarjeta de control con base en un movimiento de “Extender dedos” y se observa que el brazalete alterna entre éste y el movimiento de “Abducción”.

```
Movimiento extender dedos detectado
SRM en reposo
Rueda_Izq 0      Rueda_Der 0
Movimiento de abduccion detectado
Giro a la derecha de SRM
Rueda_Izq 255    Rueda_Der 0
Movimiento extender dedos detectado
SRM en reposo
Rueda_Izq 0      Rueda_Der 0
Movimiento de abduccion detectado
Giro a la derecha de SRM
Rueda_Izq 255    Rueda_Der 0
Movimiento de abduccion detectado
```

Figura 5.23. Lecturas alternadas del brazalete Myo con un mismo movimiento, el de “Extender dedos”.

Mediante la librería MyoBridge es posible obtener las lecturas de las señales EMG de los 8 sensores con los que el brazalete cuenta, así como de las señales de su unidad de medición inercial (IMU), permite almacenar los valores con un muestreo de 5 ms para poder graficarlas y observar el comportamiento de la señal con cada variación de movimiento, lo que es indispensable si se desean caracterizar más movimientos aparte de los 5 previamente definidos que clasifica la librería. En la Fig. 5.24 se presentan las gráficas de 4 sensores de lecturas EMG del brazalete al realizar un movimiento de “Aducción”. En la Fig. 5.25 se

presentan las gráficas de las lecturas EMG de los 4 sensores restantes pero para un movimiento de “Cerrar mano”.

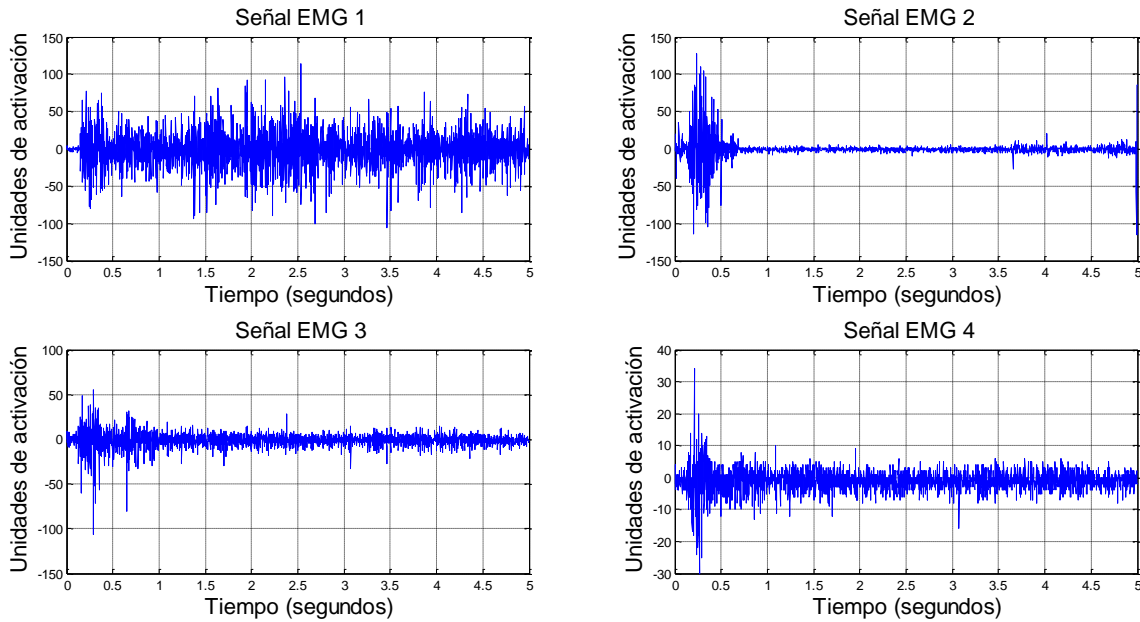


Figura 5.24. Valores obtenidos en 4 sensores EMG del brazalete Myo al realizar un movimiento de “Aducción” en la mano con un tiempo de muestreo de 5 ms.

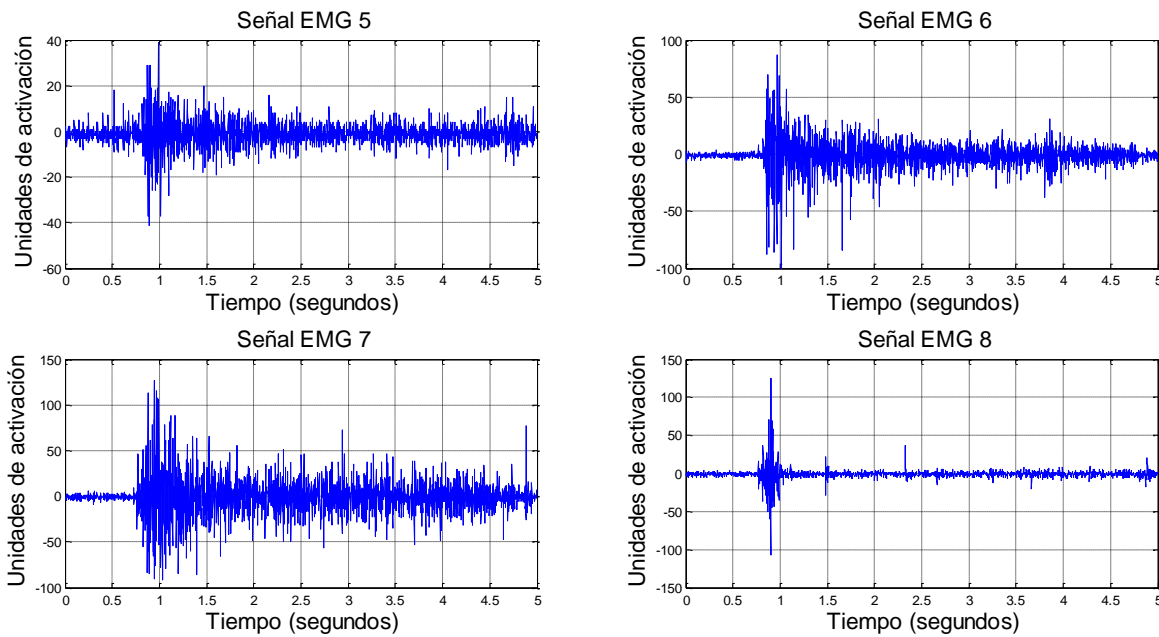


Figura 5.25. Valores obtenidos en 4 sensores EMG del brazalete Myo al realizar un movimiento de “Cerrar mano” en la mano con un tiempo de muestreo de 5 ms.

