



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

Trabajo De Grado Previo A La Obtención Del Título De
INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

TEMA:

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN CONTROL POR COMANDOS
DE VOZ A UNA SILLA DE RUEDAS**

AUTORES:

ANDRÉS MARCELO ALTA ANDRANGO
JÉSSICA KARINA GUIJARRO REVELO

DIRECTOR: ING. CARLOS OBANDO

IBARRA- ECUADOR

2015



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

La UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE dentro del proyecto Repositorio Digital Institucional determina la necesidad de disponer de textos completos en formato digital con la finalidad de apoyar los procesos de investigación, docencia y extensión de la universidad.

Por medio del presente documento dejo sentada mi voluntad de participar en este proyecto para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DEL CONTACTO	
Cédula de identidad:	1003295449
Apellidos y nombre:	Alta Andrango Andrés Marcelo
Dirección:	Barrio el Ejido, calle Lucila Maya (Cotacachi).
E-mail:	andy-13@hotmail.com
Teléfono fijo:	0993964300 / 062554400

DATOS DEL CONTACTO	
Cédula de identidad:	0401303920
Apellidos y nombre:	Guijarro Revelo Jéssica Karina
Dirección:	Barrio El Olivo, Av. 17 de Julio (Ibarra)
E-mail:	jessitost@gmail.com
Teléfono móvil:	0986215331/062986325

DATOS DE LA OBRA	
Título:	DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN CONTROL POR COMANDOS DE VOZ A UNA SILLA DE RUEDAS.
Autor:	Andrés Marcelo Alta Andrango. Jéssica Karina Guijarro Revelo.
Fecha:	30 de marzo del 2015
Programa:	Pregrado
Título por el que optan:	Ingeniería en Mecatrónica
Director:	Ing. Carlos Obando

2. AUTORIZACIÓN DE USO A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD

Yo, Alta Andrango Andrés Marcelo, con cédula de identidad Nro. 1003295449, en calidad de autor y titular de los derechos patrimoniales de la obra o trabajo de grado descrito anteriormente, hago entrega del ejemplar respectivo en formato digital y autorizo a la Universidad Técnica del Norte, la publicación de la obra en el Repositorio Digital Institucional y uso del archivo digital en la Biblioteca de la Universidad con fines académicos, para ampliar la disponibilidad del material y como apoyo a la educación, investigación y extensión; en concordancia con la Ley de Educación Superior Artículo 144.

Yo, Guijarro Revelo Jéssica Karina, con cédula de identidad Nro. 040130392-0, en calidad de autor y titular de los derechos patrimoniales de la obra o trabajo de grado descrito anteriormente, hago entrega del ejemplar respectivo en formato digital y autorizo a la Universidad Técnica del Norte, la publicación de la obra en el Repositorio Digital Institucional y uso del archivo digital en la Biblioteca de la Universidad con fines académicos, para ampliar la disponibilidad del material y como apoyo a la educación, investigación y extensión; en concordancia con la Ley de Educación Superior Artículo 144.

3. CONSTANCIAS

Los autores manifiestan que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto la obra es original y que son los titulares de los derechos patrimoniales, por lo que asumen la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrán en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 30 días del mes de Marzo del 2015.

LOS AUTORES:



Alta Andrango Andrés Marcelo
C.I. 100329544-9



Guijarro Revelo Jéssica Karina
C.I. 040130392-0



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE GRADO A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Yo, Alta Andrango Andrés Marcelo, con cédula de identidad Nro. 100329544-9, manifiesto mi voluntad de ceder a la Universidad Técnica del Norte los derechos patrimoniales consagrados en la Ley de Propiedad Intelectual del Ecuador, artículos 4, 5 y 6, en calidad de autor de la obra o trabajo de grado denominado: **"DESEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN CONTROL POR COMANDOS DE VOZ A UNA SILLA DE RUEDAS"**, que ha sido desarrollado para optar por el título de: **Ingeniero en Mecatrónica** en la Universidad Técnica del Norte, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente. En mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Técnica del Norte.

Ibarra, a los 30 días del mes de marzo del 2015.

.....
Alta Andrango Andrés Marcelo
C.I. 1003295449



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE GRADO A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Yo, Guijarro Revelo Jéssica Karina, con cédula de identidad Nro. 040130392-0, manifiesto mi voluntad de ceder a la Universidad Técnica del Norte los derechos patrimoniales consagrados en la Ley de Propiedad Intelectual del Ecuador, artículos 4, 5 y 6, en calidad de autor de la obra o trabajo de grado denominado: **“DESEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN CONTROL POR COMANDOS DE VOZ A UNA SILLA DE RUEDAS”**, que ha sido desarrollado para optar por el título de: **Ingeniera en Mecatrónica** en la Universidad Técnica del Norte, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente. En mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Técnica del Norte.

Ibarra, a los 30 días del mes de marzo del 2015.

Guijarro Revelo Jéssica Karina

C.I. 040130392-0

DECLARACIÓN

Yo, ANDRÉS MARCELO ALTA ANDRANGO, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; y que éste no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.



Andrés Marcelo Alta Andrago

C.I.: 100329544-9

DECLARACIÓN

Yo, JÉSSICA KARINA GUIJARRO REVELO, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; y que éste no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.



Jéssica Karina Guijarro Revelo

C.I.:040130392-0

CERTIFICACIÓN DE ASESOR

En calidad de Director de Trabajo de Grado, certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Andrés Marcelo Alta Andrango y Jéssica Karina Guijarro Revelo, bajo mi supervisión.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'CARLOS OBANDO', is written over a horizontal line.

Ing. Carlos Obando

DIRECTOR DE PROYECTO

AGRADECIMIENTO

A Jessy mi compañera y amiga, que con su apoyo y conocimientos logramos hacer de ésta una experiencia muy especial. De igual manera a toda su linda familia, por brindarme su confianza y estar a nuestro lado a lo largo de toda esta travesía.

A mis tías y tíos que siempre estuvieron al pendiente de mi bienestar, sin importar que tan cerca o lejos se encuentren.

Al Ing. Lenin Encalada, por compartirnos sus vivencias en este proceso.

Al Ing. Carlos Obando, por su apoyo incondicional y por creer en este proyecto.

A mis compañeros y amigos que fueron parte esencial de la convivencia universitaria.

A todos y todas, gracias!!!

Andrés Marcelo Alta Andrango

AGRADECIMIENTO

Primeramente un agradecimiento muy especial a Dios, su presencia en mi vida ha sido y seguirá siendo fundamental para avanzar en busca de la culminación de todos mis anhelos. Gracias por guiarme, bendecirme y ser mi ejemplo a seguir.

A mi familia fuente de apoyo incondicional en toda mi vida y sobre todo durante los años de estudio de mi carrera profesional.

A la Universidad Técnica del Norte, por acogerme y brindarme la oportunidad de alimentar día a día mis conocimientos.

Al Ing. Carlos Obando, por su dirección y tiempo dedicado a este proyecto.

Al Ing. Lennin Encalada, por su ayuda y aportes valiosos para el desarrollo de este tema.

A mi querido compañero de proyecto y gran amigo Andrés, ya que fue parte fundamental durante todo este periodo, y de manera muy especial a toda su familia por su apoyo brindado.

A todos mis amigos y personas que de una u otra manera contribuyeron a la culminación de este proyecto.

Jéssica Karina Guijarro Revelo

DEDICATORIA

Dedico este trabajo principalmente a Dios, por haberme dado la vida y permitirme culminar una importante etapa en mi formación profesional.

A mis padres Carlos y Rosita por su comprensión y ayuda en todo momento; gracias a ellos he logrado encarar las adversidades con dignidad, sin desfallecer en el intento. Han sembrado en mí valores y principios, todo ello con una gran dosis de amor y sin pedir nunca nada a cambio.

A mi hermano Santy quien me ha brindado su confianza y me ha dado el impulso para entender que con perseverancia y optimismo es posible llegar muy alto.

A mi pequeño Matheus que con su alegría inyecta en mí la energía necesaria para abonar el camino que en un futuro no muy lejano será cosechado con sus propios méritos.

A mis abuelitos, especialmente a mi abuelito Ángel que nos mira y protege desde arriba, y a toda mi familia que de una u otra manera estuvo siempre pendiente de mí.

Andrés Marcelo Alta Andrango

DEDICATORIA

Con mi corazón lleno de gratitud, dedico todo el esfuerzo que lleva consigo la elaboración de este trabajo a mis padres, Lupita y Luis, por ser mi gran ejemplo, mi guía, mi apoyo en todos los sentidos, por creer en mí, por su amor y sobre todo por sembrarme la semilla de la perseverancia y responsabilidad.

A mis hermanas Mary, Vero y a mi hermano Luis por su ayuda, sus palabras y su aliento en la elaboración de este trabajo.

A mis sobrinos, Jordan, Camilo, Diego y Valeria, por ser mi fuente de inspiración para superarme y seguir adelante pese a todas las dificultades.

A mi abuelita Laura (+), por constituir parte fundamental del desarrollo de mi vida.

Jéssica Karina Guijarro Revelo

CONTENIDO

IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA	ii
AUTORIZACIÓN DE USO A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD.....	iii
CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE GRADO A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE	iv
DECLARACIÓN	vi
CERTIFICACIÓN DE ASESOR	viii
AGRADECIMIENTO	ix
DEDICATORIA	xi
RESUMEN	xxvii
ABSTRACT.....	xxviii
PRESENTACIÓN.....	xxix
1. MARCO TEÓRICO	1
1.1. DEFINICIÓN DE SILLA DE RUEDAS.....	1
1.1.1. ANTECEDENTES.....	1
1.1.2. ESTRUCTURA	4
1.1.2.1. Chasis	4
1.1.2.2. Ruedas delanteras	5
1.1.2.3. Ruedas traseras	6
1.1.2.3.1. <i>Tamaño</i>	6
1.1.2.3.2. <i>Composición</i>	6
1.1.2.3.3. <i>Aros de empuje</i>	7
1.1.2.4. Frenos	8
1.1.2.4.1. <i>Freno de zapata</i>	8
1.1.2.4.2. <i>Freno de tijera</i>	8
1.1.2.4.3. <i>Freno de una mano</i>	9
1.1.2.4.4. <i>Freno de tambor</i>	9

1.1.2.5.	Reposa brazos	9
1.1.2.6.	Reposa pies	10
1.1.2.7.	Asientos y respaldos	10
1.1.2.8.	Motores	10
1.1.2.9.	Baterías.....	10
1.1.3.	TIPOS DE SILLAS DE RUEDAS	11
1.1.3.1.	Silla de ruedas manual.....	11
1.1.3.2.	Silla manual para tránsito.....	11
1.1.3.3.	Silla de ruedas eléctrica	12
1.1.3.4.	Silla tipo Scooter	13
1.1.3.5.	Silla para deportes	13
1.1.3.6.	Silla de ruedas para pararse	14
1.1.3.7.	Silla de ruedas que suben escaleras.....	14
1.1.3.8.	Silla de ruedas para la playa	15
1.1.3.9.	Silla de ruedas bariátricas	15
1.1.3.10.	Silla de ruedas pediátrica	15
1.1.4.	CONSIDERACIONES GENERALES EN EL DISEÑO DE SILLAS DE RUEDAS	16
1.1.4.1.	Comodidad y seguridad del usuario	16
1.1.4.2.	Resistencias y durabilidad.....	17
1.1.4.3.	Aptitud para el uso	17
1.2.	SENSORES ULTRASÓNICOS	17
1.2.1.	COMPONENTES.....	18
1.2.2.	CONFIGURACIONES.....	19
1.2.3.	TÉCNICAS DE MEDICIÓN DE DISTANCIAS.....	19
1.2.3.1.	Sistema basado en el tiempo de vuelo.....	20
1.3.	SENSORES INFRARROJOS	21

1.3.1. COMPONENTES.....	22
1.3.2. CLASIFICACIÓN	22
1.4. PLATAFORMA ARDUINO	24
1.4.1. ANTECEDENTES.....	24
1.4.2. MODELOS OFICIALES	25
1.5. RECONOCIMIENTO DE VOZ	26
1.5.1. TRATAMIENTO DIGITAL DE SEÑALES	26
1.5.2. PROCESAMIENTO DE LA SEÑAL DE AUDIO	28
1.5.2.1. Muestreo	28
1.5.2.2. Cuantificación.....	29
1.5.2.3. Pre-Procesamiento.....	30
1.5.2.4. Ventaneo.....	30
1.5.2.5. Segmentación	31
1.6. MOTORES BRUSHLESS.....	31
1.6.1. ESTRUCTURA BÁSICA	32
1.6.2. LÓGICA DE FUNCIONAMIENTO.....	33
1.6.2.1. Sensores Hall.....	34
1.6.2.1.1. <i>Alineación basada en sensores de efecto hall</i>	37
1.6.2.2. Fuerza Contraelectromotriz (BEMF).....	38
1.6.2.2.1. <i>Métodos para detectar la fuerza contraelectromotriz</i>	39
1.6.3. MÉTODOS DE CONMUTACIÓN DE MOTORES SIN ESCOBILLAS..	40
1.6.4. TABLA COMPARATIVA DE UN MOTOR DC SIN ESCOBILLAS Y UN MOTOR DC CON ESCOBILLAS	43
1.7. BATERÍAS	45
1.7.1. BATERÍAS ALCALINAS.....	46
1.7.2. BATERÍA DE PLOMO- ÁCIDO	46
1.7.2.1. Composición Plomo ácido	47

1.7.2.1.1. <i>Ventajas</i>	47
1.7.2.1.2. <i>Desventajas</i>	48
1.7.2.1.3. <i>Normativa</i>	48
1.7.3. BATERÍAS DE IÓN- LITIO.....	48
1.7.3.1. Composición Ión- litio	49
1.7.3.1.1. <i>Ventajas</i>	50
1.7.3.1.2. <i>Desventajas</i>	51
1.7.3.1.3. <i>Normativa</i>	51
2. DISEÑO DEL HARDWARE	52
2.1. DESCRIPCIÓN DE LA SILLA DE RUEDAS	53
2.2. SELECCIÓN DE SENSORES ULTRASÓNICOS	55
2.3. SELECCIÓN DE SENSORES INFRARROJOS.....	56
2.3.1. DIAGRAMA DEL SISTEMA	57
2.4. SELECCIÓN DE LA PLATAFORMA ARDUINO	57
2.4.1. DESCRIPCIÓN GENERAL DE ARDUINO MEGA 2560	58
2.4.1.1. ENTRADAS Y SALIDAS	59
2.5. SELECCIÓN DEL MÓDULO DE RECONOCIMIENTO DE VOZ	60
2.5.1. CARACTERÍSTICAS	61
2.5.2. APLICACIONES	62
2.5.3. INSTALACIÓN DEL MÓDULO DE RECONOCIMIENTO DE VOZ	62
2.6. SELECCIÓN DE MOTORES	63
2.6.1. VENTAJAS DEL MOTOR BRUSHLESS FRENTE AL MOTOR ELÉCTRICO CONVENCIONAL.....	64
2.6.2. INSTALACIÓN DE LOS MOTORES BRUSHLESS	64
2.6.3. ACTIVACIÓN DEL GIRO EN AMBOS SENTIDOS DEL MOTOR BRUSHLESS	65
2.6.4. CIRCUITO CONTROLADOR DE GIRO.....	66

2.6.5. SELECCIÓN DEL DRIVER PARA EL MOTOR BRUSHLESS.....	67
2.7. SELECCIÓN DEL SISTEMA DE FRENO	69
2.7.1. SERVO MOTOR	70
2.8. SELECCIÓN DE BATERÍAS	70
3. DISEÑO DEL SOFTWARE	73
3.1. FLUJOGRAMA DEL PROGRAMA DE LOS SENSORES INFRARROJOS ...	74
3.2. FLUJOGRAMA DEL PROGRAMA DE LOS SENSORES ULTRASÓNICOS	75
3.3. FLUJOGRAMA DEL PROGRAMA DEL MÓDULO DE RECONOCIMIENTO DE VOZ.....	76
3.3.1. PROGRAMA DE APLICACIÓN DEL MÓDULO DE RECONOCIMIENTO DE VOZ EASY VR	85
3.3.1.1. Creación de comandos a través de EasyVR Commander v3.3.7..	85
3.3.1.2. Entrenamiento de comandos a través de EasyVR Commander v3.3.7	87
3.3.1.3. Creación de mensajes de voz con el software Sensory QuickSynthesis5	90
3.3.1.4. Importación de tabla de sonidos al software EasyVR Commander v3.3.7	92
3.4. FLUJOGRAMA DEL PROGRAMA DEL SERVOMOTOR.....	94
4. ANÁLISIS MATEMÁTICO DEL SISTEMA.....	95
4.1. CONSTRUCCIÓN DEL MOTOR BRUSHLESS.....	95
4.2. CIRCUITO EQUIVALENTE DEL MOTOR BRUSHLESS.....	97
4.3. DETERMINACIÓN DE LA MATRIZ DE INDUCTANCIAS DEL ESTATOR....	99
4.3.1. INDUCTANCIAS PROPIAS DEL ESTATOR	99
4.3.2. INDUCTANCIAS MUTUAS DEL ESTATOR	101
4.4. OPERACIÓN EN ESTADO ESTACIONARIO.....	104
4.4.1. ANÁLISIS DE POTENCIA.....	106
4.5. DESARROLLO	110

4.6. COMPORTAMIENTO VOLTAJE- VELOCIDAD	114
4.7. DIMENSIONAMIENTO DE VELOCIDAD.....	117
4.8. DIMENSIONAMIENTO DE ELEMENTOS EN FUNCIÓN DE CORRIENTE NOMINAL.....	122
4.9. DISTRIBUCIÓN DE SENSORES EN ESTRUCTURA DE SILLA	124
5. PRUEBAS Y RESULTADOS	126
5.1. PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO	126
5.1.1. PRUEBAS PARA MEJORAMIENTO DEL SISTEMA.....	126
5.1.1.1. Método	126
5.1.1.2. Mejoras.....	126
5.1.2. PRUEBAS DE CONFIABILIDAD DEL SISTEMA.....	129
5.1.2.1. Método	130
5.1.2.2. Estadísticas	130
CONCLUSIONES	135
RECOMENDACIONES	137
BIBLIOGRAFÍA	138
ANEXOS	143

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A. MANUAL DEL USUARIO.....	144
ANEXO B. MANUAL DE MANTENIMIENTO.....	153
ANEXO C. TABLA COMPARATIVA DE COSTOS DE SILLAS DE RUEDAS EN ECUADOR	160
ANEXO D. SECUENCIA DE ACTIVACIÓN DE LOS DEVANADOS DEL MOTOR EN FUNCIÓN DE LAS ENTRADAS DE LOS SENSORES DE EFECTO HALL. 162	
ANEXO E. ACTIVACIÓN DE LOS DRIVERS DEL MOTOR SEGÚN EL ORDEN DE LOS SENSORES HALL, GIRO HORARIO.....	163
ANEXO F. ACTIVACIÓN DE LOS DRIVERS DEL MOTOR SEGÚN EL ORDEN DE LOS SENSORES HALL, GIRO ANTI HORARIO.	164
ANEXO G. ESPECIFICACIÓN DE DRIVERS PARA MOTORES BRUSHLESS.	165
ANEXO H. TIPOS DE BATERÍAS Y SUS CARACTERÍSTICAS.	166
ANEXO I. CARACTERÍSTICAS DE LOS DISTINTOS MODELOS DE LA PLATAFORMA ARDUINO.....	167
ANEXO J. MANUAL DE INSTRUCCIONES DEL MÓDULO DE RECONOCIMIENTO DE VOZ.....	169
ANEXO K. MANUAL DE INSTRUCCIONES DEL SOFTWARE EASY COMMANDER.	170
ANEXO L. MANUAL DE INSTRUCCIONES DEL SOFTWARE QUICK SYNTHESIS.....	171
ANEXO M. ESPECIFICACIONES DE LA PLATAFORMA ARDUINO MEGA 2560.	172
ANEXO N. HOJA DE DATOS DEL INTEGRADO MC33035.....	173
ANEXO O. HOJA DE DATOS DEL TRANSISTOR 2SJ401.....	174
ANEXO P. HOJA DE DATOS DEL TRANSISTOR BUZ10.	175
ANEXO Q. ESPECIFICACIONES DEL SERVOMOTOR VSD-11AYMB.	176
ANEXO R. DIAGRAMA ELECTRÓNICO DE LA PLACA PRINCIPAL CONTROL.	178
ANEXO S. DIAGRAMA PCB DE LA PLACA PRINCIPAL CONTROL (COMPONENTES).....	179

ANEXO T. DIAGRAMA PCB DE LA PLACA PRINCIPAL CONTROL.....	180
ANEXO U. DIAGRAMA ELÉCTRICO DE POTENCIA.	181
ANEXO V. DIAGRAMA PCB DE LA POTENCIA (COMPONENTES).....	182
ANEXO W. DIAGRAMA PCB DE POTENCIA.....	183
ANEXO X. DIAGRAMA ELÉCTRICO DE LA CONEXIÓN DE MOTORES.	184
ANEXO Y. NIVEL DE INTENSIDAD DEL SONIDO.	185
ANEXO Z. NIVEL DE INTENSIDAD DEL VIENTO.	186
ANEXO AA. VISTAS DE LA SILLA DE RUEDAS.....	187
ANEXO BB. BASE BATERÍA.....	188
ANEXO CC. BASE SERVOMOTOR.	189
ANEXO DD. CÓDIGO DEL PROGRAMA.	190

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Imagen china de una silla de ruedas.	1
Figura 1.2. Silla de ruedas utilizada por el Rey Felipe II.	2
Figura 1.3. Primera silla de ruedas con auto-propulsión	2
Figura 1.4. Partes de una silla de ruedas.	4
Figura 1.5. Silla de ruedas con armazón rígido.	5
Figura 1.6. Silla de ruedas con armazón plegable.....	5
Figura 1.7. Rueda delantera de 200 mm de diámetro.	6
Figura 1.8. Tipos de composición de las ruedas traseras.	7
Figura 1.9. Aro con proyecciones.	8
Figura 1.10. Freno de zapata.	8
Figura 1.11. Freno de tijera.	9
Figura 1.12. Freno de tambor.	9
Figura 1.13. Reposabrazos desmontable y regulable en altura.....	10
Figura 1.14. Silla de ruedas manual.	11
Figura 1.15. Silla de ruedas manual para tránsito.	11
Figura 1.16. Silla de ruedas eléctrica.	12
Figura 1.17. Silla de ruedas Scooter.	13
Figura 1.18. Silla de ruedas para deportes.....	13
Figura 1.19. Silla de ruedas para pararse.	14
Figura 1.20. Silla de ruedas para subir escaleras.....	14
Figura 1.21. Silla de ruedas para la playa.	15
Figura 1.22. Silla de ruedas bariátrica.	15
Figura 1.23. Silla de ruedas pediátrica.	16
Figura 1.24. Sensor Ultrasónico.	18
Figura 1.25. Esquema de un sistema tradicional de emisión y recepción de ultrasonido.....	18
Figura 1.26. Eco ultrasónico típico.	21
Figura 1.27. Funcionamiento Sensor Infrarrojo.	21
Figura 1.28. Corriente del sensor infrarrojo.	22
Figura 1.29. Sensor infrarrojo activo.....	23

Figura 1.30. Sensor infrarrojo pasivo.....	23
Figura 1.31. Primer prototipo del instituto de IVRAE	24
Figura 1.32. Modelos de placa Arduino.	26
Figura 1.33. Esquema básico del Tratamiento Digital de Señales.	27
Figura 1.34. Muestreo de una señal analógica.....	29
Figura 1.35. Técnicas de cuantificación.	30
Figura 1.36. Estructura básica de motores Brushless.	32
Figura 1.37. Conexión estrella o triangulo.	33
Figura 1.38. Bobinado de un motor Brushless.....	33
Figura 1.39. Principio básico de funcionamiento de Efecto Hall.....	35
Figura 1.40. Efecto Hall.	35
Figura 1.41. Señales enviadas de los Sensores Hall en un motor brushless.	36
Figura 1.42. Respuesta de un sensor bipolar en media vuelta de rotación.	37
Figura 1.43. Salida del sensor Hall comparada con la fuerza contraelectromotriz para el motor BLDC trifásico.	38
Figura 1.44. Esquema en bloques de un controlador con conmutación trapezoidal.	40
Figura 1.45. Esquema en bloques de un controlador con conmutación sinusoidal.	41
Figura 1.46. Etapas fundamentales de un control BLDC.....	41
Figura 1.47. Esquema de conexión de un motor Brushless a un driver.	42
Figura 1.48. Representación esquemática de una batería de iones de litio. Con línea continua se indica la etapa de carga y con línea discontinua la etapa de descarga.....	45
Figura 1.49. Batería de litio.....	49
Figura 2.1. Modelo de la silla de ruedas elegida.	54
Figura 2.2. Funcionamiento del sensor Ultrasónico.....	55
Figura 2.3. Sensor Infrarrojo E18-D80NK.....	56
Figura 2.4. Diagrama de funcionamiento del sensor infrarrojo.	57
Figura 2.5. Arduino Mega 2560.	58
Figura 2.6. Módulo EasyVR.....	61
Figura 2.7. Conexión modo puente.	62
Figura 2.8. Conexión modo adaptador.	63

Figura 2.9. Motor Brushless acoplado a la llanta de la silla de ruedas.	64
Figura 2.10. Motor Brushless desmontado.	65
Figura 2.11. Piñones montados en el rodamiento.	65
Figura 2.12. Circuito controlador de giro.	66
Figura 2.13. Cambio de giro del motor Brushless.	67
Figura 2.14. Distribución de pines del integrado MC33035.	68
Figura 2.15. Conexión del Driver MC33035 con los transistores MOSFET	69
Figura 2.16. Freno de llanta de accionamiento lateral.	69
Figura 2.17. Servo motor con polea.	70
Figura 2.18. Características de las baterías seleccionadas.	72
Figura 3.1. Diagrama de bloques del programa en general.	73
Figura 3.2. Flujograma de sensores infrarrojos.	74
Figura 3.3. Flujograma de los sensores ultrasónicos.	75
Figura 3.4. Flujograma de la subrutina Grupo 0 del módulo de reconocimiento de VOZ.	76
Figura 3.5. Flujograma de la subrutina Grupo1 del módulo de reconocimiento de VOZ.	77
Figura 3.6. Flujograma de la subrutina Grupo2 del módulo de reconocimiento de VOZ.	78
Figura 3.7. Flujograma de la subrutina adelante.	79
Figura 3.8. Flujograma de la subrutina izquierda.	79
Figura 3.9. Flujograma de la subrutina derecha.	80
Figura 3.10. Flujograma de la subrutina atrás.	80
Figura 3.11. Flujograma de la subrutina paro.	81
Figura 3.12. Flujograma de la subrutina Grupo3 del módulo de reconocimiento de VOZ.	82
Figura 3.13. Flujograma de la subrutina Grupo4 del módulo de reconocimiento de VOZ.	83
Figura 3.14. Flujograma de la subrutina Chicha (Chicharra).	84
Figura 3.15. Conexión del módulo EasyVR con el Software EasyVR Commander.	85
Figura 3.16. Inserción de comandos de voz.	86
Figura 3.17. Comandos añadidos en cada grupo.	87

Figura 3.18. Entrenamiento de comando de voz.	88
Figura 3.19. Verificación del correcto entrenamiento de los comandos de voz. ...	88
Figura 3.20. Testeado de los comandos de voz.	89
Figura 3.21. Error en el reconocimiento de voz.	89
Figura 3.22. Edición del archivo de audio.	90
Figura 3.23. Creación de un nuevo proyecto en el software Sensory QuickSynthesis5.	90
Figura 3.24. Añadir archivos .WAV.	91
Figura 3.25. Compresión de archivos . WAV.	91
Figura 3.26. Construcción de tabla de sonidos para el EasyVR.	92
Figura 3.27. Subir tabla de sonidos al módulo de reconocimiento de voz.	92
Figura 3.28. Subir tabla de sonidos al módulo de reconocimiento de voz.	93
Figura 3.29. Actualización de la tabla de sonidos.	93
Figura 3.30. Flujograma de la subrutina del servomotor.	94
Figura 4.1. Sección transversal de MB.	96
Figura 4.2. Devanados del estator del MB.	97
Figura 4.3. Componentes F_{aq} y F_{ad} de la fuerza F_a	99
Figura 4.4. Circuito equivalente de la fase a	104
Figura 4.5. Circuito equivalente monofásico del MB en el dominio de la frecuencia.	105
Figura 4.6. Diagrama fasorial del MB.	106
Figura 4.7. Representación de la parte eléctrica y mecánica del MB.	107
Figura 4.8. Diagrama de flujo de potencia.	108
Figura 4.9. Curva de potencia del MB.	110
Figura 4.10. Medición de la resistencia en bobinas estáticas.	111
Figura 4.11. Circuito eléctrico para la fase a de MB.	114
Figura 4.12. Diagrama fasorial.	114
Figura 4.13. Dimensiones del disco de imanes del sensor efecto hall.	115
Figura 4.14. Gráfica voltaje-velocidad.	117
Figura 4.15. Dimensiones de la silla.	118
Figura 4.16. Relación de transferencia de velocidad.	120
Figura 4.17. Curva corriente-tiempo.	121
Figura 4.18. Relé de estado sólido.	122

Figura 4.19. Tabla de grosores AWG.	122
Figura 4.20. Respuesta del fusible clase T.	123
Figura 4.21. Distribución de sensores.	124
Figura 5.1. Sensores infrarrojos delanteros.	127
Figura 5.2. Sensores infrarrojos traseros.	127
Figura 5.3. Trinche sujetador del eje del motor.	128
Figura 5.4. Sensor de paro de emergencia del sistema.	128

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Tipos de sillas de ruedas eléctricas y sus características.....	12
Tabla 1.2. Métodos para detectar la fuerza contraelectromotriz.	39
Tabla 1.3. Comparación entre motores DC convencionales y motores DC Brushless.....	43
Tabla 2.1. Características silla de ruedas Century Medical.	54
Tabla 2.2. Características del sensor ultrasónico.	55
Tabla 2.3. Características Sensor Infrarrojo.....	56
Tabla 2.4. Características Arduino Mega 2560.	59
Tabla 4.1. Datos del motor Brushless.	111
Tabla 4.2. Datos del MB de la tesis “Control de un Motor Brushless para aplicación a vehículos eléctricos”.....	112
Tabla 4.3. Datos del MB sin carga.	115
Tabla 4.4. Pesos que intervienen en el sistema.....	118
Tabla 4.5. Datos del MB con carga.....	119
Tabla 4.6. Velocidad de arranque y velocidad de estabilidad.	120
Tabla 4.7. Tabla de velocidades en función del diámetro 2.	121
Tabla 4.8. Descripción de sensores.....	125
Tabla 5.1. Prueba de funcionamiento N° 1.	130
Tabla 5.2. Prueba de funcionamiento N° 2.	131
Tabla 5.3. Prueba de funcionamiento N° 3.	131
Tabla 5.4. Prueba de funcionamiento N° 4.	132
Tabla 5.5. Prueba de funcionamiento N° 5.	132
Tabla 5.6. Prueba de funcionamiento N° 6.	133
Tabla 5.7. Autonomía de la batería.....	134
Tabla 5.8. Distancia de reacción de sensores.	134

RESUMEN

Existen discapacidades motoras que limitan el desplazamiento de las personas que las poseen, este es el caso de la cuadriplejía, que impide cualquier movimiento de las extremidades tanto inferiores como superiores y por ende la manipulación y control clásico de dispositivos como la silla de ruedas, relegando a la persona a una dependencia total para la realización de los más simples procesos de desplazamiento y a un decaimiento emocional por la incapacidad sostenida, problema que a la vez afecta también a todos sus familiares.

En el Ecuador, actualmente, existen sillas de ruedas comandadas por botones o joysticks que ayudan a ciertos discapacitados, pero estas no brindan una solución total para las personas cuadripléjicas ya que el único movimiento posible para ellas es el de la cabeza por tanto no pueden comandar este tipo de sillas y siguen dependiendo de otra persona para moverse.

Este proyecto consiste en la implementación de un sistema de control por comandos de voz para una silla de ruedas convencional con sensores de proximidad que paralizarán totalmente la silla ante la presencia cercana de algún obstáculo, permitiendo de esta manera al beneficiario, desplazarse con autonomía y comodidad en una superficie plana con 360 grados de giro de libertad; comandarla será bastante fácil y no requerirá de ningún esfuerzo físico ni de la asistencia de otra persona; permitiéndole al discapacitado moverse a donde él necesite.

Este implemento será de gran ayuda para las personas cuadripléjicas y también parapléjicas, ancianos, niños con pci (parálisis cerebral infantil), etc., brindándoles a todos ellos mucha mayor facilidad y comodidad, aportando de esta manera también a todas las personas que los rodean.

ABSTRACT

Motor disabilities which limits people's movement with disabilities exist, this is quadriplegias case, preventing the movement of the lower as much as the higher limbs and with the classic handling and control devices such as wheelchairs, relegating total dependency of the person through the execution of the simplest displacement and emotional decay processes by the sustained disability issue which also affects all family members.

Wheelchair controlled by buttons or joysticks which helps some disabled people currently exists in Ecuador, but these things do not provide a total solution for Tetraplegia because the only possible movement they have is the head through which it is impossible to control these seats thus depending on someone else to move them around

This project involves the implementation of a voice system control command for a conventional wheelchair with proximity sensors which will get completely paralyzed in front of an obstacle, allowing the beneficiary to move with comfort and autonomy on a 360 degrees flat surface with a freedom of rotation; it will be quite easy to control it, and it does not require any physical effort or someone else's assistance; It allows disabled people to move anywhere they want.

This improvement will be helpful for the paraplegic and quadriplegic people, the elderly, and children with CP (cerebral palsy), etc., providing all of them a greater ease and comfort, also contributing to all the people around them.