5.1 Conclusiones

El desarrollo de un sistema mecatrónica que permite la múltiple comunicación con periféricos externos para su control es de gran impacto, debido a que genera un sistema multiusuarios ya que cubre un rango mayor de necesidades para los usuarios, al contar con distintos tipos de control de movimiento. Esto permite tener un dispositivo general que puede ser controlado por el usuario o por un tercero, lo que hace un sistema que reduce el aspecto de diseño a la media, ya que permite el uso a personas con distintas características, si una persona no puede ocupar sus extremidades superiores existe la posibilidad de que algún familiar o persona cercana pueda manipular la SRM, ya sea desde su teléfono o con el movimiento de sus brazos. De igual manera extiende la posibilidad del usuario a elegir el sistema de control que más se adapte a sus necesidades.

Capítulo 6

Conclusiones

De acuerdo a los resultados obtenidos consideramos que los objetivos de esta tesis se han cumplido satisfactoriamente.

El diseño y la construcción de una silla de ruedas se abordó más allá de las limitaciones de un tema mecánico, sino que fue considerado como un robot móvil, lo que generó la implementación de la teoría de construcción de robots, aportando aprendizajes bastante interesantes como se describen a continuación:

1. El modelado matemático del robot móvil permitió una interacción durante la construcción de la mecánica de la SRM debido a que permite conocer la posición del centro de masa.
2. Gracias a las simulaciones del modelo dinámico incluyendo los parámetros físicos del robot, se conoce el comportamiento de éste al aplicar torques distintos a las variables de entrada y permite conocer la trayectoria generada.
3. Conocer el comportamiento del robot permite la retroalimentación de la configuración mecánica, es decir, el ajuste de la distribución de los componentes que conforman la SRM con el objetivo de posicionar el centro de masa lo más pegado a la superficie y dentro de los 4 puntos de apoyo representados por las ruedas.
4. El posicionamiento adecuado del centro de masa otorga al sistema mayor estabilidad al momento de su control, ya que los componentes generan un contrapeso del usuario manteniendo el centro de masa dentro de la zona de carga de las 4 ruedas.
5. El análisis del modelado matemático permite el estudio de distintos algoritmos de control orientados a la robótica móvil, lo que genera un amplio panorama de trabajo y aumenta las prestaciones de este tipo de dispositivos en diferentes áreas, pero aquí se potencializa el enfoque a sistemas de asistencia y uso médico.

El modelo dinámico está limitado a una variación de energía potencial, ya que se modeló en un sistema coordinado bidimensional no considerando un cambio o inclinación en el eje Z.

Se necesita realizar el modelo dinámico tomando en cuenta los aspectos de la energía potencial, lo que permitirá conocer con exactitud los grados de inclinación máxima que el RMD puede subir sin que éste pierda estabilidad y se caiga.

Al realizar el modelo dinámico completo, aportará muchos conocimientos sobre este tipo de robots, mejorando la seguridad de los usuarios.

La implementación de un asiento de automóvil deportivo permite cubrir los aspectos de ergonomía en el diseño y proporciona comodidad al usuario. Cubrir este aspecto es de suma importancia en el diseño debido a que el usuario pasa una alta cantidad de horas sentado en éste, si el asiento no cumple con los estándares de ergonomía la experiencia de uso sería desagradable, además de peligrosa para el usuario, ya que el tiempo prolongado sobre un mal diseño genera daños físicos en el usuario.

La configuración diferencial instrumentada en la SRM presenta ventajas sobre otros diseños comerciales de sillas, ya que permite una maniobrabilidad mayor en escenarios pequeños al permitir giros sobre su propio eje y al disminuir la complejidad mecánica al no contar con un sistema frontal de direccionamiento, como en el caso de los denominados “tricyclos.

Otro aspecto a resaltar es la velocidad que la SRM alcanza, un estimado de 13.3 Km/h representa una velocidad bastante considerable en comparación con la velocidad a la que corre un ser humano promedio, que es de 10 Km/h, lo que permite al usuario una gran adaptación su entorno.

El sistema mecatrónico desarrollado presenta la ventaja de ser de bajo costo por los materiales utilizados, así como cuenta con la versatilidad de ser controlado mediante diversos dispositivos, ya sean manuales o inalámbricos.

El sistema de adquisición de datos diseñado e instrumentado permite la comunicación con diversos dispositivos inalámbricos, y la característica de no limitarse a los dispositivos aquí presentados.

El robot tiene la variabilidad de aceptar más dispositivos externos para su control, únicamente se requiere que el protocolo de comunicación del dispositivo externo envíe las señales adecuadas o características del protocolo aquí diseñado. Mientras el sistema reciba las señales definidas para el control de movimiento de la SRM será posible su manipulación por algún otro dispositivo inteligente. Esto le da la robustez al sistema de ser un mecanismo de control universal por protocolo de comunicación Bluetooth.

La implementación de un dispositivo lector de señales EMG y de movimientos inerciales realizados por el brazo de una persona, permite ampliar el panorama de control de dispositivos enfocados a personas con discapacidad, aunado a esto, el control inalámbrico de múltiples dispositivos que pueden tener aplicaciones de control de alto impacto. Esta información es muy útil en diversas aplicaciones y permite que los sistemas especialmente integrados con esta tecnología puedan beneficiarse de la portabilidad del dispositivo.

El sistema de prevención de colisiones resulta de gran ventaja ya que evita que el mecanismo sufra daños por chocar con algún objeto o pared, y daños a terceros que se detecten a una distancia de 30 cm en la trayectoria de la SRM.

El trabajo a futuro está destinado a controlar el sistema mecatrónico con una diadema de lecturas electroencefalográficas (EEG), para el desarrollo de interfaces cerebro-computadora (BCI).

Otra área de interés a futuro es realizar el control del sistema a través de un dispositivo de rastreo infrarrojo, donde la identificación de los movimientos de las manos podrá ser interpretada como acciones sobre la SRM.

Finalmente como trabajo a futuro se pretende realizar la retroalimentación en lazo cerrado del robot móvil incluyendo el modelo dinámico completo considerando las variaciones de altura en un plano tridimensional para la aplicación de un algoritmo de control y seguimiento de trayectorias, lo que permitirá un control robusto sobre el sistema y ampliar el panorama en aspectos de control autónomo de la SRM.

Apéndices

Apéndice A publicaciones

Tema A3b. Mecanismos y Robótica: Control de robots móviles.

“Desarrollo de un sistema mecatrónico para controlar una silla de ruedas motorizada con dispositivos inalámbricos”

Cerino Jiménez Rigoberto^a, Pinto Avendaño David E.^b, Vilariño Ayala Darnes^b, Vergara Limón Sergio^a, Vargas Treviño María Aurora D.^a

^aFacultad de Ciencias de la Electrónica, Maestría en Ciencias de la Electrónica opción Automatización, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Av. San Claudio y 18 Sur S/N C.U. Edif. 109A Col. Jardines de San Manuel, C.P. 72570, Puebla, Pue. México.

^bFacultad de Ciencias de la Computación, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Av. San Claudio y 14 Sur S/N C.U. Col. Jardines de San Manuel, C.P. 72570, Puebla, Pue. México.