PRESENTACIÓN

Con la realización de este sistema, se pretende contribuir sustancialmente a la sociedad, en especial, a las personas limitadas de capacidades motoras, logrando hacerlas sentir incluidas en un ambiente más equitativo y amable.

A continuación una ligera descripción de los capítulos que constituyen este proyecto:

En el primer capítulo, se expone los fundamentos teóricos que sustentan la investigación.

En el segundo capítulo, se analiza los requerimientos del sistema, y se brinda una breve explicación del porqué fueron elegidos cada componente en relación a sus competentes en el mercado, diseñando de esta manera la parte física.

En el tercer capítulo, se encuentra el desarrollo del software, es decir, una explicación de la lógica de programación y funcionamiento.

En el cuarto capítulo, se muestra el análisis matemático y cálculos correspondientes al desempeño del sistema, además, se presenta el comportamiento de la planta de funcionamiento del mismo.

En el quinto capítulo se presenta el sistema final, sus pruebas, mejoramiento y confiabilidad del dispositivo.

CAPÍTULO 1

1. MARCO TEÓRICO

1.1. DEFINICIÓN DE SILLA DE RUEDAS

Una silla de ruedas es una ayuda técnica que consiste en una silla adaptada con al menos tres ruedas, aunque lo normal es que disponga de cuatro. Estas sillas están diseñadas para permitir el desplazamiento y movilidad de aquellas personas con problemas de locomoción, debido a una lesión, enfermedad física (paraplejía, tetraplejía, etc.) o que presentan problemas psicológicos. (Barrera y Maldonado, 2013, p. 17)

1.1.1. ANTECEDENTES

Algunos historiadores han sugerido que como la evidencia más antigua de una silla de ruedas data de alrededor de 4000 años a.C., lo más probable es que la necesidad por adquirir un medio de traslación para personas con distintos traumas y enfermedades llevaron a que este artefacto sea desarrollado hace mucho tiempo atrás.

Sin embargo, la primera prueba clara de su existencia, proviene de una imagen china grabada en 525 d.C.



Figura 1.1. Imagen china de una silla de ruedas.

Fuente: García y Sánchez, (2007).

Se vuelve a documentar un indicio de silla de ruedas en el año 1595, donde un artista dibujó un borrador del Rey Felipe II de España (1527 - 1598), sentado en una silla que tenía pequeñas ruedas montadas al final de cada pata. Los rasgos de la silla incluían una plataforma levantada para las piernas del Rey y un respaldo ajustable. Dicha silla no era auto-propulsada; él dependía de un cortesano o un sirviente para empujarla.



Figura 1.2. Silla de ruedas utilizada por el Rey Felipe II.

Fuente: García y Sánchez, (2007).

La primera instancia documentada de una persona discapacitada con movilidad independiente fue en 1655 cuando Stephen Farfler, un relojero parapléjico, construyó una silla que parecía robusta sobre un chasis de tres ruedas. Sujetas a cada lado de la rueda frontal única había manivelas que Stephen giraba para impulsarse hacia adelante (García y Sánchez, 2007, p. 5).



Figura 1.3. Primera silla de ruedas con auto-propulsión

Fuente: García y Sánchez, (2007).

El siguiente desarrollo fue una silla inventada en 1783 por John Dawson, que trabajaba en Bath, Inglaterra, a donde muchas personas con capacidades diferentes viajaban para beber y bañarse en las aguas del balneario. Esta silla fue un gran suceso debido a que en su tercera rueda contaba con una manivela rígida con la que el ocupante podía dirigir su destino.

A este avance le siguieron un sin número de versiones, en su totalidad hechas de madera, abiertas, con capuchas y frentes de vidrio, pero todas debían ser empujadas desde atrás o tiradas por un pequeño caballo o burro.

La primera patente sobre una silla de ruedas data de 1869, el Dr. Sawatzky supone avances en las sillas de ruedas a partir del desarrollo de las bicicletas. Para 1867 se cambian las ruedas de madera por la de hierro y para 1875 se usan llantas de hule.

Durante el siglo XIX, se volvieron menos voluminosas y más confortables, consecuencia de esto, los usuarios ya fueron capaces de girar las grandes ruedas traseras con sus manos, posteriormente, en 1881 se le agregó un segundo borde con una menor circunferencia a cada rueda con la finalidad de mantener las manos limpias.

Entre los años de 1915 y 1924 fue desarrollado el primer modelo eléctrico por el ingeniero George J. Klein, el cual no tuvo mayor acogida debido al ruido que causaba y a su elevado costo, a pesar de este avance, las sillas aún eran rígidas y difíciles de guardar.

En 1932, Harry Jennings ingeniero proveniente de Los Ángeles diseñó y construyó una silla plegable para su amigo, Herbert Everest. Al ver la gran acogida que tuvo, establecieron una compañía para producir en grandes cantidades estas sillas de ruedas portátiles, convirtiéndose así, en los precursores de las sillas de ruedas tal y como ahora las conocemos.

A principios del siglo XX, las sillas de ruedas fueron mejorando notablemente, disponían de ruedas con rayos de alambre, respaldos ajustables y apoyos móviles para brazos y pies.

Las primeras sillas motorizadas accionaban un rotor que tenía una cinta enrollada a su alrededor, esta transmitía la energía a las ruedas. Hoy en día, utilizan una transmisión directa, es decir el motor acciona engranes los cuales mueven las ruedas.

1.1.2. ESTRUCTURA

En la siguiente figura se muestra los componentes más relevantes de una silla de ruedas común en el mercado.

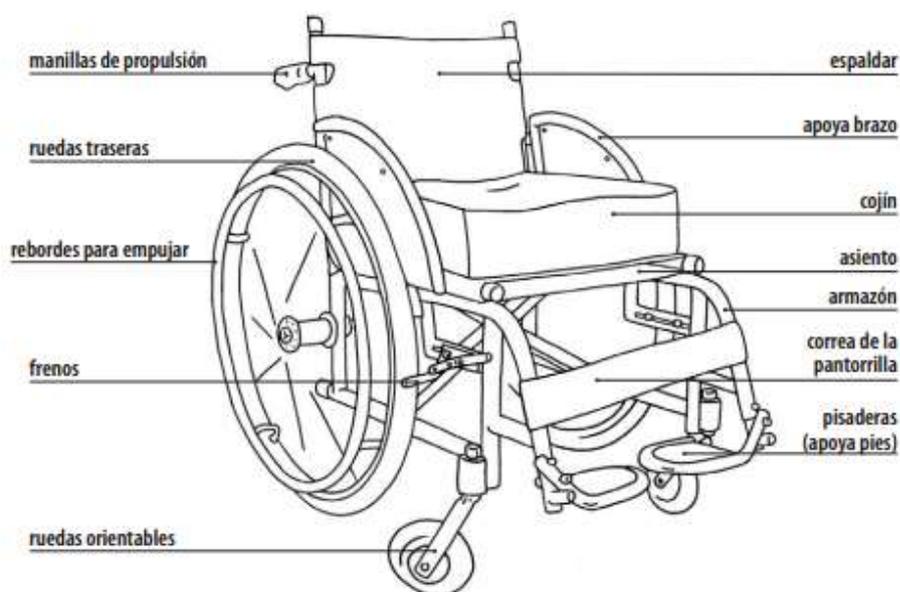


Figura 1.4. Partes de una silla de ruedas.

Fuente: Armstrong, Borg, Krizack, Lindsley, Mines, Pearlman, Reisinger y Sheldon, (2008).

1.1.2.1. Chasis

El chasis o armazón de una silla de ruedas es una de las partes de mayor importancia ya que es el que soporta todo el peso; suelen estar construidos con elementos ligeros y resistentes como el aluminio, acero reforzado o titanio al carbono, pueden ser rígidos o plegables.



Figura 1.5. Silla de ruedas con armazón rígido.

Fuente: Barrera y Maldonado, (2013).

El aprovechamiento de la energía que el usuario aplica para propulsarse es del doble en una silla con armazón rígido (15-20%), que en una plegable (5-8%), debido a los puntos de articulación que posee un chasis plegable.



Figura 1.6. Silla de ruedas con armazón plegable.

Fuente: Barrera y Maldonado, (2013).

1.1.2.2. Ruedas delanteras

Existen de diferentes tamaños y materiales, pueden ser inflables o macizas, en cuanto al tamaño van desde los 75 mm hasta los 200 mm de diámetro dependiendo de las necesidades.



Figura 1.7. Rueda delantera de 200 mm de diámetro.

Fuente: Barrera y Maldonado, (2013).

Mientras más pequeñas sean las ruedas delanteras, estas tendrán menor rozamiento y mayor facilidad de giro, siendo adecuados para interiores; mientras que las ruedas grandes son más recomendables para exteriores y suelos accidentados, debido a que no se enclavan en el terreno y pueden sortear los obstáculos.

1.1.2.3. Ruedas traseras

Sobre ellas es necesario tener en cuenta los siguientes puntos:

1.1.2.3.1. Tamaño

Existen de 26" (650 mm), 24" (600 mm), 22" (550 mm) y 20" (500 mm). Siendo las más utilizadas las de 24"; las de 22" y 20" se emplean en sillas de ruedas infantiles, para personas con limitación de movimiento en los hombros y personas hemipléjicas, y las de 26" en personas muy altas o para deportes.

Entre más pequeña la rueda, requiere de menos esfuerzo para propulsarla pero a su vez, de un mayor número de impulsos y viceversa.

1.1.2.3.2. Composición

- **Macizas.-** brindan menor resistencia al rodar y no requieren mantenimiento, como desventajas podemos citar que son más pesadas, no amortiguan los desniveles del terreno y no brindan agarre en superficies mojadas.

- **Inserto sólido.-** son las intermedias entre las macizas y neumáticas, compuestas de una cubierta normal con un macizo insertado en su interior.
- **Neumáticas.-** son ligeras, presentan mayor agarre en superficies mojadas, y tienen un alto nivel de amortiguamiento frente a los desniveles del terreno. Como negativo se puede citar que requieren más fuerza para ser propulsadas y mantenimiento continuo.
- **Tubulares.-** bastante livianas y con mínima resistencia al rodar, teniendo como puntos en contra su poca resistencia a los pinchazos y un elevado mantenimiento.



Figura 1.8. Tipos de composición de las ruedas traseras.

Fuente: Barrera y Maldonado, (2013).

1.1.2.3.3. Aros de empuje

Pueden ser de aluminio, acero, titanio o recubiertos de plástico. Los de acero presentan mayor peso pero a su vez mayor agarre, mientras que los de titanio son bastante ligeros.

Existen también aros con proyecciones para facilitar el impulso por parte de personas con poca movilidad en las manos, así también tenemos aros con formas ergonómicas y partes recubiertas por otros materiales para mejorar sus bondades.



Figura 1.9. Aro con proyecciones.

Fuente: Barrera y Maldonado, (2013).

1.1.2.4. Frenos

1.1.2.4.1. Freno de zapata

Son los más comunes, de montaje alto, es decir, van anclados al tubo que queda por debajo del asiento, y pueden ser de dos tipos, según se accionen, empujando hacia delante o tirando hacia atrás.



Figura 1.10. Freno de zapata.

Fuente: Cortez y Maya, (2008).

1.1.2.4.2. Freno de tijera

Pueden ser de montaje alto o montaje bajo, según se anclen en el tubo superior o inferior del armazón. Suelen utilizarse en sillas bastante ligeras y deportivas.



Figura 1.11. Freno de tijera.

Fuente: Cortez y Maya, (2008).

1.1.2.4.3. Freno de una mano

Estos sirven para adaptar a sillas utilizadas por personas hemipléjicas que solo se propulsan con una mano. Este freno tiene la particularidad de que con uno solo se frenan las dos ruedas.

1.1.2.4.4. Freno de tambor

Son frenos que para ser activados requieren de presionar un par de manetas, similar a un freno de bicicleta, es por esta razón que estos frenos no son adecuados para el usuario sino para la persona que impulsa la silla.



Figura 1.12. Freno de tambor.

Fuente: Cortez y Maya, (2008).

1.1.2.5. Reposabrazos

Estos pueden ser de varios tipos, fijos, desmontables, regulables, tipo escritorio, tubulares, etc. En estos accesorios se refleja el grado de ergonomía de una silla de ruedas.



Figura 1.13. Reposa brazos desmontable y regulable en altura.

Fuente: Barrera y Maldonado, (2013).

1.1.2.6. Reposa pies

Pueden ser fijos, desmontables o elevables, estos últimos utilizados especialmente para adoptar posturas mucho más cómodas.

La posición anatómica ideal de los reposapiés es a 90°, sin embargo los ángulos más frecuentes son 80°, 70° y 60°.

1.1.2.7. Asientos y respaldos

Existen de varios tipos y se ajustan a distintas necesidades, algunos de ellos son de espuma, gel, celdas de aire, etc. Van fijados al chasis de la silla de ruedas y son bastante fuertes pero a su vez permitan el plegado de la silla.

1.1.2.8. Motores

Mayormente las sillas de ruedas eléctricas cuentan con dos motores, uno acoplado a cada llanta, el mismo que sirve para variar la velocidad y dirección.

1.1.2.9. Baterías

Las sillas eléctricas estándar llevan incorporadas dos baterías de plomo de tipo GEL o AGM.

1.1.3. TIPOS DE SILLAS DE RUEDAS

1.1.3.1. Silla de ruedas manual

Son aquellas movidas por el usuario o un ayudante. Generalmente cuentan con ruedas traseras de entre 20" y 26" de diámetro fijadas a un eje. Pueden avanzar a velocidad ilimitada, esto depende de la fuerza de la persona que la propulsa.



Figura 1.14. Silla de ruedas manual.

Fuente: Barrera y Maldonado, (2013).

1.1.3.2. Silla manual para tránsito

Estas sillas únicamente pueden generar movimiento con la ayuda de otra persona, pues cuenta con ruedas traseras pequeñas sin borde para empujar. Generalmente existen en los aeropuertos y edificios.



Figura 1.15. Silla de ruedas manual para tránsito.

Fuente: Barrera y Maldonado, (2013).

1.1.3.3. Silla de ruedas eléctrica

La silla de ruedas eléctrica cuenta con un motor eléctrico que la impulsa facilitando así el movimiento de la misma. Todos estos dispositivos son basados en uso de microcontroladores o microprocesadores que permiten el óptimo desempeño de dicha silla, dotándole así de confiabilidad y autonomía. Existen diferentes opciones para manejar la dirección y velocidad, todo esto depende de las necesidades del usuario.



Figura 1.16. Silla de ruedas eléctrica.

Fuente: Cortez y Maya, (2008).

Existen varios tipos de estas sillas eléctricas, alguno de ellos a continuación:

Tabla 1.1. Tipos de sillas de ruedas eléctricas y sus características.

Modelo	Velocidad máx. (km/h)	Autonomía (Km)	Capacidad (Kg)	Usuario
Pronto M41	8	28	138	Adultos/Niños
Pronto M51	6	20	138	Adultos/Niños
TDX5	12		184	Adultos/Niños
Tatoo	7.5		92	Adultos/Niños
Kariboo	6		75	Adultos/Niños
Bijoo	7		102	Adultos/Niños
Speedoo	10		90	Adultos/Niños

Fuente: Cortez y Maya (2008)

1.1.3.4. Silla tipo Scooter

También llamadas Wheelbase tienen cuatro pequeñas ruedas que se extienden desde una plataforma baja, permiten mayor maniobrabilidad por parte del usuario, pero su mayor desventaja es que el mismo, debe mantener una postura rígida al utilizarla.



Figura 1.17. Silla de ruedas Scooter.

Fuente: Barrera y Maldonado, (2013).

1.1.3.5. Silla para deportes

Estas sillas han permitido que las personas discapacitadas sean integradas aún más a la sociedad, permitiéndoles practicar distintos deportes. Generalmente cuentan con marcos livianos y su particularidad es que cuentan con ruedas de ángulo que les permite realizar giros bruscos y les dota de mayor estabilidad.



Figura 1.18. Silla de ruedas para deportes.

Fuente: Barrera y Maldonado, (2013).

1.1.3.6. Silla de ruedas para pararse

Cuentan con una bomba hidráulica la cual permite levantar y girar el asiento, dándole al usuario la posibilidad de mantenerse en pie pero a la vez sentirse estable y seguro.



Figura 1.19. Silla de ruedas para pararse.

Fuente: Barrera y Maldonado, (2013).

1.1.3.7. Silla de ruedas que suben escaleras

Esta silla cuenta con varios elementos estabilizadores, ruedas flexibles con superficie de goma adherente, plataformas móviles para distintos accesos entre otros. Es de gran beneficio para las personas discapacitadas, pues permite mayor accesibilidad a distintos lugares.



Figura 1.20. Silla de ruedas para subir escaleras.

Fuente: Barrera y Maldonado, (2013).

1.1.3.8. Silla de ruedas para la playa

Su mayor fortaleza es que cuenta con ruedas bastante anchas que le permiten andar en la arena sin hundirse.



Figura 1.21. Silla de ruedas para la playa.

Fuente: Barrera y Maldonado, (2013).

1.1.3.9. Silla de ruedas bariátricas

Estas sillas difieren de las demás porque soportan mayor peso, normalmente una silla de ruedas resiste 250 libras, pero una bariátrica, gracias a sus distintas adaptaciones y materiales, soporta hasta 1000 libras.



Figura 1.22. Silla de ruedas bariátrica.

Fuente: Barrera y Maldonado, (2013).

1.1.3.10. Silla de ruedas pediátrica

Están diseñadas para brindar mayor comodidad y ergonomía a los niños discapacitados, cuentan con asientos ajustables, reclinables y son más pequeñas que las habituales.



Figura 1.23. Silla de ruedas pediátrica.

Fuente: Barrera y Maldonado, (2013).

1.1.4. CONSIDERACIONES GENERALES EN EL DISEÑO DE SILLAS DE RUEDAS

Las sillas de ruedas deben tener un diseño enfocado a permitir que sus usuarios realicen el mayor número posible de actividades. Como requisito mínimo, la silla de ruedas debe asegurar que el usuario lleve una vida más activa sin causar un efecto negativo en su salud y en su seguridad. Se debe tener en cuenta que estos dos parámetros nombrados son dos factores importantes que afectan la calidad de vida de los usuarios permanentes (Armstrong et al., 2008).

1.1.4.1. Comodidad y seguridad del usuario

No se debe comprometer este parámetro con el fin de reducir costos; no es beneficiosa una silla de ruedas, si esta causa lesiones y otros riesgos para la salud, deben estar diseñadas para asegurar la calidad de vida del usuario.

Hay muchas situaciones en las que una silla ayuda a contribuir mayores riesgos para el usuario:

- Una silla de ruedas sin cojín o provista de un cojín inadecuado puede causar escaras de presión. Este hecho, a su vez, puede exigir que el usuario permanezca muchos meses en cama.
- Las sillas de ruedas inestables pueden volcarse y los usuarios pueden caerse y lesionarse.

- Las sillas de ruedas demasiado anchas o excesivamente pesadas pueden causar lesiones de los hombros.
- Los bordes filudos de las superficies pueden causar cortes que a su vez pueden conducir a infecciones.
- Un diseño deficiente puede determinar que haya puntos en la silla de ruedas donde el usuario u otras personas puedan pellizcarse los dedos o la piel.
- Las sillas de ruedas que no resisten el uso diario en el entorno del usuario pueden fallar prematuramente y lesionar al usuario. (Armstrong et al., 2008, p. 44)

1.1.4.2. Resistencias y durabilidad

Una silla de ruedas debe tener la resistencia suficiente para no sufrir una falla súbita mientras esté en uso. La silla de ruedas se debe construir de manera que tenga la vida más larga posible y que necesite el menor número de reparaciones. Se debe diseñar la silla de ruedas de manera que si falla se la pueda reparar cerca del hogar del usuario y debe ser fácil obtener piezas de repuesto.

1.1.4.3. Aptitud para el uso

Las sillas de ruedas deben ser apropiadas para el entorno en el que se las usará y para las personas que las usarán. Un modelo de silla de ruedas no servirá para todos. Al diseñar o escoger sillas de ruedas, es preciso pensar en el entorno y la forma en que se puede usar la silla de ruedas¹.

1.2.SENSORES ULTRASÓNICOS

Los ultrasonidos son ondas sonoras o acústicas cuyas frecuencias están por encima del límite de audición del oído humano, que se puede establecer en 20 kHz. Este aumento de su frecuencia se refleja en un incremento de su

¹ Ver anexo C (tabla comparativa de costos de sillas de ruedas en Ecuador).

sensibilidad para detectar defectos. (Gosálbez, Salazar, Miralles, Bosch y Vergara, 2009, p. 1)

Los sensores de ultrasonidos son detectores de proximidad que trabajan libres de roces mecánicos y que detectan objetos a distancias de hasta 8m. Estos sensores trabajan solamente en el aire, y pueden detectar objetos con diferentes formas, colores, superficies y de diferentes materiales. Los materiales pueden ser sólidos, líquidos o polvorientos, sin embargo han de ser deflectores de sonido. (Gosálbez et al., 2009, p. 2)



Figura 1.24. Sensor Ultrasónico.

Fuente: BOTScience, (s.f).

1.2.1. COMPONENTES

Un sistema de medición tradicional consta de los siguientes elementos: uno o más transductores que cumplen funciones de emisión y recepción de las ondas ultrasónicas; una etapa que amplifica y filtra la señal del receptor; un circuito detector de nivel basado en un comparador de tensión; una etapa que amplifica la señal de disparo y excita al transmisor; y por último una lógica de control y medición que se encarga de generar la señal de disparo y de procesar la información de tiempo de vuelo. (Abreu, 1990)

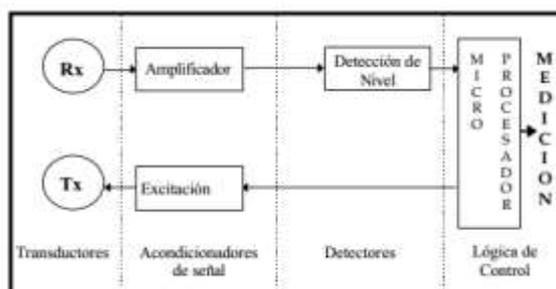


Figura 1.25. Esquema de un sistema tradicional de emisión y recepción de ultrasonido.

Fuente: Ferdeghini, Brengi y Lupi, (s.f).

1.2.2. CONFIGURACIONES

Existen dos configuraciones básicas en ultrasonidos, la configuración Transmisión-Recepción (TR), la cual utiliza dos sensores ultrasónicos, uno para transmitir y otro para recibir y que normalmente se encuentran enfrentados; y la configuración Pulso-Eco (PE) la cual emplea un único sensor que actúa como emisor y receptor, donde se transmite el pulso el cual penetra en el material propagándose a través del mismo, hasta que un cambio de impedancia acústica provoca su reflexión total o parcial y es detectado por el mismo sensor. (Gosálbez et al., 2009, p. 2)

1.2.3. TÉCNICAS DE MEDICIÓN DE DISTANCIAS

Hay diferentes modos de generar y recibir ondas ultrasónicas para aplicaciones de medición de distancias. Comúnmente se pueden emplear ondas continuas o también ondas en forma de pulso.

“Los métodos de onda continua esencialmente son dos: los basados en la medición de la diferencia de fase entre la señal transmitida y la señal recibida de una onda modulada en amplitud” (Hua, Wang y Yan, 2002, p. 362), y “los basados en la medición de la diferencia de frecuencia entre la señal transmitida y la señal recibida de una onda modulada en frecuencia” (Kao y Probert, 2000).

Sin embargo, la gran mayoría de las aplicaciones de medición de distancia mediante ultrasonidos se basa en la estimación del tiempo que transcurre entre la emisión de un corto tren de pulsos de ondas ultrasónicas, y su recepción después de haber sido reflejado por algún objeto del entorno. Este período de tiempo se conoce comúnmente como tiempo de vuelo o ToF (Time of Fly). (Marioli, Narduzzi, Offeli, Petri, Sardini y Taroni, 1992, p. 93)

1.2.3.1. Sistema basado en el tiempo de vuelo

En este tipo de sistemas el sensor genera un pulso ultrasónico el cual se transmite a través del medio (típicamente aire) hasta que es reflejado por alguna superficie reflectora. Midiendo el tiempo entre la transmisión y la recepción del eco, la distancia al reflector puede ser estimada indirectamente mediante la siguiente fórmula:

$$d = \frac{1}{2} v * tf \quad \text{Ecuación 1.1}$$

Donde,

v , representa la velocidad del sonido en el medio de transmisión y, tf , el tiempo de vuelo.

La velocidad del sonido en el aire muestra una dependencia casi lineal con la temperatura, por lo cual puede ser fácilmente determinada, y si es necesario compensada. (Sabatini, 1995, p. 869)

Entonces el punto crítico en la medición de distancias mediante esta técnica es la determinación del tiempo de vuelo.

La forma más común de determinar el tiempo de vuelo es mediante el método del umbral, en el cual el tiempo de llegada es calculado cuando el eco recibido traspasa por primera vez un cierto nivel de amplitud dado. Aunque este método ha probado ser simple y de bajo costo, la técnica presenta baja resolución. Una solución a este problema es la adopción de un umbral de amplitud ajustable en el tiempo. En este caso el umbral de amplitud va decreciendo a medida que el tiempo de vuelo es mayor, lo que está directamente relacionado con la distancia que viaja la señal y en consecuencia con la atenuación de la misma. Sin embargo, existen otras causas de variación de la amplitud de la señal, como por ejemplo el tamaño y la orientación del reflector, que no pueden ser fácilmente modeladas y que hacen que el método no sea fiable. (Navarro, Ríos y Parra, 2004, p. 36)

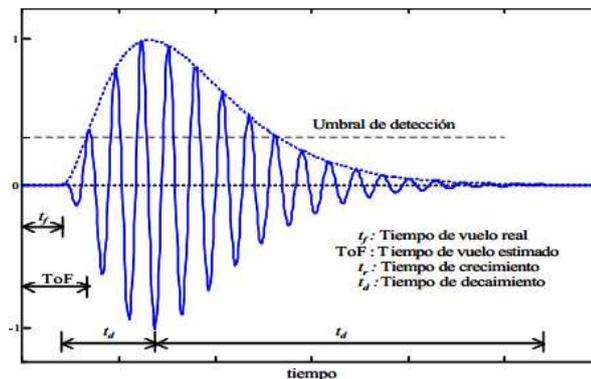


Figura 1.26. Eco ultrasónico típico.

Fuente: Navarro, Ríos y Parra, (2004).

1.3. SENSORES INFRARROJOS

El sensor infrarrojo es un dispositivo electrónico capaz de medir la radiación electromagnética infrarroja de los cuerpos en su campo de visión. Todos los cuerpos reflejan una cierta cantidad de radiación, esta resulta invisible para nuestros ojos pero no para estos dispositivos electrónicos, ya que se encuentran en el rango del espectro justo por debajo de la luz visible. (Ulloa y Rodriguez, 2012, p. 28)

Estos sensores utilizan como principio de funcionamiento el de emitir una señal infrarroja hacia el frente esperando que ésta rebote en algún cuerpo y sea percibida por el receptor o, a su vez esta señal sea interferida por algún cuerpo en el caso de tener en transmisor y receptor frente a frente dando entonces una señal de presencia de objeto. (Arévalo y Pino, s.f, p. 3)

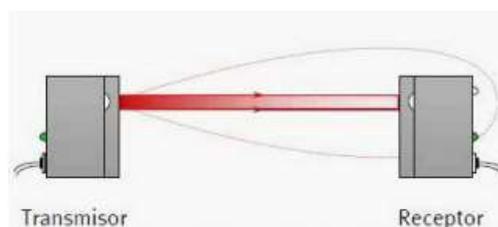


Figura 1.27. Funcionamiento Sensor Infrarrojo.

Fuente: Gonzáles y Martell, (2010).

El funcionamiento del circuito se basa en emitir a través del diodo una ráfaga de señales luminosas infrarrojas las cuales al rebotar contra un objeto cercano se reciben por el fototransistor. Al ser recibidas el sistema detecta proximidad y envía un nivel lógico. (Vargas, Perlaza y Delgado, s.f, p. 2)

1.3.1. COMPONENTES

El sistema de detección típico está formado por un transmisor de luz, una etapa de control, un receptor de luz y un circuito de salida. Por lo general el transmisor está conectado a una etapa de control que decide la activación de la transmisión e inclusive puede generar pulsos de frecuencia constante que hacen la detección del sensor más robusta (Vargas et al., s.f).

En sensores digitales, para la calibración de la distancia posee un potenciómetro que aumenta o disminuye la corriente en dicho diodo, haciéndolo más o menos sensible al sensor. (Arévalo y Pino, s.f, p. 3)

$$I_{d_1} = \frac{V_{cc}}{R} = \frac{5[V]}{100[\Omega]} = 50mA \Rightarrow \text{Mayor Distancia (10 cm)}$$

$$I_{d_2} = \frac{V_{cc}}{R} = \frac{5[V]}{280[\Omega]} = 1783mA \Rightarrow \text{Menor Distancia (3 cm)}$$

Figura 1.28. Corriente del sensor infrarrojo.

Fuente: Arévalo y Pino, (s.f).

1.3.2. CLASIFICACIÓN

- **Activo:** incluye una fuente de radiación y un sensor infrarrojo que es sensible a la variación de radiación sensada. Se activa cuando el intruso interrumpe el camino de luz infrarroja por lo que hay que colocar el sistema en el lugar adecuado.

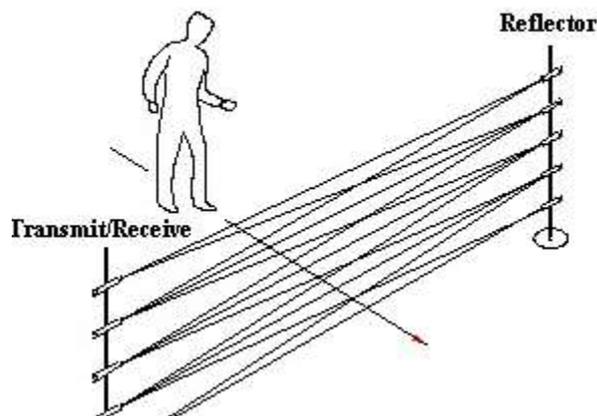


Figura 1.29. Sensor infrarrojo activo.

Fuente: Services Group, (s.f).

- **Pasivo:** Es un sistema que detecta la energía calorífica emitida por un objeto o cuerpo que se mueve a través del campo de vista del sensor. Generalmente usan una colección de sistemas ópticos y múltiples elementos de sensado de polaridad alternante para crear un patrón de detección en el ambiente de interés.

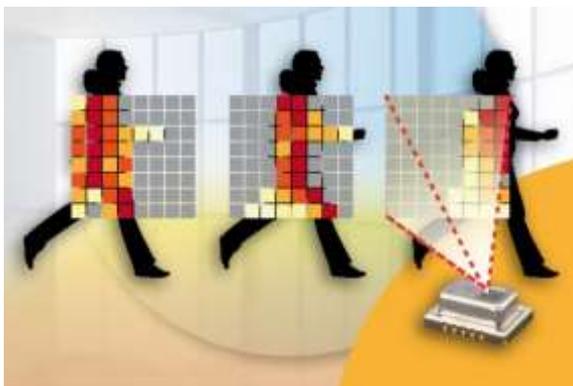


Figura 1.30. Sensor infrarrojo pasivo.

Fuente: Digital Magazine, (s.f).

El único inconveniente de este tipo de tecnología es el alcance, limitado a la estancia donde se encuentran o con visión directa. (Zeballos, 2011, p. 15)

1.4. PLATAFORMA ARDUINO

Arduino es un microcontrolador de una placa diseñada para hacer que el proceso de utilización de la electrónica en proyectos multidisciplinarios sea más accesible.

El hardware consiste en una placa de código abierto simple diseñado en torno a un microcontrolador de 8-bit Atmel AVR, a través de un nuevo modelo ha sido diseñado en torno a un Atmel ARM de 32 bits.

El software consiste en un compilador de lenguaje de programación estándar y un gestor de arranque que se ejecuta en el microcontrolador.

Hasta la actualidad, se han vendido 250 mil placas en todo el mundo, sin contar con versiones clones.

1.4.1. ANTECEDENTES

Arduino fue desarrollado en el año 2005 por el Docente del instituto IVRAE Massimo Banzi, quien enseñaba el uso de PICs a estudiantes de diseño interactivo. Él, desarrolló una herramienta de programación de PICs bajo la plataforma MAC, que sirvió de ejemplo al colombiano Hernando Barragan para luego desarrollar la tarjeta wiring, el lenguaje de programación y su ambiente de desarrollo.

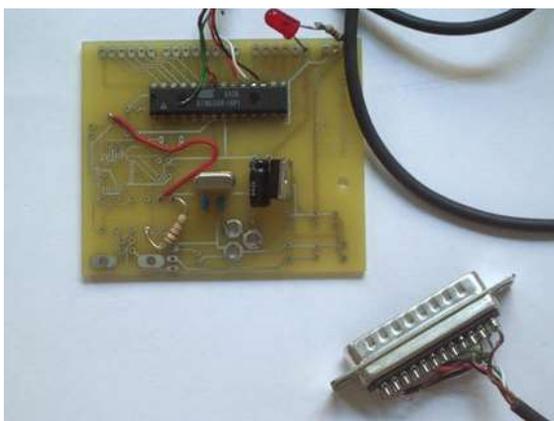


Figura 1.31. Primer prototipo del instituto de IVRAE

Fuente: BOTSiencie, (2012).

Poco tiempo después Massimo, David Cuartiles investigador en el instituto y Gianluca Martino desarrollador local contratado para desarrollar hardware

para los proyectos de los estudiantes, desarrollaron una tarjeta basada en el trabajo de Hernando Barragan la cual era más pequeña y económica que la Wiring a la cual llamaron Arduino.