*Autor contacto: cerino_rigoberto@hotmail.com

RESUMEN

El presente documento describe el proceso realizado para instrumentar una silla de ruedas motorizada, controlada mediante dispositivos inalámbricos y manuales. La estructura del sistema mecánico está fabricada con aluminio estructural, de esta forma se reduce peso y adquiere resistencia para soportar al usuario. El sistema de dirección mecánica se basa en una configuración diferencial ligada a una transmisión de cadena-piñón, esto otorga una mayor maniobrabilidad en escenarios pequeños. Se desarrolla la cinemática directa del robot, así como el modelo dinámico tomando en cuenta las restricciones de movimiento no holonómicas, para propósitos del estudio de un sistema de control. El diseño e instrumentación electrónica de la etapa de potencia utiliza MOSFET. Para el sistema de control se desarrolla una aplicación móvil en el sistema operativo Android; se implementa un brazalete inalámbrico basado en comunicación Bluetooth que detecta señales electromiográficas (EMG) de nuestro brazo, y un control manual mediante un joystick.

Palabras Clave: Bluetooth, Brazalete, Modelo dinámico, Robot móvil, Silla de ruedas.

ABSTRACT

This document describes the process performed for a motorized wheelchair controlled by wireless and manual devices. The structure of the mechanical system is made of structural aluminum, in this way it reduces weight and acquires resistance to support the user. The mechanical steering system is based on a differential configuration linked to a chain-pinion transmission, this gives greater maneuverability in small scenarios. It develops the forward kinematic of the robot, as well as the dynamic model taking into account the nonholonomic constraints of movement, for purposes of the study of a control system. The design and electronic instrumentation of the power stage uses MOSFET. For the control system a mobile application is developed in the Android OS; a wireless armband based on Bluetooth communication is used to detect electromyographic (EMG) signals from our arm, and a manual control using a joystick.

Keywords: Armband, Bluetooth, Dynamic model, Mobile robot, Wheelchair.

1. Introducción

En la actualidad es evidente la necesidad que presentan las personas con discapacidad ante el uso de sistemas de desplazamiento que les permitan realizar un mayor número de actividades dentro de su vida cotidiana.

De acuerdo con la Clasificación Internacional del Funcionamiento, de la Discapacidad y de la Salud, presentada en 2001, las personas con discapacidad “son aquellas que tienen una o más deficiencias físicas, mentales, intelectuales o sensoriales y que al interactuar con distintos ambientes del entorno social pueden impedir su

participación plena y efectiva en igualdad de condiciones a las demás” [1]. Las sillas de ruedas motorizadas deben ser consideradas un sistema adecuado para incrementar la libertad individual, de movimientos, para la formación personal, para el trabajo, la independencia, mejorando la autoimagen y los comportamientos individuales [2].

La silla de ruedas motorizada (SRM) es un mecanismo que contribuye a solventar limitaciones de desplazamiento de personas con algún tipo de discapacidad física, tomando el papel de extremidades inferiores. Estos dispositivos mejoran la calidad de vida de personas permitiendo una adaptación más natural al ambiente que los rodea.



OEyB12- Diseño e Implementación de una Silla de Ruedas Motorizada Controlada con Interfaz Inalámbrica

Rigoberto Cerino Jiménez¹, Pinto Avendaño², Sergio Vergara Limón¹, María Aurora Diozcora Vargas Treviño¹, Darnes Vilariño Ayala²

¹Facultad de Ciencias de la Electrónica, Maestría en Ciencias de la Electrónica opción Automatización, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Av. San Claudio y 18 Sur S/N C.U. Edif. 109A Col. Jardines de San Manuel, C.P. 72570, Puebla, Pue. México.

²Facultad de Ciencias de la Computación, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Av. San Claudio y 14 Sur S/N C.U. Col. Jardines de San Manuel, C.P. 72570, Puebla, Pue. México.

Resumen. - En el presente documento se expone el proceso que se implementó para la construcción de una silla de ruedas motorizada, que tiene la versatilidad de ser controlada mediante diversos dispositivos inalámbricos y manuales. El sistema de dirección mecánica se basa en una configuración diferencial para mejorar la maniobrabilidad en escenarios pequeños. Se desarrolla la cinemática directa del robot móvil y para propósitos de estudio de un sistema de control se obtiene el modelo dinámico. Se instrumenta la electrónica de potencia con MOSFET. Para la etapa de control de movimiento se caracteriza un brazaletes inalámbrico que detecta señales electromiográficas (EMG) de nuestro brazo, para seleccionar movimientos específicos y enviar instrucciones a los actuadores, se diseña una aplicación móvil en el SO Android y dispone de un control manual mediante un joystick.

Palabras clave: Brazaletes, Modelo dinámico, Robot móvil, Silla de ruedas.

Abstract. - In the present document it exposes the process that was implemented for the construction of a motorized wheelchair, which has the versatility of being controlled by various wireless and manual devices. The mechanical steering system is based on a differential configuration to improve maneuverability in small scenarios.

It develops the forward kinematics of the mobile robot and for purposes of studying a control system, the dynamic model is obtained. Power electronic is implemented with MOSFET. For the movement control stage, a wireless armband that detects electromyographic (EMG) signals from our arm is characterized to select specific movements and send instructions to the actuators; a mobile application is designed in the Android OS and has a manual control through a joystick.

Key words: Armband, Dynamic model, Mobile robot, Wheelchair.

1. Introducción

En la actualidad es incuestionable la dependencia de algunas personas con

discapacidad frente al uso de sistemas de desplazamiento que les permitan efectuar más actividades dentro de su vida cotidiana. La silla de ruedas motorizada (SRM) se considera un sistema



CONGRESO INTERNACIONAL
DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y
TECNOLOGÍA

TRAMITE DE ISSN ANTE
INDAUTOR ESTA EN
TRÁMITE
CONGRESO INTERNACIONAL
DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

Apéndice B Constancias



Universidad Autónoma de Baja California
Escuela de Ciencias de la Ingeniería y Tecnología
Unidad Valle de las Palmas

1er. Congreso Internacional de Ciencias de la Ingeniería y Tecnología 2017

Otorga la siguiente

CONSTANCIA

a

**Rigoberto Cerino Jiménez, David Eduardo Pinto Avendaño,
Sergio Vergara Limon, María Aurora Diozcora Vargas Treviño,
Darnes Vilariño Ayala**

Por su participación en el Eje Temático Electrónica y Bioinstrumentación con el trabajo titulado

**Diseño e Implementación de una Silla de Ruedas Motorizada
Controlada con Interfaz Inalámbrica**

Tijuana, Baja California, México, del 20 al 23 de septiembre del 2017


Mtro. Alonso Hernández Guitrón
Director de la ECITEC


Dra. María de los Angeles Zárate López
Coordinadora de Posgrado e Investigación


Dr. Luis Jesús Villarreal Gómez
Presidente del Comité Organizador


Dr. Alberto Hernández Maldonado
Presidente del Comité Científico


CONGRESO INTERNACIONAL
de Ciencias de la Ingeniería y Tecnología


ECITEC


60 ANIVERSARIO
UABC





**La Sociedad Mexicana de Ingeniería Mecánica
otorga el presente reconocimiento al:
Ing. Rigoberto Cerino Jiménez**

Como Participante en su XXIII CONGRESO INTERNACIONAL ANUAL

Al haber presentado el artículo A3_180: “Desarrollo de un sistema mecatrónico para controlar una silla de ruedas motorizada con dispositivos inalámbricos”.
Publicado en la Memorias del Congreso.

Cuernavaca, Morelos a 20 de Septiembre 2017.


DR. VÍCTOR HUGO JACOBO ARMENDÁRIZ
Presidente de la SOMIM



B.1. Certificación TOEFL

TOEFL ITP Score Report

| | | | | |
|----------------------|---------------------------------|--------------------|------------|-----------|
| Name of Institution: | FACULTAD DE LENGUAS DE LA BUAP | | | |
| Name: | CERINO RIGOBERTO | Student Number: | 215471007 | |
| DOB: | 01/01/1900 | Sex: | M | |
| | | Degree: | | |
| Native Country: | Mexico | Times Taken TOEFL: | None | |
| Native Language: | Spanish | | | |
| Scaled Scores: | | Test Date: | 04/21/2017 | |
| | Listening Comprehension: | 47 | Form: | TOEFL ITP |
| | Structure & Written Expression: | 45 | | |
| | Reading Comprehension: | 54 | | |
| | Total Score: | 487 | | |

 **ETS TOEFL ITP**

The face of this document has a security background. The back contains a watermark. Hold at an angle to view.

The TOEFL® ITP Assessment Series is designed to be used for placement, progress monitoring, and exit purposes. TOEFL® ITP scores can also be used for admissions to programs and institutions where English is not the dominant language of instruction for content courses. Learn more at www.ets.org/toefl_itp/use.

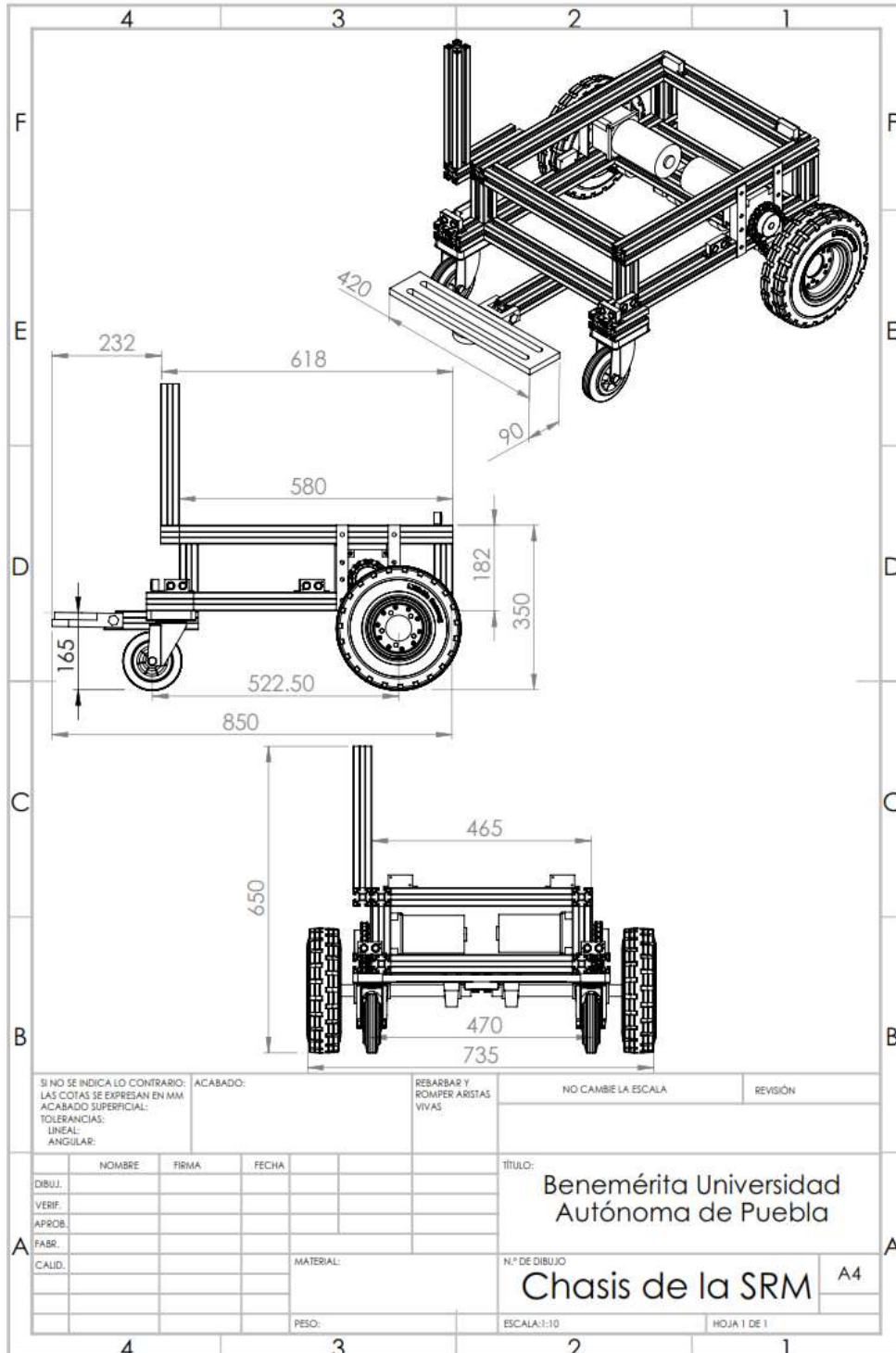
10019-10075 • F00-100130 • Printed in U.S.A. I.N. 770462