Más tarde se unieron a este grupo los estudiantes Mellis y Zambetti que mejoraron el modelo de Wiring, logrando construir una tarjeta básica y un ambiente de desarrollo completo.

Inicialmente fue un proyecto creado no solo para economizar la creación de proyectos escolares (en ese tiempo usaban el microcontrolador Basic Stamp, cuyo costo era de 100 dólares estadounidenses) dentro del instituto, sino que además, Banzi tenía la intención de ayudar a su escuela a evitar la quiebra de la misma con las ganancias que produciría vendiendo sus placas dentro del campus a un precio accesible (1 euro por unidad).

Es así como nace Arduino, cuyo nombre se le otorga por Bar di Re Arduino (Bar del Rey Arduino) donde Massimo Banzi pasaba algunas horas.

Hoy en día con Arduino se pueden fabricar infinidad de prototipos y cada vez su uso se viene expandiendo más. Desde cubos de leds, sistemas de automatización en casa (domótica), integración con el Internet, displays Twitter, kit analizadores de ADN. Google ha apostado por el proyecto y ha colaborado en el Android ADK (Accessory Development Kit), una placa Arduino capaz de comunicarse directamente con smart phones Android para obtener las funcionalidades del teléfono (GPS, acelerómetros, GSM, bases de datos) y viceversa para que el teléfono controle luces, motores y sensores conectados de Arduino.

1.4.2. MODELOS OFICIALES

El hardware original Arduino es fabricado por la empresa italiana Smart Projects, sin embargo, algunas de ellas han sido diseñadas por la empresa norteamericana SparkFun Electrónica.

En la siguiente figura, se puede observar los modelos disponibles en el mercado, junto con el microcontrolador que utiliza.

Modelos placas Arduino	Modelos microcontroladores uC
Arduino Due	AT91SAM3X8E
Arduino Leonardo	Atmega 32U4
Arduino uno	Atmega 328
Arduino Duemilanove	Atmega 328
Arduino Pro 3.3V/8MHz	Atmega 328
Arduino Pro 5V/16MHz	Atmega 328
Arduino Mega 2560 R3	Atmega 2560
Arduino Mega	Atmega 1280
Mega Pro 3.3V	Atmega 2560
Mega Pro 5V	Atmega 2560
Arduino Mini 05	Atmega 328
Pro Micro 5V/16MHz	Atmega 32U4
Pro Micro 3.3V/8MHz	Atmega 32U4
LilyPad Arduino 328 MainBoard	Atmega 328

Figura 1.32. Modelos de placa Arduino.

Fuente: Tapia y Manzano, (2013).

1.5.RECONOCIMIENTO DE VOZ

1.5.1. TRATAMIENTO DIGITAL DE SEÑALES

El procesado digital de señales es un área de la ciencia, la técnica y la ingeniería que se ha desarrollado enormemente durante los últimos 30 años. Este rápido desarrollo es el resultado de los avances tecnológicos producidos tanto en los ordenadores digitales como en la fabricación de circuitos integrados de propósito específico. No obstante, estos espectaculares avances no habrían sido posibles sino hubiese detrás un conjunto de aplicaciones de gran impacto en la sociedad y con un considerable poder económico, capaces de tirar del carro de la técnica. Hay que tener en cuenta que el tratamiento de señal es uno de los pilares básicos

para las comunicaciones y/o el intercambio de información en general. Esta, que es sin duda un tipo de aplicación que por sí sola justificaría el desarrollo de esta disciplina, no es la única que hace uso de los conceptos básicos del Tratamiento de Señal. (UNED, s.f)

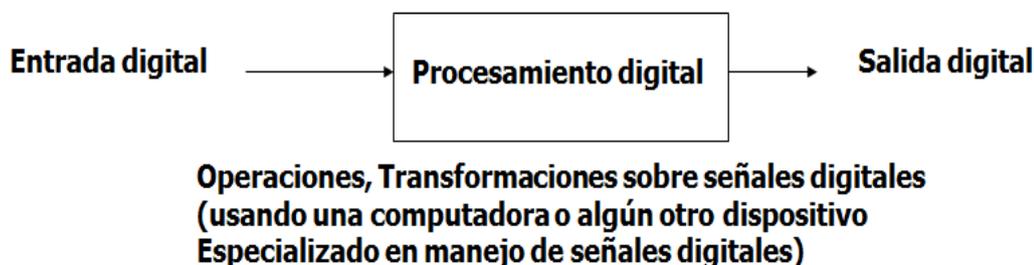


Figura 1.33. Esquema básico del Tratamiento Digital de Señales.

Fuente: Rony Ferzli, (2008).

Recientemente han cobrado importancia otro tipo de aplicaciones que también tienen sus bases teóricas en el tratamiento de señal como son las relacionadas con el almacenamiento de información. Esto es especialmente importante con determinados tipos de señal (imagen, audio y video especialmente) ya que consumen un espacio de almacenamiento considerable. Las técnicas de compresión sin pérdida de información pueden reducir ligeramente el espacio necesario, pero una mayor compresión requiere el empleo de técnicas de compresión con pérdidas por lo que se hace necesario un estudio detallado de las señales originales y de los sistemas que las transforman de forma que las pérdidas resulten irrelevantes.

El tratamiento de señal se encarga del estudio de las propiedades y características de las señales y de los sistemas y transformaciones que podemos aplicarles para convertirlas en otras señales, que manteniendo el mensaje original (visual, acústico o de cualquier otro tipo) tengan unas características más apropiadas para su transmisión o almacenamiento, o permitan reconstruir u obtener la información original que ha podido resultar distorsionada en la transmisión. Estas características deseables pueden ser desde una mayor inmunidad al ruido que facilite su retransmisión hasta una

representación más compacta que disminuya sus necesidades de almacenamiento y de ancho de banda de emisión. (UNED, s.f)

1.5.2. PROCESAMIENTO DE LA SEÑAL DE AUDIO

El mundo que nos rodea está caracterizado por contar con un gran número de señales analógicas o continuas que varían entre un valor mínimo y otro máximo pasando por infinitos valores. El sonido, la luz, humedad, presión son algunos ejemplos de magnitudes analógicas típicas en nuestro entorno. El correcto tratamiento de estas señales tiene una gran importancia para el control de procesos y dispositivos.

A continuación citaremos las principales etapas que se debe llevar a cabo para un correcto procesamiento:

- Muestreo
- Cuantificación
- Pre-procesamiento
- Ventaneo
- Segmentación

1.5.2.1. Muestreo

Esta etapa consiste en convertir la señal analógica en una señal discreta en el tiempo. El principio fundamental del muestreo es denominado teorema de Nyquist. Este teorema demuestra que la reconstrucción exacta de una señal periódica en banda base a partir de sus muestras, es matemáticamente posible si la señal está limitada en banda y la tasa de muestreo es superior al doble de su ancho de banda. Este hecho es muy importante, ya que nos demuestra que si se hace un correcto muestreo no se pierda la información.

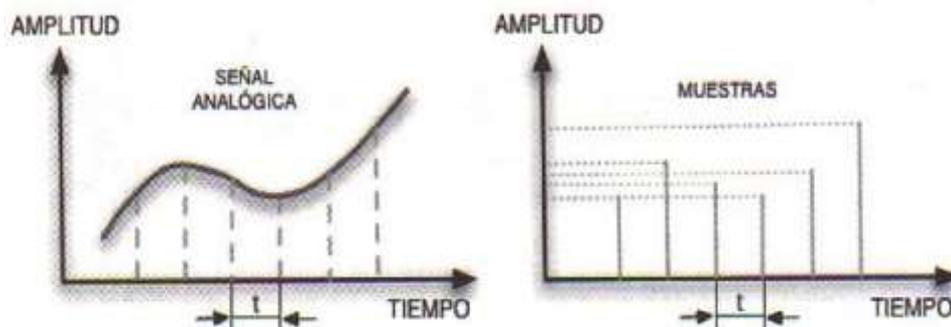


Figura 1.34. Muestreo de una señal analógica.

Fuente: Angulo, (2008)

Los estudios sobre las características de las señales de voz han demostrado que la mayor parte de la información necesaria para la inteligibilidad² del habla se encuentra por debajo de los 4 KHz. De hecho el ancho de banda disponible en las líneas telefónicas es algo menor de 4 KHz. Si el principio de Nyquist nos indica que es necesario una frecuencia de muestreo de por lo menos el doble del ancho de banda de la señal original, entonces estaríamos hablando que nuestra frecuencia de muestreo(f_s) para las señales de voz sería de 8 KHz, aunque para obtener mayor resolución se utiliza generalmente 16 KHz.

1.5.2.2. Cuantificación

En la cuantificación el valor de cada muestra de la señal se representa como un valor elegido de entre un conjunto finito de posibles valores.

Se conoce como error de cuantificación (o ruido) a valores que no han podido ser calculados con la matemática convencional y se necesita separar las señales para obtener resultados, con el fin de que el ruido sea lo más bajo posible. Para ello se puede utilizar las técnicas de cuantificación detalladas en la siguiente figura:

² Inteligibilidad: Que puede ser entendido.

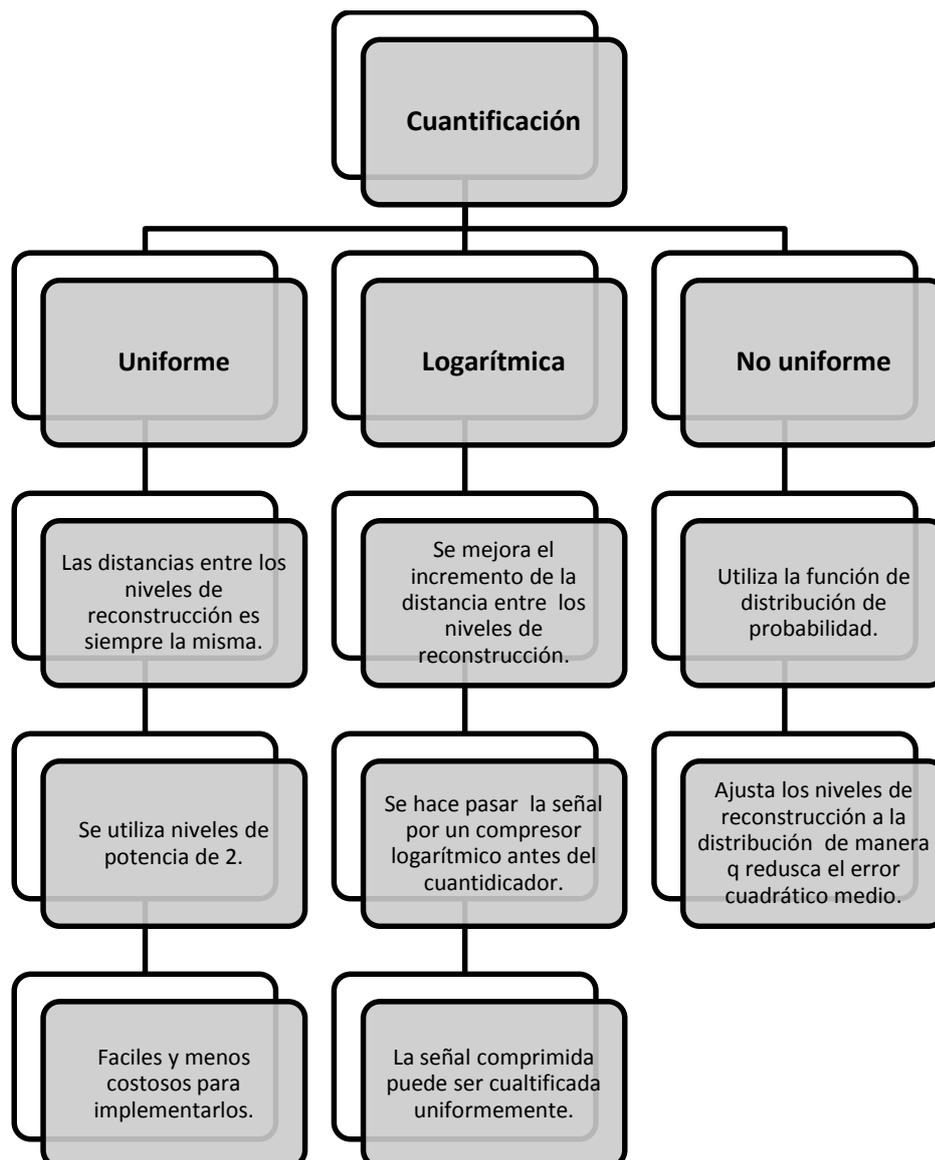


Figura 1.35. Técnicas de cuantificación.

1.5.2.3. Pre-Procesamiento

Esta etapa se realiza con el propósito de suavizar el espectro y reducir las inestabilidades de cálculo asociadas con las operaciones aritméticas.

1.5.2.4. Ventaneo

La señal de voz es un proceso aleatorio y no estacionario. Esto supone un inconveniente a la hora de analizar la señal, no obstante es posible salvar este problema si se tiene en cuenta que a corto plazo de tiempo (del orden de ms) la señal es casi estacionaria esto da lugar a un tipo de análisis donde se

obtienen segmentos o tramas de señal de pocos ms denominado análisis localizado. A este proceso donde se obtienen tramas o segmentos consecutivos de señal se le denomina enventanado.

El enventanado requiere que cada una de la tramas sea multiplicada por una función limitada en el tiempo de tal manera que su valor fuera de su intervalo sea nulo.

1.5.2.5. Segmentación

En el reconocimiento de señales de voz, se hace necesario determinar con adecuada precisión los puntos de inicio y final de cada palabra, es decir, se debe diferenciar las partes de señal que llevan información de voz de aquellas que no llevan voz. Este procedimiento evita gastar memoria y tiempo de cálculo en las tramas que no contienen información evitando así obtener resultados erróneos en el análisis de las señales de voz.

El problema de encontrar los puntos de inicio y fin de palabra es fundamental en procesamiento de voz. Por ejemplo, en reconocimiento automático de palabras aisladas, es necesario encontrar las regiones de la señal que corresponden a cada palabra a ser analizada. De la correcta segmentación de la señal depende en gran medida la exactitud del proceso de reconocimiento. De hecho, las fallas en la segmentación de la señal constituyen una de las principales fuentes de error en los sistemas de reconocimiento de voz, ya que algunos sonidos que pueden captarse, correspondientes a ruido de fondo, podrían eventualmente confundirse con voz.

1.6. MOTORES BRUSHLESS

La palabra brushless se puede traducir como "sin escobillas", las escobillas son los elementos que hacen contacto en el colector de un motor común. En la mayoría de motores Brushless pequeños, las escobillas son de una

aleación de cobre, y para los motores de mayor tamaño, se las fabrica a base de carbón.

Estos motores no cuentan con colector y escobillas o carbones, la mayoría se alimentan con una señal trifásica, la misma que debería ser sinusoidal, pero en la práctica son pulsos, sin embargo se los clasifica como de DC porque al igual que los motores comunes tienen imanes permanentes (E - Radiocontrol, 2008).

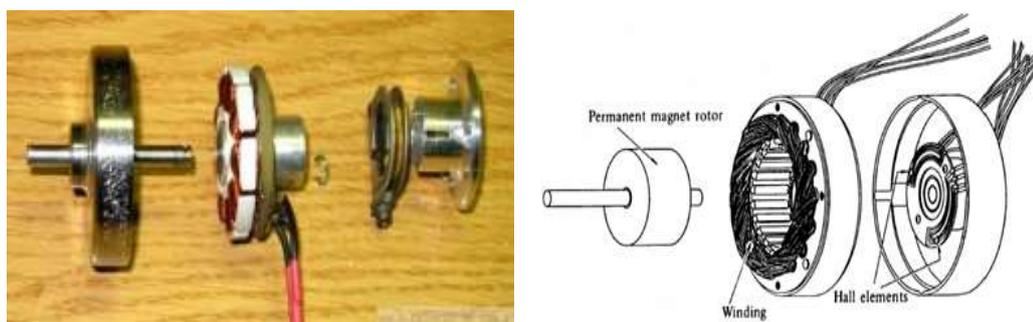


Figura 1.36. Estructura básica de motores Brushless.

Fuente: E - Radiocontrol, (2008).

1.6.1. ESTRUCTURA BÁSICA

Los motores brushless están compuestos por una parte móvil que es el rotor, y es donde se encuentran los imanes permanentes, y una parte fija, denominada estator o carcasa, sobre la cual van dispuestos los bobinados de hilo conductor; además, estos motores pueden estar clasificados en motores brushless sensed o sensorless.

Los motores brushless sensed están compuestos de sensores que determinan la posición durante el giro del rotor, incluso a velocidades bajas, y que permiten conocer el momento más idóneo para aplicar el valor de tensión adecuado en la bobina adecuada; en cambio, los motores sensorless no cuentan con este tipo de sensores, por lo que se debe buscar otro método para determinar la posición del rotor.