Student's File Copy
Do Not Copy

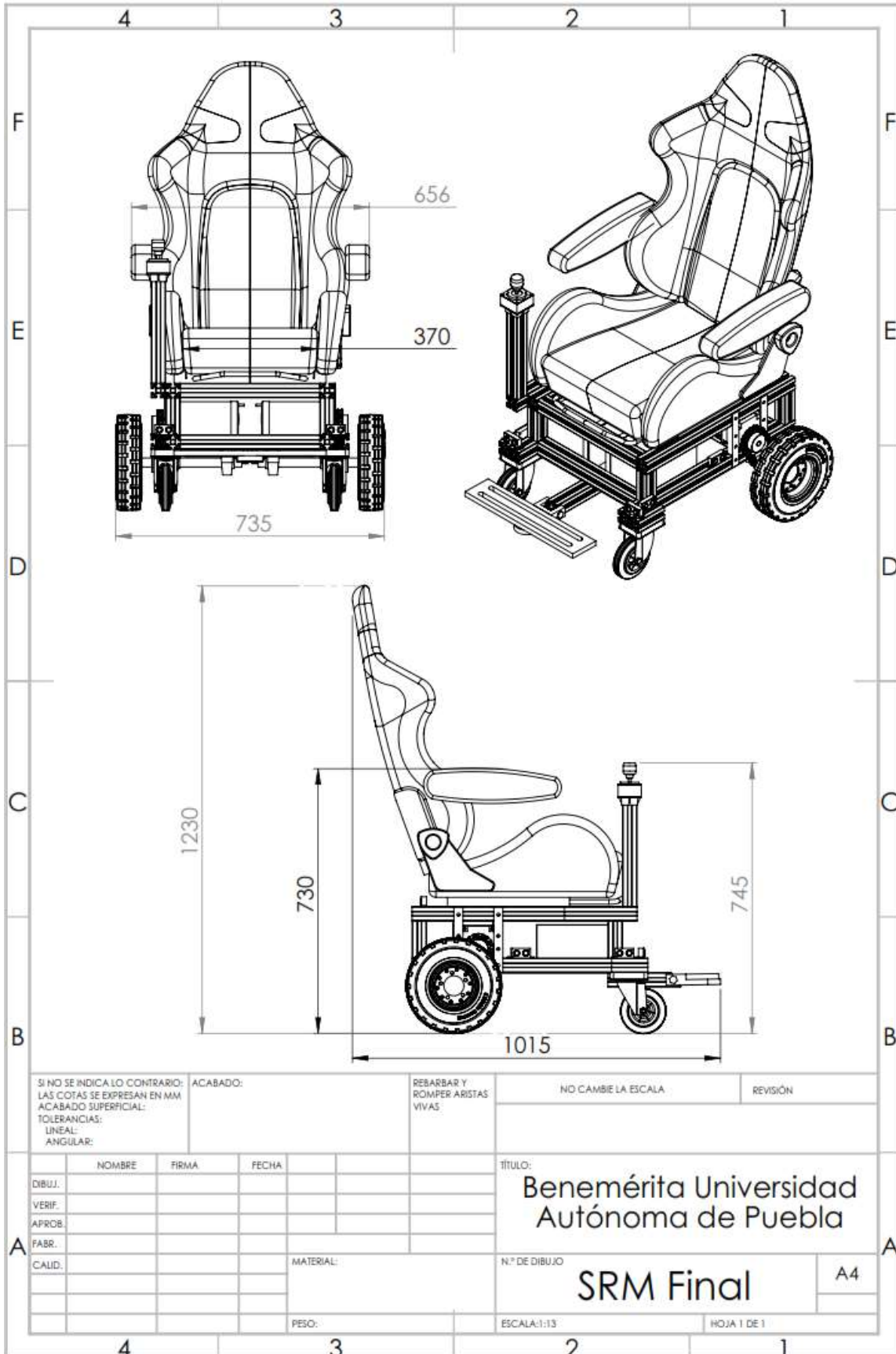
Copyright © 2002 by Educational Testing Service.

Apéndice C Medidas del diseño mecánico

En este apéndice se presentan los dibujos técnicos de las estructuras mecánicas diseñadas y ensambladas para armar la estructura de la SRM, con el objetivo de conocer las dimensiones de los elementos que conforman el mecanismo.



Desarrollo de un sistema mecatrónico para controlar una silla de ruedas motorizada mediante diversos dispositivos por enlace inalámbrico