1.6.2. LÓGICA DE FUNCIONAMIENTO

Estos motores constan de tres bobinados, que los denominaremos como L1, L2 y L3 conectados entre sí, formando una conexión en estrella o triángulo (dependiendo del tipo de motor) que desemboca en tres puntos de conexión, que son los tres cables R, S y T, como se lo puede observar en la figura 1.37.

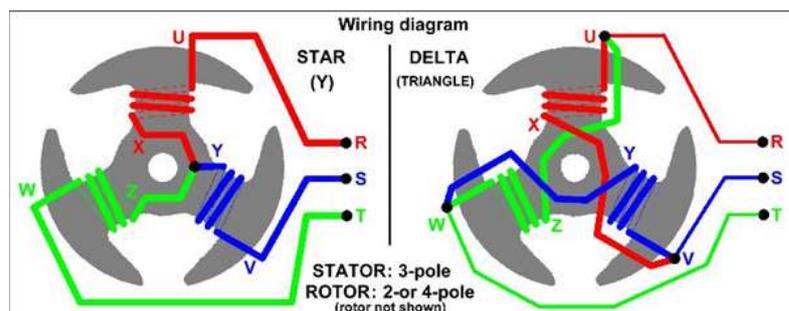


Figura 1.37. Conexión estrella o triángulo.

Fuente: Guaraca, Calle y Guzhñay, (s.f).

A continuación cada una de estas tres bobinas L1, L2 y L3 puede estar formada a su vez por dos o más bobinas conectadas en serie o paralelo (dependiendo del tipo motor y número de polos) y colocadas dentro del motor en unas ranuras unas enfrente de otras y siempre con un desfase en la posición de 120 grados. En la Figura 1.38 se muestra un bobinado de un motor Brushless con cada una de las bobinas L1, L2 y L3 (conectadas en triángulo) y estas a su vez formadas por dos bobinas en serie.

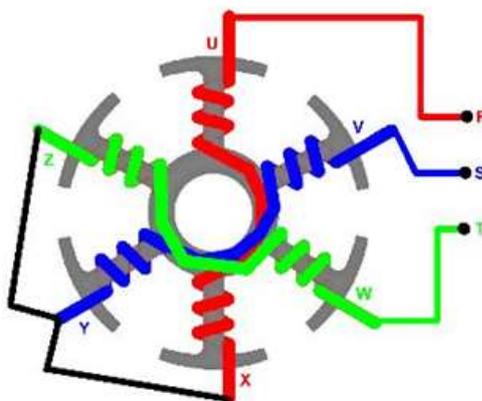


Figura 1.38. Bobinado de un motor Brushless.

Fuente: Guaraca, Calle y Guzhñay, (s.f).

Ahora, para generar movimiento, a cada secuencia de conmutación³ le corresponde un estado de activación de las bobinas, de tal forma que una de los devanados tiene una tensión de alimentación positiva (entrada de corriente en el devanado), un segundo devanado tiene una tensión de alimentación negativa (salida de corriente de la bobina) y el tercer devanado se encuentra en estado no activado (alta impedancia). La corriente que circula por la bobina activada genera un campo electromagnético que interacciona con el campo magnético creado por los imanes permanentes del rotor, haciendo que aparezca una fuerza que hace girar al rotor y por lo tanto al eje del motor.

El par del motor se produce debido a la interacción entre el campo magnético generado por las bobinas del estator y los imanes permanentes. Idealmente el par máximo se produce cuando estos dos campos se encuentran a 90 grados uno del otro y decaen a cero cuando ambos campos magnéticos se mueven juntos. (García, 2011, p. 28)

A fin de mantener el motor en marcha, se debe seguir una secuencia de activación, la cual depende de la posición en la que se encuentre el rotor; esta posición la podemos obtener con sensores de efecto Hall.

1.6.2.1. Sensores Hall

Los sensores de efecto Hall, son utilizados para conocer la posición angular aproximada del rotor del motor, permitiendo así aplicar una secuencia válida de conmutación entre las fases (bobinas) del estator que genere par motor. En ocasiones, también puede utilizarse los sensores de efecto Hall para cerrar un lazo de posición o de velocidad, aunque la precisión que éstos

³ Conmutación: Permite o no la circulación de corriente eléctrica.

permiten obtener, los desaconseja para este uso, siendo más indicados para ello, otros elementos de feedback⁴ como por ejemplo los encoders.

El efecto Hall fue descubierto en 1879 por Edwin Herbert Hall y consiste en la aparición de un campo eléctrico (también llamado campo Hall) perpendicular a un conductor sobre el que circula una corriente eléctrica cuando éste es expuesto a un campo magnético.

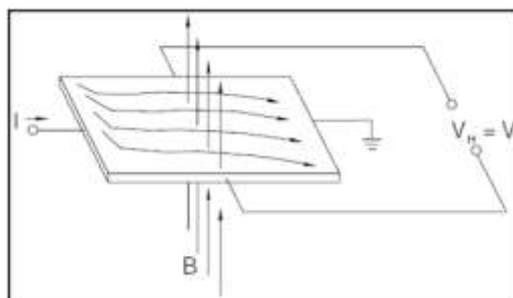


Figura 1.39. Principio básico de funcionamiento de Efecto Hall.

Fuente: Vila y Juanpere, (s.f).

Cuando un material semiconductor por el que circula una corriente I , es expuesto a un campo magnético, la fuerza de Lorentz⁵ se aplica sobre las cargas eléctricas, modificando la distribución uniforme de la corriente y provocando así una diferencia de potencial (V_H) proporcional a la corriente (I), y al campo magnético (B) que lo atraviesa.

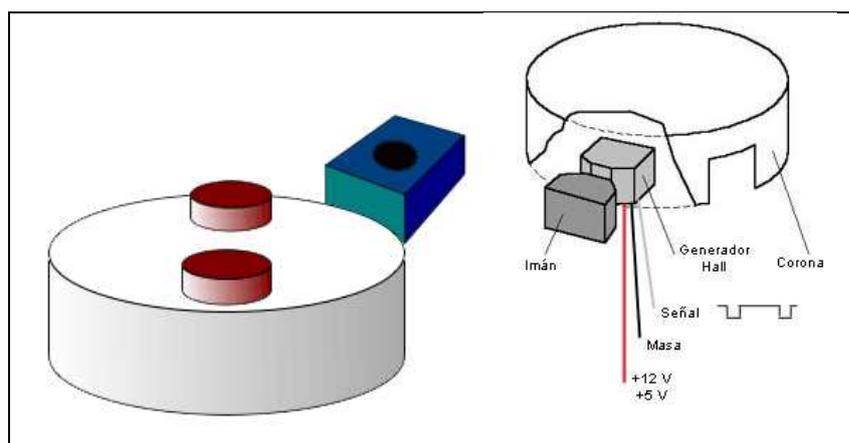


Figura 1.40. Efecto Hall.

Fuente: García, (2011).

⁴ Feedback o realimentación es un mecanismo de control en el que las salidas vuelven a ingresar en el sistema, como recursos o información.

⁵ Fuerza de Lorentz: Es la fuerza ejercida por el campo magnético que recibe una partícula cargada o una corriente eléctrica.

En la figura 1.41 podemos observar la secuencia de conmutación que se debe seguir con respecto a los sensores Hall. Cada 60 grados eléctricos de rotación, uno de los sensores Hall cambia de estado. Teniendo en cuenta esto, se necesitan 6 pasos para obtener una vuelta completa del rotor.

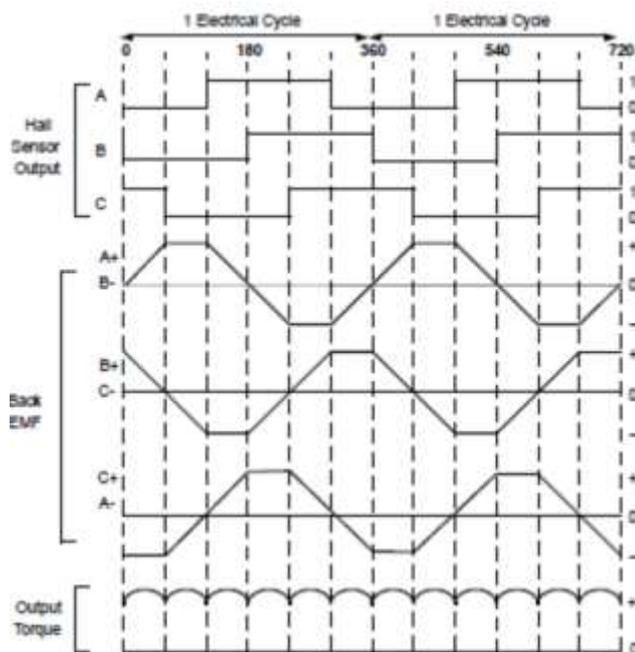


Figura 1.41. Señales enviadas de los Sensores Hall en un motor brushless.

Fuente: García, (2011).

Una característica importante cuando se escoge una tecnología de sensor de efecto Hall, para aplicar al control de motores brushless, es su unipolaridad o bipolaridad.

Los sensores de efecto Hall unipolares, también conocidos como unipolar switch, requieren para funcionar un flujo magnético positivo (definido como el que sigue la misma dirección que la referencia del sensor) lo que equivale a dirigir un polo sur hacia su sensor. El campo producido por un flujo magnético negativo (un polo norte dirigido hacia el sensor) no tiene efecto en ellos.

En cambio, en los sensores de efecto Hall bipolares, pueden ser activados con las señales de campo magnético producidas por un polo norte y polo sur, lo que nos permiten obtener mejores eficiencias en la conmutación de las

fases de un motor, ya que su respuesta eléctrica es simétrica en la vuelta completa del rotor (Juanpere, s.f).

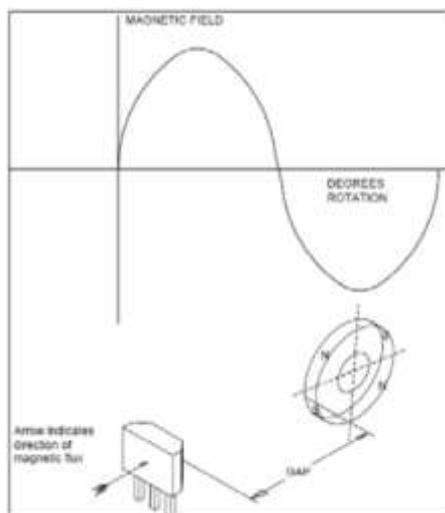


Figura 1.42. Respuesta de un sensor bipolar en media vuelta de rotación.

Fuente: Vila y Juanpere, (s.f).

1.6.2.1.1. Alineación basada en sensores de efecto hall

Para poder determinar la posición inicial del rotor, es necesario aplicar dos tipos de conmutación de motores brushless, que son la trapezoidal y sinusoidal.

Este algoritmo se la puede dividir en dos fases:

- **Arranque:** En la primera fase, se excita el motor utilizando una conmutación trapezoidal, dada una posición inicial cualquiera del rotor podemos estimar a partir de los sensores Hall el sector en el que se encuentra, y por tanto, su posición aproximada con un error de $\pm 30^\circ$. El vector de excitación aplicado en cada sector garantiza que la excitación se encuentre siempre entre 60° y 120° de la posición del rotor.
- **Funcionamiento normal:** Una vez detectada la transición de un sensor Hall se puede estimar con gran precisión la posición del rotor debido a que la distribución física de los sensores respecto a las fases es conocida y por tanto cada transición corresponde a una posición angular definida.

1.6.2.2. Fuerza Contraelectromotriz (BEMF)

Los bobinados de un motor eléctrico funcionan como un generador cuando cortan a través de las líneas de campo magnético. Se genera un potencial en el bobinado medido en voltios y se denomina fuerza electromagnética (EMF). Conforme a la ley de Lenz, este EMF genera un segundo campo magnético opuesto al cambio original en el flujo magnético impulsando la rotación del motor. En términos simples, el EMF resiste el movimiento natural del motor y se denomina "fuerza contraelectromotriz. Para un motor dado del flujo magnético fijo y una cierta cantidad de bobinados, la magnitud del EMF es proporcional a la velocidad angular del rotor. (Keeping, 2013)

En la siguiente figura, se muestra la forma de onda de la fuerza contraelectromotriz, teniendo en cuenta que al girar el motor, se grafica una onda trapezoidal (línea de guiones).

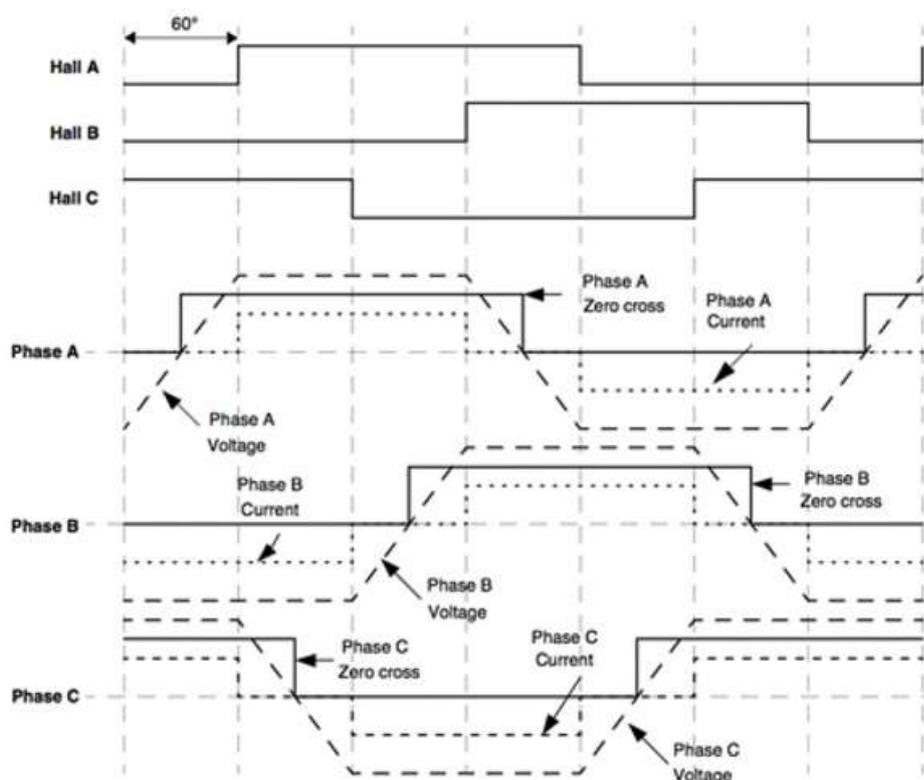


Figura 1.43. Salida del sensor Hall comparada con la fuerza contraelectromotriz para el motor BLDC trifásico.

Fuente: Keeping, (2013).

Por medio de la figura, podemos observar que las salidas del sensor Hall coincide con el cruce por cero de la fuerza contraelectromotriz, tomando en cuenta que existe un desfase de 30°, lo cual, serán tomados en cuenta, para compensar al momento de activar la siguiente secuencia de excitación.

1.6.2.2.1. Métodos para detectar la fuerza contraelectromotriz

Existen tres clases de métodos para detectar la fuerza contraelectromotriz, lo cual se detalla en la siguiente tabla:

Tabla 1.2. Métodos para detectar la fuerza contraelectromotriz.

Gráfica:	Descripción:
	<p>Comparando la fuerza contraelectromotriz con la mitad de voltaje d.c. utilizando un comparador.</p>
	<p>Generado un punto neutral virtual, al usar tres resistencias en paralelo con las bobinas del motor, y luego compararla con la fuerza contraelectromotriz.</p>
	<p>Emplear convertidores analógicos a digitales de alta velocidad, para luego compararlos con un valor correspondiente al punto cero.</p>

La principal desventaja para el control de BLDC sin sensores, es cuando el motor se encuentra fijo, ya que en este momento no se genera la fuerza contraelectromotriz. La solución más rápida para este tipo de inconvenientes, es accionar el motor de manera directa, siendo así, suficiente para recibir la información de la BEMF y luego continuar con el procedimiento antes mencionado.

Dado que la fuerza contraelectromotriz es proporcional a la velocidad de la rotación, es posible que los motores BLDC sin sensores no sean una buena elección en aplicaciones que requieren velocidades muy bajas. En este caso, es posible que los motores BLDC con sensores de efecto Hall sean una mejor opción para el trabajo.

1.6.3. MÉTODOS DE CONMUTACIÓN DE MOTORES SIN ESCOBILLAS.

Para su puesta en marcha y control de velocidad se utilizan en forma habitual dos técnicas habituales que son la de conmutación trapezoidal (también conocida como “6 step modes”) y la de conmutación sinusoidal, ambos nombres derivados de los métodos empleados en la activación de los bobinados del motor. Existe un tercer método conocido como “Control Vectorial” (FOC – *Field Oriented Control*), la desventaja mayor de este método radica en que requiere de una enorme potencia de velocidad de cálculos y procesamientos de datos para mantener siempre un conocimiento exacto de la posición y del comportamiento del rotor del motor. Por esto, los métodos más empleados son los de control trapezoidal y sinusoidal (Juanpere, s.f).

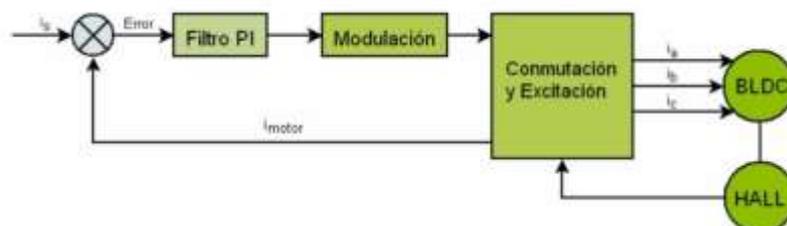


Figura 1.44. Esquema en bloques de un controlador con conmutación trapezoidal.

Fuente: Guaraca, Calle y Guzhñay, (s.f).

La arquitectura de control sinusoidal ha sufrido limitaciones en su desarrollo debido a los costos adicionales y los complicados algoritmos de control, pero su movimiento de rotación suave lo ha transformado en un motor muy popular dentro de las aplicaciones que requieren un funcionamiento silencioso y de bajos niveles de vibración mecánica. Para este tipo de motores, existen diversas técnicas de control de posición del rotor que puede incluir o no, sensores de efecto Hall, habituales en los sistemas de control de conmutación trapezoidal.

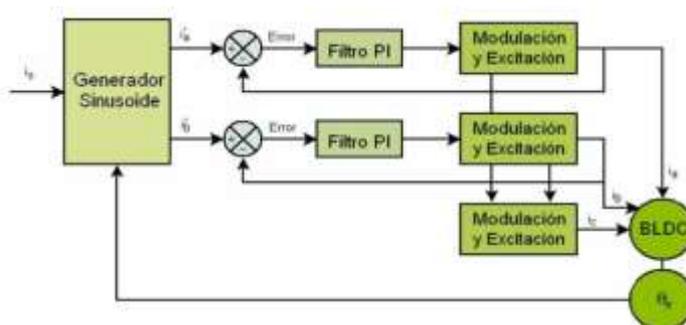


Figura 1.45. Esquema en bloques de un controlador con conmutación sinusoidal.

Fuente: Guaraca, Calle y Guzhñay, (s.f).

Por lo general, en la mayoría de las aplicaciones, un sistema de control BLDC⁶, contiene cuatro bloques fundamentales:

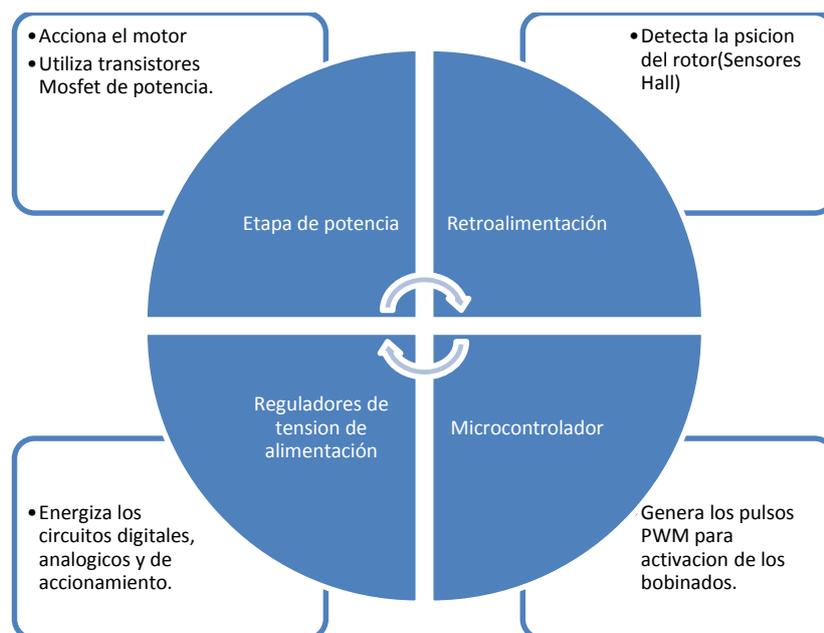


Figura 1.46. Etapas fundamentales de un control BLDC

⁶ BLDC.- Motor Brushless de corriente directa.

“La posición del motor, puede ser detectada mediante sensores de efecto Hall, o diversas técnicas que no utilicen sensores. En este caso todos los métodos son generados por los bobinados que no están siendo activados pero que generan una contra-FEM⁷” (Juanpere, s.f, p. 2).

Para lograr estos objetivos y procesar las señales de manera apropiada, el microcontrolador dedicado debe tener los periféricos necesarios para llevar a cabo con éxito la aplicación específica, la técnica de accionamiento y el método de detección de posición. Tanto el microcontrolador como los transistores MOSFET⁸, requieren de una fuente de alimentación regulada, que puede ser proporcionada por reguladores de baja caída de tensión entre las tensiones de entrada y salida a los mismos. En los casos en que no sea posible utilizar este tipo de reguladores, los sistemas conmutados pueden ser una solución apropiada para reducir la disipación de potencia, en forma de calor, junto a un mejor aprovechamiento energético.

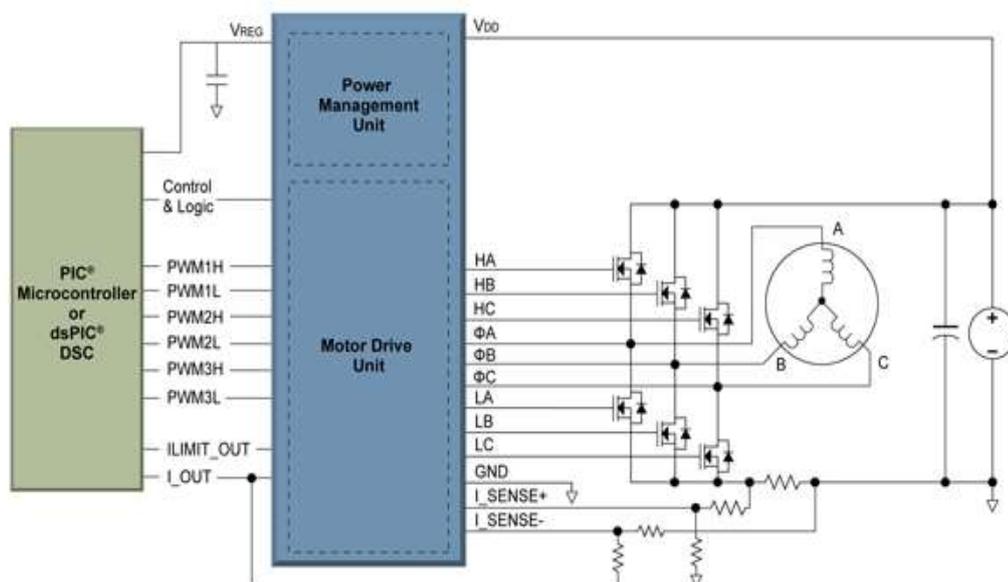


Figura 1.47. Esquema de conexión de un motor Brushless a un driver.

Fuente: Neoteo, (s.f).

⁷ FEM.- Fuerza electro motriz.

⁸ MOSFET.- Transistor de efecto de campo metal-óxido-semiconductor. Es un transistor utilizado para amplificar o conmutar señales electrónicas.

En las aplicaciones actuales, la cantidad de espacio consumido dentro de un PCB⁹ y los tamaños finales de los sistemas electro-mecánicos son preocupaciones para muchas aplicaciones trifásicas BLDC. Los circuitos integrados capaces de controlar las tres fases de un motor BLDC reducen la complejidad del sistema y ayudan a cumplir con los requisitos de mínimo espacio dentro de un PCB. Sin embargo, la fuerza máxima de accionamiento de un motor estará limitada por la posibilidad de disipar potencia, el tipo de encapsulado y el diseño físico-electrónico que posea un circuito integrado específico para cumplir, por sí solo, el control total de un motor BLDC. Estas soluciones, altamente integradas para motores trifásicos BLDC, son típicamente considerados como “dispositivos específicos para aplicaciones estándar” (ASSP – Application-Specific Standard Products). Estos dispositivos se pueden considerar como menos flexibles, en particular, cuando las especificaciones del motor empleado no son totalmente compatibles con el motor para el que fuera realizado el diseño original del circuito integrado. (Neoteo, s.f)

1.6.4. TABLA COMPARATIVA DE UN MOTOR DC SIN ESCOBILLAS Y UN MOTOR DC CON ESCOBILLAS

Tabla 1.3. Comparación entre motores DC convencionales y motores DC Brushless.

Motores DC Brushless	Motores DC Convencionales
Ventajas:	Ventajas:
<ul style="list-style-type: none"> • Mayor eficiencia (menos pérdida por calor) • Mayor rendimiento (mayor duración de las baterías para la misma potencia) • Menor peso para la misma potencia 	<ul style="list-style-type: none"> • Control mediante solo dos cables • Se le remplazan las escobillas y se le extiende la vida útil • Bajo costo de construcción • Control mediante un circuito

⁹ PCB.- Placa de circuitos impresos.

-
- Conmutación electrónica basada en sensores de posición de efecto Hall
 - Requieren menos mantenimiento al no tener escobillas
 - Relación velocidad/par motor es casi una constante

simple y económico

- No se necesita un control para una velocidad constante
- Puede funcionar en un ambiente de condiciones extremas ya que no tiene electrónica asociada

- Mayor potencia para el mismo tamaño
- Mejor disipación de calor
- Rango de velocidad elevado al no tener limitación mecánica.
- Menor ruido electrónico (menos interferencias en otros circuitos)

Desventajas:

- Requiere un mantenimiento periódico
- La relación velocidad/par motor es relativamente plana pero a altas velocidades la fricción de las escobillas aumenta y reduce el par motor útil.
- Poco poder de disipación de calor
- Rotor con mucha inercia, lo cual limita los cambios de velocidad
- Menor rango de velocidad, limitado por las escobillas
- Las chispas que se generan en las escobillas generan mucho ruido electrónico y pueden causar interferencia electromagnética a otros circuitos electrónicos.

Desventajas:

- Mayor costo de construcción
 - El control es mediante un circuito caro y complejo
 - Siempre hace falta un control electrónico para que funcione, que a veces duplica el costo
-

1.7. BATERÍAS

“Esencialmente, una batería es un recipiente de químicos que transmite electrones. Es una máquina electro-química, o sea, una máquina que crea electricidad a través de reacciones químicas” (POWERSHOP, 2009).

Sus partes internas esencialmente son un electrodo positivo y un electrodo negativo (llamados ánodo y cátodo). Los electrones (de carga negativa) corren del polo negativo hacia el polo positivo, o sea, son recogidos por el polo positivo. A no ser que los electrones corran del polo negativo hacia el polo positivo, la reacción química no ocurre. Esto significa que la electricidad solo es generada cuando se le liga una carga (POWERSHOP, 2009).

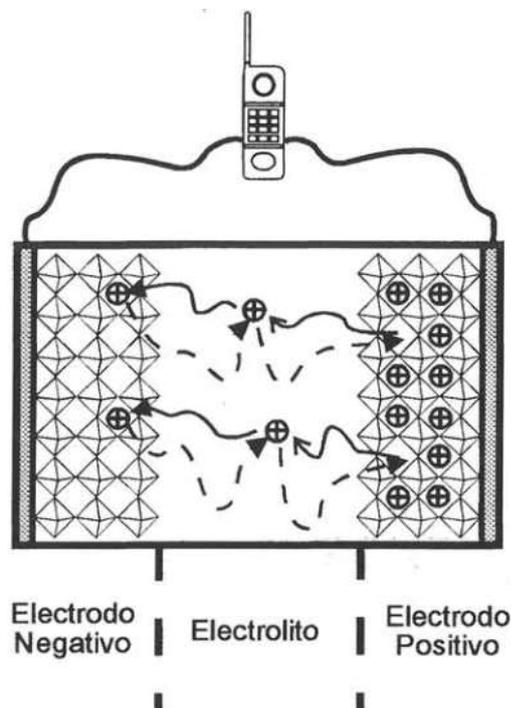


Figura 1.48. Representación esquemática de una batería de iones de litio. Con línea continua se indica la etapa de carga y con línea discontinua la etapa de descarga.

Fuente: Amarilla, (s.f).

Las tipologías de baterías usadas tradicionalmente en aplicaciones estacionarias son las baterías de níquel-cadmio y las de plomo-ácido, a las que hay que añadir recientemente las de ión-litio y las de níquel-hidruro metálico. Entre todas éstas, actualmente las más utilizadas son las baterías de plomo-ácido. La selección de uno u

otro tipo puede ser de carácter económico o técnico, o una combinación de ambas. (Villafáfila, Peña y Cros, s.f, p. 4)

A continuación, se detalla algunas características de los tipos de baterías existentes en el mercado, con el fin de distinguir las diferencias técnicas de cada una de ellas:

1.7.1. BATERÍAS ALCALINAS

Las baterías alcalinas normalmente mayor usadas son las de níquel-cadmio, las mismas que fueron las primeras en presentar un modelo recargable pequeño; estas brindan densidad energética moderada, carga rápida, alta tasa de descarga y vida larga, además proporcionan la posibilidad de trabajar sin ningún problema en rangos de temperatura bastante elevados; sin embargo su mayor desventaja es que poseen metales pesados y tóxicos. Existen otros tipos como las de níquel-hierro (Ni-Fe) y níquel-hidruro metálico (Ni-MH).

Las de Ni-MH se las puede considerar como un paso intermedio hacia las baterías de ión-litio ya que presentan mayores densidades energéticas y contienen menos metales tóxicos, a pesar de esto poseen un menor número de ciclos de carga-descarga y al trabajar alcanzan elevadas temperaturas. Entre sus aplicaciones tenemos arranque, tracción, elevación, telecomunicaciones, sistemas aeroespaciales, sistemas de alimentación ininterrumpida (de poca potencia), equipamiento biomédico y herramientas eléctricas (Villafáfila et al., s.f).

1.7.2. BATERÍA DE PLOMO- ÁCIDO

Su clasificación varía según el electrolito, así tenemos:

- Abiertas, con electrolito líquido.
- Reguladas por válvula (VRLA):
 - AGM, con electrolito absorbido en fibra de vidrio.

- Gel, con electrolito inmovilizado o gelificado.

Estas baterías son de mayor tamaño y peso que las alcalinas. Presentan como ventaja, su bajo precio para ser utilizadas en aplicaciones de alta potencia, entre las más conocidas podemos citar sillas de ruedas, automoción, luces de emergencia, sistemas de alimentación ininterrumpida y sistemas aislados (Villafáfila et al., s.f).

1.7.2.1. Composición Plomo ácido

Las baterías de plomo-ácido están constituidas por un electrolito¹⁰ de ácido sulfúrico y dos electrodos de plomo que, cuando la batería está descargada, se encuentra en forma de sulfato de plomo ($PbSO_4$) incrustado en una matriz de plomo metálico (Pb). (Villafáfila et al., s.f, p.7)

1.7.2.1.1. Ventajas

- Son las más económicas para aplicaciones de alta potencia.
- Son reciclables.
- Proporcionan altos niveles de seguridad y fiabilidad.
- Las baterías reguladas por válvula no precisan de mantenimiento significativo durante su vida útil debido a la tecnología de recombinación de gases. Sin embargo, a las abiertas hay que añadirles electrolito periódicamente.
- Las abiertas tienen que estar en posición vertical y ser accesible para verificar el nivel del electrolito, mientras que las baterías reguladas por válvula pueden situarse prácticamente en cualquier posición mientras sus bornes sean accesibles.

Las baterías con electrolito gelificado permiten una utilización más segura y cómoda, pues el electrolito no se evapora. (Villafáfila et al., s.f, p.8)

¹⁰Electrolito: Sustancia que contiene iones libres, y se comportan como un medio conductor eléctrico.

1.7.2.1.2. Desventajas

- Suelen tener grandes dimensiones y un peso elevado.
- Su condición depende en gran medida del entorno y de su utilización.
- Las abiertas requieren un mantenimiento regular y un espacio especialmente acondicionado por si hubiera pérdida de electrolito.
- Las de tipo VRLA están activadas desde que finaliza su proceso de producción. En cambio, las de tipo abierta son activadas después de su instalación. (Villafáfila et al., s.f, p.8)

1.7.2.1.3. Normativa

- IEC¹¹ 60896-11 (2004): Baterías estacionarias de plomo. Parte 11: Baterías de plomo de tipo abierto. Requisitos generales y métodos de ensayo.
- IEC 60896-21 (2004): Baterías estacionarias de plomo. Parte 21: Baterías reguladas por válvula. Métodos de ensayo.
- IEC 60896-22 (2004): Baterías estacionarias de plomo. Parte 22: Baterías reguladas por válvula. Requisitos. (Villafáfila et al., s.f, p.8)

1.7.3. BATERÍAS DE IÓN- LITIO

Estas baterías brindan mayor densidad energética, menor tamaño y peso en comparación a las demás, sin embargo, necesitan circuitos de protección para limitar la tensión y corriente. Sus aplicaciones más comunes son equipos móviles, como teléfonos móviles, agendas electrónicas u ordenadores portátiles. Pero gracias a los últimos desarrollos tecnológicos, también se están empezando a utilizar en aplicaciones estacionarias (Villafáfila et al., s.f).