Apéndice D Firmware

D.1. Firmware principal

A continuación se presenta el código desarrollado que se encarga de la asociación de movimientos por los dispositivos de entrada, con las acciones que realiza la SRM, es decir, traduce las acciones deseadas por el usuario a señales para variar las velocidades y direcciones de los motores.

```
#define signalA1    5//Señal A para puente H izquierdo
#define signalB1    6//Señal B para puente H izquierdo
#define signalA2    7//Señal A para puente H derecho
#define signalB2    8//Señal B para puente H derecho
#define PWMI        10//Señal PWM para puente H izquierdo
#define PWMD        11//Señal PWM para puente H derecho
#define x           A0//Entrada del eje X del Joystick
#define y           A1//Entrada del eje Y del Joystick
#define z           A2//Entrada del eje Z del Joystick
#define D           delay(6);
#define min_i       480
#define max_i       345
#define min_d       540
#define max_d       675
#define min_r       485
#define max_r       350
#define min_a       545
#define max_a       680
#define turbo       127
//#define val_max 200
#define rango       135
#define rangoInicial 10 //RANGO HOLGURA PARA LECTURA PWM_##
#define rangoSucio  -30 //RANGO HOLGURA PARA LECTURA CON MEDIO FILTRO
```

```
int adc_ejex = 0, adc_ejey = 0, adc_ejez = 0;
int pwm_derecha = 0, pwm_izquierda = 0, potxi=0, potyab=0, potzi=0, potxd=0, potyar=0,
potzd=0, avance=0, retroceso=0,PWMI_NEW=0, PWMD_NEW=0, impulsoi=0,
impulsod=0;
float pwm_xi= 0, pwm_xd =0, pwm_yab = 0, pwm_yar = 0, pwm_zi = 0, pwm_zd = 0, x_d,
x_i, y_ar, y_ab, z_i, z_d;
float direccion_x=0, direccion_y=0, PWMD_ORG=0, PWMI_ORG=0, dir=0,
val_max=200;
```

```
void setup()
{
  // initialize serial communications at 9600 bps:
  Serial.begin(9600);
  pinMode(signalA1,   OUTPUT); // Salida señal A izquierda
  pinMode(signalB1,   OUTPUT); // Salida señal B izquierda
  pinMode(signalA2,   OUTPUT); // Salida señal A derecha
  pinMode(signalB2,   OUTPUT); // Salida señal B derecha
}
void loop()
{
  digitalWrite(signalA1, LOW);
  digitalWrite(signalB1, LOW);
  digitalWrite(signalA2, LOW);
  digitalWrite(signalB2, LOW);
  D
  // Lectura de los valores analógicos del potenciómetro:
  adc_ejex = analogRead(x);
  adc_ejey = analogRead(y);
  adc_ejez = analogRead(z);

  y_ar=adc_ejey-530;
  y_ab=495-adc_ejey;

  z_i=adc_ejez-535;
  z_d=495-adc_ejez;

  direccion_x = map(adc_ejex, 345, 675, 0, val_max);

  avance =  map(y_ar, 0, 150, 0, val_max);
  retroceso = map(y_ab, 0, 140, 0, val_max);

  pwm_zi = map(z_i, 0, 190, 0, 255);
  pwm_zd = map(z_d, 0, 180, 0, 255);

  if (direccion_x<=0)
    direccion_x=0;
  if (direccion_x>=val_max)
    direccion_x=val_max;
  if (avance<=0)
    avance=0;
  if (avance>=val_max)
    avance=val_max;
```

```
if (retroceso<=0)
  retroceso=0;
if (retroceso>=val_max)
  retroceso=val_max;
if (pwm_zi<=0)
  pwm_zi=0;
if (pwm_zd<=0)
  pwm_zd=0;
if (pwm_zi>=255)
  pwm_zi=255;
if (pwm_zd>=255;
  pwm_zd=255;

dir=200*(-((direccion_x-100)*(direccion_x-100)/10000)+1);

if (avance>5&&avance<=15)
{
  setDireccion(true);
  direccion(true);
  impulsoi=PWMI_NEW*15;
  impulsod=PWMD_NEW*15;
  analogWrite(PWMI, impulsoi);
  analogWrite(PWMD, impulsod);
  Serial.print("PWM Rueda Izquierda = ");
  Serial.print(impulsoi);
  Serial.print(" PWM Rueda Derecha = ");
  Serial.println(impulsod);
  delay(500);
}
else if (retroceso>5&&retroceso<=15)
{
  setDireccion(false);
  direccion(false);
  impulsoi=PWMD_NEW*15;
  impulsod=PWMI_NEW*15;
  analogWrite(PWMI, impulsoi);
  analogWrite(PWMD, impulsod);
  Serial.print("PWM Rueda Izquierda = ");
  Serial.print(impulsoi);
  Serial.print(" PWM Rueda Derecha = ");
  Serial.println(impulsod);
  delay(500);
}
```

```
else if (avance>=20)
{
    setDireccion(true);
    direccion(true);
    analogWrite(PWMI, PWMI_NEW);
    analogWrite(PWMD, PWMD_NEW);

    Serial.print("PWM Rueda Izquierda = ");
    Serial.print(PWMI_NEW);
    Serial.print("  PWM Rueda Derecha = ");
    Serial.println(PWMD_NEW);
}

else if (retroceso>=20)
{
    setDireccion(false);
    direccion(false);
    analogWrite(PWMD, PWMI_NEW);
    analogWrite(PWMI, PWMD_NEW);

    Serial.print("PWM Rueda Izquierda = ");
    Serial.print(PWMD_NEW);
    Serial.print("  PWM Rueda Derecha = ");
    Serial.println(PWMI_NEW);
}

else if (pwm_zi>rangoInicial)
{
    digitalWrite(signalA1, LOW);
    digitalWrite(signalB1, HIGH);
    digitalWrite(signalA2, HIGH);
    digitalWrite(signalB2, LOW);
    analogWrite(PWMI, pwm_zi);
    analogWrite(PWMD, pwm_zi);
    Serial.println("Giro sobre propio eje (Izquierda)");
    Serial.print("Rueda_Izq ");
    Serial.print(pwm_zi);
    Serial.print("\t Rueda_Der = ");
    Serial.println(pwm_zi);
    //delay(100);
}
```

```
    D
  }

  else if (pwm_zd>rangoInicial)
  {
    digitalWrite(signalA1, HIGH);
    digitalWrite(signalB1, LOW);
    digitalWrite(signalA2, LOW);
    digitalWrite(signalB2, HIGH);
    analogWrite(PWMI, pwm_zd);
    analogWrite(PWMD, pwm_zd);
    Serial.println("Giro sobre propio eje (Derecha)");
    Serial.print("Rueda_Izq ");
    Serial.print(pwm_zd);
    Serial.print("\t Rueda_Der = ");
    Serial.println(pwm_zd);
    //delay(100);
    D
  }
}
//////////Decalación de funciones//////////
//||Función para definir el sentido de avance||//

void setDireccion(boolean direccion){
  if(direccion)
  {
    digitalWrite(signalA1, HIGH);
    digitalWrite(signalB1, LOW);
    digitalWrite(signalA2, HIGH);
    digitalWrite(signalB2, LOW);
    D;
  }
  else{
    digitalWrite(signalA1, LOW);
    digitalWrite(signalB1, HIGH);
    digitalWrite(signalA2, LOW);
    digitalWrite(signalB2, HIGH);
    D;
  }
}
//Función para dirección de giro
void direccion(boolean y)
{
```

```
if (y)
{
  if (direccion_x<=100) //giro del volante a la izquierda
  {
    PWMI_ORG=avance*dir; //cálculo de ciclos de trabajo M2 y M2
    PWMD_ORG=avance*val_max;
  }
  else
  {
    PWMD_ORG=avance*dir; //cálculo de ciclos de trabajo M2 y M2
    PWMI_ORG=avance*val_max;
  }
}
else
{
  if (direccion_x<=100) //giro del volante a la izquierda
  {
    PWMI_ORG=retroceso*dir; //cálculo de ciclos de trabajo M2 y M2
    PWMD_ORG=retroceso*val_max;
  }
  else
  {
    PWMD_ORG=retroceso*dir; //calculo de ciclos de trabajo M2 y M2
    PWMI_ORG=retroceso*val_max;
  }
}
PWMI_NEW=map(PWMI_ORG, 0, (val_max*val_max), 0, 255);
PWMD_NEW=map(PWMD_ORG, 0, (val_max*val_max), 0, 255);
}
```

D.2. Firmware para la adquisición de las señales enviadas por la aplicación móvil.

A continuación se presenta el código desarrollado para la adquisición de las señales enviadas a través de la aplicación móvil, así como la asociación de estas señales a los moduladores PWM.

```
#include <SoftwareSerial.h>
SoftwareSerial mySerial(10, 11); //Rx, Tx
```

```
byte dato[10];
unsigned int i=0;
unsigned int x=100;
unsigned int y=100;
char boton = 'p';
```

```
void setup()
{
  Serial.begin(9600);
  mySerial.begin(9600);
}

void loop()
{
  if(Serial1.available()>0)
  {
    i = Serial1.readBytesUntil('f', dato, 10);
    if(i==1)
    {
      if((dato[0] == 'a') || (dato[0] == 'i') || (dato[0] == 'p') || (dato[0] == 'd') || (dato[0] ==
'r'))
        boton = dato[0];
      else
        boton = 'p';
      else
      {
        x = dato[0];
        y = dato[1];
      }
    }
  }
}
```

D.3. Firmware para entablar comunicación con el brazalete Myo

A continuación se presenta el código implementado para realizar la comunicación con el brazalete Myo y comenzar a recibir los datos que éste genera, asimismo realiza el procesamiento de las señales y su discriminación para cada movimiento en particular.

```
#include <MyoBridge.h>
#include <SoftwareSerial.h>

#define mano_cerrada 4 // Avance en línea recta
#define aduccion 5 // Wavein Giro a la izquierda
#define abduccion 6 // Waveout Giro a la derecha
#define extender_dedos 7 //Detener silla
#define doble_toque 8 // Retroceso en línea recta

//SoftwareSerial conexión a MyoBridge
```

```
SoftwareSerial mySerial(10, 11);

//Inicializar el objeto MyoBridge con el software de conexión serial
MyoBridge bridge(mySerial);

//declarar función para manejar los datos de "pose"
void handlePoseData(MyoPoseData& data) {

    //convert pose data to MyoPose
    MyoPose pose;
    pose = (MyoPose)data.pose;

    //Discriminador de movimientos
    switch (pose) {
        case 0:
            digitalWrite(mano_cerrada,LOW);
            digitalWrite(aduccion,LOW);
            digitalWrite(abduccion,LOW);
            digitalWrite(extender_dedos,LOW);
            digitalWrite(doble_toque,LOW);
            break;
        case 1:
            digitalWrite(mano_cerrada,HIGH);
            Serial.println(" Movimiento de cerrar mano detectado");
            Serial.println("\t Avance de la SRM en linea recta");
            Serial.print("Rueda_Izq: ");
            Serial.print(255);
            Serial.print("\t Rueda_Der: ");
            Serial.println("255");
            break;
        case 2:
            digitalWrite(aduccion,HIGH);
            Serial.println(" Movimiento de aduccion detectado");
            Serial.println("\t Giro a la izquierda de SRM");
            Serial.print("Rueda_Izq: ");
            Serial.print("0");
            Serial.print("\t Rueda_Der: ");
            Serial.println("255");
            break;
        case 3:
            digitalWrite(abduccion,HIGH);
            Serial.println(" Movimiento de abduccion detectado");
```



```
Serial.println("\t Giro a la derecha de SRM");
Serial.print("Rueda_Izq ");
Serial.print("255");
Serial.print("\t Rueda_Der ");
Serial.println("0");
break;
case 4:
digitalWrite(extender_dedos,HIGH);
Serial.println(" Movimiento extender dedos detectado");
Serial.println("\t SRM en reposo");
Serial.print("Rueda_Izq ");
Serial.print("0");
Serial.print("\t Rueda_Der ");
Serial.println("0");
break;
case 5:
digitalWrite(doble_toque,HIGH);
Serial.println(" Movimiento de doble toque detectado");
Serial.println("\t Retroceso de la SRM en linea recta");
Serial.print("Rueda_Izq ");
Serial.print("255");
Serial.print("\t Rueda_Der ");
Serial.println("255");
break;
}
delay(100);

}

void setup() {
pinMode(mano_cerrada, OUTPUT);
pinMode(aduccion, OUTPUT);
pinMode(abduccion, OUTPUT);
pinMode(extender_dedos, OUTPUT);
pinMode(doble_toque, OUTPUT);

//initialize both serial connections
Serial.begin(115200);
mySerial.begin(115200);

//Espero hasta que MyoBridge haya encontrado al brazalete y se conecta
Serial.println("Searching for Myo...");
bridge.begin();
```

```
Serial.println("connected!");

//establecer la función que maneja los eventos de pose
bridge.setPoseEventCallBack(handlePoseData);
//Decirle al brazal que necesitamos los datos de Pose
bridge.enablePoseData();
//Asegura que Myo esté desbloqueado
bridge.unlockMyo();

}

void loop()
{
//actualizar la conexión a MyoBridge
bridge.update();
}
```

D.4. Firmware para la lectura de sensores de distancia

```
// declaracion de variables para pines
const int pinecho = 2;
const int pintrigger = 1;
const int motor = 0;

// variables para cálculos
unsigned int tiempo, distancia;

void setup()
{
pinMode(pinecho, INPUT);
pinMode(pintrigger, OUTPUT);
pinMode(motor, OUTPUT);
}

void loop() {
// enviar pulso de disparo en el pin "trigger"
delayMicroseconds(2);
digitalWrite(pintrigger, HIGH);
// EL PULSO DURA AL MENOS 10 us en estado alto
delayMicroseconds(10);
digitalWrite(pintrigger, LOW);

// medir el tiempo en estado alto del pin "echo" el pulso es proporcional a la distancia medida
```

```
tiempo = pulseIn(pinecho, HIGH);

// la velocidad del sonido es de 340 m/s o 29 microsegundos por centímetro
// Dividimos el tiempo del pulso entre 58, tiempo que tarda recorrer ida y vuelta un
centímetro la onda sonora
distancia = tiempo / 58;

// Apagar motores
if (distancia <= 30)
{
  analogWrite(PWMI, LOW);
  analogWrite(PWMD, LOW);
}
}
```

Bibliografía

- [1] INEGI. Censo de Población y Vivienda 2010, Cuestionario ampliado. Estados Unidos Mexicanos/Población con discapacidad/Población con limitación en la actividad y su distribución porcentual según causa para cada tamaño de localidad y tipo de limitación.
- [2] INEGI, “Las personas con discapacidad en México:una visión censal”. 2004.
- [3] Pascual, Ponce, Rodríguez, “Sillas de ruedas. Características técnicas y antropométricas”. ELSEVIER, Movilidad, locomoción y transporte | Rehabilitación.
- [4] J. C. Miangolarra Page. Sillas de ruedas motorizadas o de tracción electromecánica. ELSEVIER, Movilidad, locomoción y transporte | Rehabilitación, (Septiembre 1999).
- [5] J. M. Alcubierre, J. Minguez, L. Montesano, L. Montano, O. Saz, E. Lleida, Silla de Ruedas Inteligente Controlada por Voz. ResearchGate Article, (pp 1-3).
- [6] Fong T, Thorpe C, Baur C, Collaborative Control: A robot-centered model for vehicle teleoperation. Proceedings of the AAAI Spring Symposium on Agents with Adjustable Autonomy. Stanford, CA, (1999).
- [7] J. C. Miangolarra Page. “Sillas de ruedas motorizadas o de tracción electromecánica”. ELSEVIER, Movilidad, locomoción y transporte | Rehabilitación.
- [8] TRENDS IN NOLICENSED MOBILITY AIDS - Ronald Lipskin, M .S. Staff Engineer, Bioengineering Research Service Veterans Administration Prosthetics Center 252 Seventh Avenue, New York, N .Y. 10001
- [9] Miller D, Slack M (1995) “Design and testing of a lowcost robotic wheelchair prototype.” Autonomous Robots. 2, pp. 77-88
- [10] Simpson R. C (2005) “Smart wheelchairs: A literature review.” Journal of rehabilitation research and development. 42, pp. 423-436.
- [11] Prassler E, Scholz J, Fiorini P (2001), “A robotics wheelchair for crowded public environment.”Robotics & Automation Magazine, IEEE. 8, pp. 38-45.

- [12] De la Cruz C, Celeste W, Bastos T (2011), “A robust navigation system for robotic wheelchairs.” *Control engineering practice*. 19, pp. 575-590.
- [13] Fong T, Thorpe C, Baur C (1999) “Collaborative Control: A robot-centered model for vehicle teleoperation.” *Proceedings of the AAAI Spring Symposium on Agents with Adjustable Autonomy*. Stanford, CA.
- [14] Galindo C, Gonzalez J, Fernández-Madriral J.A (2006) “Control architecture for human–robot integration: application to a robotic wheelchair.” *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part B*. 36, pp. 1053-1067
- [15] B. E. Ilon, “Wheels for a course stable self propelling vehicle movable in any desired direction on the ground or some other base,” *United States Patent* 3, 876, 255, 1975.
- [16] M. Wada and H. H. Asada, “Design and control of a variable footprint mechanism for holonomic omnidirectional vehicles and its application to wheelchairs,” *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 15, no. 6, pp. 978–989, 1999.
- [17] INEGI. Censo de Población y Vivienda 2010, Cuestionario ampliado. Estados Unidos Mexicanos/Población con discapacidad/Población con limitación en la actividad y su distribución porcentual según causa para cada tamaño de localidad y tipo de limitación.
- [18] INEGI. Censo de Población y Vivienda 2010, Cuestionario ampliado. Estados Unidos Mexicanos/Población con discapacidad/Población total y su distribución.
- [19] M. M. Gustavo, Pérez V. Milagros “Diseño concurrente de silla de ruedas para minusválidos” *Universidad Central de Venezuela, Caracas* 2004.
- [20] Z. V. Braulio, N. S. Antonio, H. R. José R. “Diseño y fabricación de una silla de ruedas eléctrica modular para un paciente con Amelia Congénita”, *Universidad Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, Marzo* 2013.
- [21] Grupo SKF, Cadenas de transmisión SKF, *Publicación 6772 ES – Julio 2008* (pp. 7-10).
- [22] *Transmisión por cadenas, Cálculo y diseño, tutorial No. 127, Ingemecánica, Ingeniería, Consultoría y Formación.*
- [23] “Selección y aplicación de motores eléctricos, WEG, Transformando energía en soluciones.
- [24] S. H. Luis Fernando, T. S. M. Christopher René, U. S. Guillermo, R. A. Beatríz “Rediseño para la Optimización de una Silla de Ruedas Eléctrica de dos Posiciones”, *Instituto Politécnico Nacional, Sección de estudios de Posgrado e Investigación,*

Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Unidad Profesional “Adolfo López Mateos”, Zacatenco, Noviembre 2011.

- [25] B. R. Gloria N., P. E. Daniel, “Automatización de un silla de ruedas”, Mecánica y Eléctrica, Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Unidad Culhuacán, Enero 2015.
- [26] B. O. Aníbal “ROBÓTICA, Manipuladores y Robots Móviles”, marco Boixareu Editores, pp. 62-70, 2001.
- [27] F. Reyes, “Cinemática de Robots Manipuladores”, Robótica, Control de Robots Manipuladores, Ed. Alfaomega, primera edición, pp. 201-217..
- [28] F. Reyes, “Robótica móvil”, Robótica, Control de Robots Manipuladores, Ed. Alfaomega, primera edición, pp. 509-541.).
- [29] F. R. Cortés, MATLAB aplicado a robótica y mecatrónica (1ra ed.), (pp. 148-155). Alfaomega, México, (enero 2012).
- [30] J. Barraquand, J.C. Latombe, On Nonholonomic Mobile Robots and Optimal Maneuvering, Computer Science Department, Stanford University, CA 94305, USA, (1989).
- [31] Y. Yamamoto, X. Yun, Coordinating Locomotion and Manipulation of a Mobile Manipulator, University of Pennsylvania Department of Computer and Information Science Technical Report No. MS-CIS-92-18 (March 1992).
- [32] C. Canudas de Wit, B. Siciliano, Theory of Robot Control, (pp. 268-276). Springer-Verlag London Limited, (1996).
- [33] R. Fierro, F. L. Lewis, Control of an Nonholonomic Mobile Robot: Backstepping Kinematics into Dynamics. Automation and Robotics Research Institute The University of Texas at Arlington, (September 1996).
- [34] R. Silva-Ortigoza, Modelado, simulación y construcción de un robot móvil de ruedas tipo diferencial. CIDETE-IPN, Departamento de Posgrado, Área de Mecatrónica, Unidad Profesional Adolfo López Mateos, México (Septiembre 2010).
- [35] F. Dusek, D. Honc, P. Rozsival, Mathematical model of differentially steered mobile robot. International Conference on Process Control, Tatranská Lomnica, Slovakia, (June 2011).
- [36] R. Dhaouadi, A. Hatab, Dynamic Modelling of Differential-Drive Mobile Robots using Lagrange and Newton-Euler Methodologies: A Unified Framework. Adv Robot, Sharjah, UAE, (2013).

- [37] T. Soldoverieri C., *Introducción a la Mecánica de Lagrange y Hamilton*, (pp. 349-353). La universidad del Zulia, (2013).
- [38] Giuseppe Oriolo “Control of Nonholonomic Systems”, *Dottorato di Ricerca in Ingegneria dei Sistemi, DIS, Università di Roma “La Sapienza”*.
- [39] Hoja técnica, “Power Converter 150-kHz 3-A Step-Down Voltage Regulator”, Texas Instrument, SNVS124D –NOVEMBER 1999
- [40] Hoja técnica, “ATMEL 8-BIT MICROCONTROLLER WITH 4/8/16/32KBYTES IN-SYSTEM PROGRAMMABLE FLASH”, Atmel, Noviembre 2015.
- [41] JnHuaMao Technology Company, Hoja técnica “Bluetooth 4.0 BLE module”, Marzo 2014.
- [42] J. Cana, «HETPRO,» 22 Enero 2016. [En línea]. Available: <https://hetpro-store.com/TUTORIALES/sensor-hc-sr04/>.
- [43] AN-6003 “Shoot-through” in Synchronous Buck Converters Jon Klein Power Management Applications
- [44] K. Oggata, “Introducción a los sistemas de control”, *Ingeniería de Control Moderna*, pp. 1-13, 3a Ed., Edit. Pearson Education.
- [45] ARDUINO, «ARDUINO,» 2017. [En línea]. Available: <https://www.arduino.cc/en/Reference/Map>
- [46] L. J. Luis A., “Sistema electrónico para el control de una dirección diferencial con motores brushless”, *Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, CDMX*, agosto de 2012. PP 35-39.
- [47] S. M. Juan P., G. S. Pablo, “Comunicación entre dispositivos Bluetooth” *E.T.S. De Ingenierías Informáticas y Telecomunicación, Universidad de Granada, Curso 2005/2006*.
- [48] Wolber, David; Abelson, Hal; Spertus, Ellen; & Looney, Liz. “App Inventor: Create Your Own Android Apps”. O'Reilly Media. Mayo, 2011.
- [49] P.-G. Jung, G. Lim, S. Kim, and K. Kong, "A Wearable Gesture Recognition Device for Detecting Muscular Activities Based on Air-Pressure Sensors," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 11, pp. 485 - 494, 2005.
- [50] Thalmic Labs. (2015). Myo Gesture Control Armband. Available: <https://www.thalmic.com/en/myo/>