¹¹ IEC (Comisión Electrotécnica Internacional), prepara y publica normas internacionales para todas las tecnologías eléctricas, electrónicas y afines.



Figura 1.49. Batería de litio.

1.7.3.1. Composición Ión- litio

Las baterías de ión-litio utilizan un ánodo de litio y un cátodo de ión. El litio es el metal más ligero, tiene un gran potencial electroquímico y proporciona una elevada densidad energética, la cual suele duplicar la de las baterías de níquel-cadmio.

Las baterías de ión-litio no precisan de mantenimiento, no se ven afectadas por el efecto memoria y no necesitan ser sometidas a ciclos de carga-descarga periódicamente para prolongar su duración. Además, la tasa de auto-descarga es inferior a la mitad de la de las baterías de níquel-cadmio.

Pero a pesar de estas ventajas, también tiene sus inconvenientes. Es muy frágil y requiere un circuito de protección para mantener la tensión y el corriente dentro del rango de seguridad. Este circuito limita la tensión máxima de cada celda durante la carga, previene que la tensión de éstas disminuya demasiado durante la descarga y limita la corriente durante la carga y la descarga. Además, la temperatura de la celda debe ser monitorizada para prevenir temperaturas extremas.

La corta vida útil es un aspecto que concierne a este tipo de baterías. Puede apreciarse un deterioro después de un año, tanto si la batería está en uso o no, y frecuentemente la batería falla después de dos o tres años. Sin embargo, esta tecnología está actualmente en pleno desarrollo, por lo que se

ve mejorada continuamente con nuevas combinaciones químicas. Con este rápido progreso, es difícil predecir la duración de las baterías mejoradas.

Hasta la fecha existen diferentes tipos de baterías ión-litio. Las de cobalto se usan en teléfonos móviles, cámaras y ordenadores portátiles. Las de manganeso, conocidas con el nombre de spinel, y las de fosfato se encuentran en herramientas eléctricas. Y, finalmente, las de polímero de ión-litio se comportan de manera similar a las de cobalto.

Como no sufren el efecto memoria, no hace falta descargarlas por completo. De hecho no es recomendable, ya que puede acortar mucho su vida útil. Sin embargo, y a pesar de no requerir de un mantenimiento especial, al igual que las otras baterías, necesitan ciertos cuidados:

- Es recomendable que permanezcan en un sitio fresco (15°C), y evitar el calor.
- Cuando se vayan a almacenar mucho tiempo, se recomienda dejarlas con carga intermedia.
- La primera carga no es decisiva en cuanto a su duración. Es un mito probablemente heredado de las baterías de níquel.
- Es preciso cargarlas con un cargador específico para esta tecnología, ya que de lo contrario se dañará la batería y podría incluso incendiarse. (Villafáfila et al., s.f, p.9)

1.7.3.1.1. Ventajas

- Tiene una alta densidad energética. Su pequeño tamaño y peso la hace ideal para dispositivos portátiles.
- Su tasa de auto-descarga es relativamente baja.
- No sufre el efecto memoria.
- No precisa de descargas periódicas, ya que no tiene efecto memoria, con lo cual el coste de mantenimiento es inferior.
- Se descarga de forma lineal. Durante toda la descarga, la tensión de la batería apenas varía, por lo que es fácil estimar su autonomía y evita la necesidad de circuitos reguladores.

- Algunas pueden entregar corrientes muy elevadas. (Villafáfila et al., s.f, p.10)

1.7.3.1.2. Desventajas

- Precisa de un circuito de protección para mantener la tensión y el corriente dentro del rango de seguridad.
- Va perdiendo vida útil con el tiempo, incluso si se encuentra almacenada, y es difícil predecirla. Para reducir este efecto conviene que sea almacenada parcialmente cargada (aproximadamente al 40% de carga) en un lugar frío.
- El transporte de grandes cantidades de baterías ión-litio debe ser controlado y regulado, excepto en el caso de baterías portátil.
- Tienen un elevado coste de producción, aproximadamente un 40% superior a las Ni-Cd.
- Su diseño no está totalmente actualizado, ya que se encuentra en continuo desarrollo. (Villafáfila et al., s.f, p.10)

1.7.3.1.3. Normativa

- IEC 61960 (2004): Acumuladores con electrolitos alcalinos u otros electrolitos no ácidos. Acumuladores de litio para aplicaciones portátiles.
- IEC 62281 (2004): Seguridad de las pilas y acumuladores de litio durante el transporte.
- IEC 60086-4 (2001): Pilas eléctricas. Parte 4: Normas de seguridad para las pilas de litio. (Villafáfila et al., s.f, p.10)

Existen diferencias sustanciales de una batería a otra, tanto aspectos constructivos como parámetros eléctricos de operación, estos determinan las aplicaciones para las que serán idóneas¹² (Villafáfila et al., s.f).

¹² Ver anexo H.

CAPÍTULO 2

2. DISEÑO DEL HARDWARE

La silla de ruedas ha sido diseñada para responder a comandos de voz; al emitir cualquiera de las órdenes explicadas en el manual de usuario, el controlador activa uno o ambos motores con el fin de cumplir la instrucción dada. El sistema cuenta con un comando de activación (activar) y dos comandos claves (rumbo y pulso), estos últimos dan paso a los movimientos, y la principal diferencia en ellos, es que al emitir la palabra “rumbo”, los sensores están alerta ante cualquier obstáculo con el fin de detener inmediatamente a la silla de ruedas; mientras que al emitir la palabra “pulso”, cada movimiento está limitado por un intervalo de tiempo y los sensores no entran en funcionamiento. El objetivo principal de haber creado el movimiento por un cierto tiempo, es para alejar a la silla de algún obstáculo, logrando así, tener el espacio libre para nuevamente ejecutar los movimientos a través del comando “rumbo”.

Si nos encontramos dentro del comando “rumbo”, tenemos la opción de realizar movimientos continuos, por ejemplo, emitir primeramente el comando “adelante”, luego el comando “derecha”, “izquierda”, y podemos terminar el movimiento con el comando “par”. Siendo necesario, luego de detener la silla, emitir nuevamente algún comando clave.

Cabe aclarar, que el comando “par” podrá ser mencionado en cualquier instante, ya que su activación es primordial para detener la silla o intencionalmente regresar al inicio del programa del reconocimiento, obligando a emitir los comandos “rumbo” o “pulso” para iniciar el movimiento.

En el caso de que los sensores hayan detectado algún obstáculo, el controlador recibe las señales y envía la orden para activar el freno y de esta manera detener la silla.

Los sensores antes mencionados, están clasificados en tres grupos: ultrasónicos, infrarrojos y de prioridad. Los sensores ultrasónicos están localizados en las cuatro esquinas de la silla de ruedas, cuya misión es detectar obstáculos realizando su lectura en forma de abanico, logrando cubrir una gran área alrededor de la silla. Los sensores infrarrojos son dos y están localizados en la parte frontal, tienen como objetivo detectar de forma lineal cualquier obstáculo en la parte frontal, ayudando así, a cubrir zonas muertas dejadas por los sensores ultrasónicos. En cambio, los sensores de prioridad, que son también de tipo infrarrojo, están localizados dos en la parte posterior con dirección al piso y uno se encuentra a nivel del apoyacabeza. El objetivo de los sensores en la parte de atrás es detectar gradas, mientras que el sensor del apoyacabeza se activa con un leve movimiento de la misma, siendo de alguna manera una especie de paro de emergencia para detener la silla cuando el usuario lo vea conveniente. Estos tres sensores se han denominado de prioridad y cuentan a manera de seguridad, con una alarma sonora en caso de estar activados.

2.1. DESCRIPCIÓN DE LA SILLA DE RUEDAS

La elección de la silla de ruedas se la realizó teniendo en cuenta el tiempo diario de uso de la misma y principalmente pensando en la comodidad y bienestar del usuario. Con este fin, se eligió una silla de la marca "*Century Medical*" cuyo modelo es 5MMCR10, silla totalmente ergonómica replegable con estructura de aluminio, poco peso y fácil movilidad; reclinable 180 grados, para que en caso de requerirlo, el paciente descansa en la misma silla, reposa cabezas ajustable y desmontable, al igual que los apoya brazos y reposa pies.

Cabe recalcar que por cuestiones financieras la silla de ruedas elegida no es totalmente la adecuada para una persona cuadripléjica, ya que la estructura del asiento y el espaldar son demasiado delgados para una persona que va a pasar la mayoría del tiempo del día en dicha silla, pero para el alcance planteado en este proyecto es suficiente, ya que la propuesta de la utilización de este equipo es por determinados periodos de tiempo, no para que el

usuario pase todo el día en ella , además se debe tener en cuenta que es el primer prototipo.

Sus características se presentan en la tabla 2.1.

Tabla 2.1. Características silla de ruedas Century Medical.

PARÁMETRO	DIMENSIÓN
Anchura Total	68 cm
Anchura del asiento	46 cm
Diámetro de la rueda trasera	61 cm
Diámetro de la rueda delantera	20 cm
Altura del asiento	50 cm
Altura total	127 cm
Carga	100 Kg
Medición	98*35*89 cm
GW ¹³ /NW ¹⁴	21 kg/18 kg

Fuente: Top Medi (s.f)



Figura 2.1. Modelo de la silla de ruedas elegida.

¹³ GW (Gross weight), es el peso bruto de la mercadería expresada en kilogramos, incluyendo el embalaje.

¹⁴ NW (Net weight), es el peso neto de la mercadería expresada en kilogramos, sin incluir el embalaje.

2.2. SELECCIÓN DE SENSORES ULTRASÓNICOS

El sensor US-020 fue elegido por su funcionamiento bastante estable y de alta precisión, además de su bajo precio en comparación con otros sensores. Sus características a continuación:

Tabla 2.2. Características del sensor ultrasónico.

PARÁMETRO	DIMENSIÓN
Voltaje de funcionamiento	5 VDC
Corriente estática	<3 mA
Ángulo de sensor	15 grados
Distancia de detección	2 cm – 700 cm
Precisión	Hasta 0.3 cm
Tamaño del sensor	Aprox. 45 x 20 x 1.6 mm

Fuente: BOTScience (s.f)

Cuenta con cuatro pines, dos de alimentación (VCC y GND) y dos para capturar la distancia (Trig y Echo, Disparo del ultrasonido y Recepción del ultrasonido, respectivamente).

Para medir la distancia con el US-020 hay que generar un pulso en el pin Trig de un ancho o tiempo de 10µs como mínimo. Al mismo tiempo hay que monitorizar la señal que llega al pin de Echo. La distancia calculada por el sensor corresponde a la fórmula mostrada a continuación. (Opiron electronics, 2013)

$$\text{Distancia} = (\text{Ancho de Pulso} \cdot \text{Velocidad Sonido}) / 2.$$

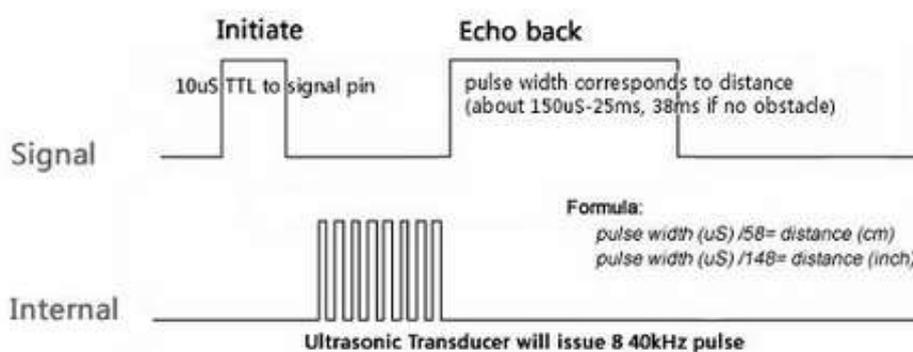


Figura 2.2. Funcionamiento del sensor Ultrasónico.

Fuente: Opiron electronics, (2013).

2.3. SELECCIÓN DE SENSORES INFRARROJOS

La selección de este sensor se hizo debido a su gran funcionalidad, fácil manejo, tamaño pequeño, precio; relativamente económico comparado a otros sensores que prestan las mismas características.

Se trata del sensor E18-D80NK, es un transmisor infrarrojo y un receptor que en conjunto conforman un sensor fotoeléctrico. El sensor tiene una distancia de detección de largo, y tiene menos interferencias por luz visible, ya que utiliza luz infrarroja modulada. Este sensor tiene un ajuste destornillador para ajustar la distancia detectada, a continuación, da una salida digital cuando se detecta algo dentro de ese rango. Este sensor no devuelve un valor de distancia. (Wikispaces, s.f)

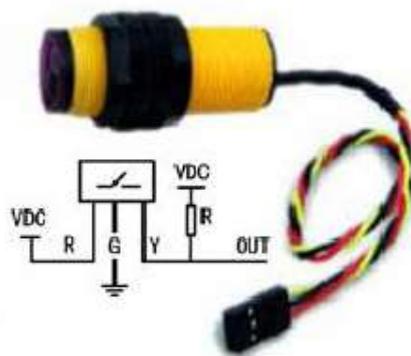


Figura 2.3. Sensor Infrarrojo E18-D80NK.

Fuente: Mcu, (s.f).

Sus principales características se detallan a continuación:

Tabla 2.3. Características Sensor Infrarrojo.

PARÁMETRO	DIMENSIÓN
Corriente de Salida	100 mA / 5 V
Consumo de Corriente	<25 mA DC
Tiempo de respuesta	2 ms
Ángulo de detección	15 grados
Distancia ajustable	3 cm – 80 cm
Diámetro	18 mm
Longitud del sensor	45 mm

Fuente: Mcu (s.f)

2.3.1. DIAGRAMA DEL SISTEMA

Los sensores infrarrojos de pulso modulado responden únicamente a la luz emitida por su propia fuente.

Modular la luz de un led simplemente significa encenderlo y apagarlo en alta frecuencia, para ello el secreto de la eficiencia de un sistema modulado es que el fototransistor del sensor y el amplificador estén sintonizados a la frecuencia de modulación, dando como resultado, que únicamente la luz modulada es amplificada, y toda la otra luz que alcanza al fototransistor es ignorada.

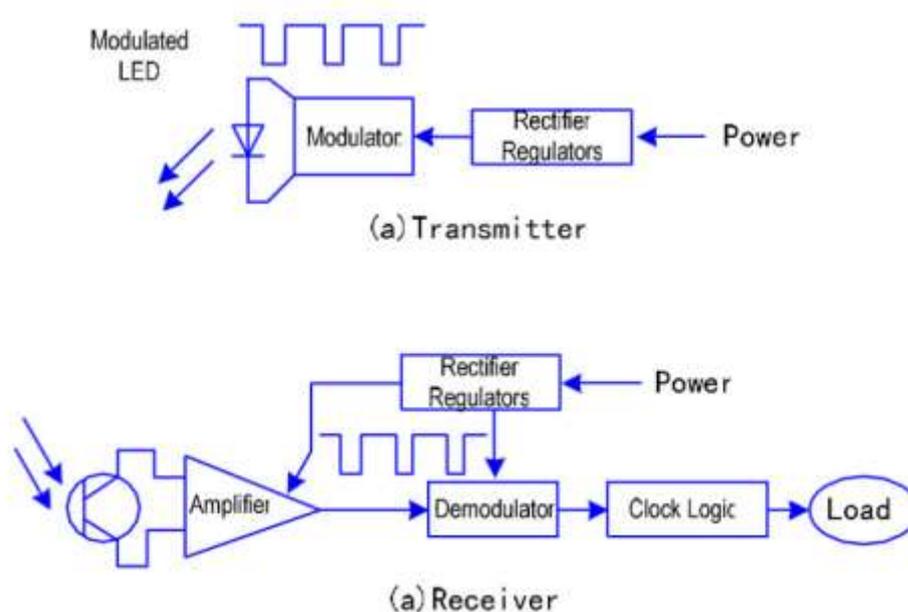


Figura 2.4. Diagrama de funcionamiento del sensor infrarrojo.

Fuente: Mcu, (s.f).

2.4. SELECCIÓN DE LA PLATAFORMA ARDUINO

“Arduino es una plataforma de electrónica abierta para la creación de prototipos basada en software y hardware flexibles y fáciles de usar. Se creó para artistas, diseñadores, aficionados y cualquiera interesado en crear entornos u objetos interactivos” (ARDUINO, s.f).

Arduino puede tomar información del entorno a través de sus pines de entrada de toda una gama de sensores y puede afectar aquello

que le rodea controlando luces, motores y otros actuadores. El microcontrolador en la placa Arduino se programa mediante el lenguaje de programación Arduino(basado en Wiring) y el entorno de desarrollo Arduino (basado en Processing). Los proyectos hechos con Arduino pueden ejecutarse sin necesidad de conectar a un ordenador, si bien tienen la posibilidad de hacerlo y comunicar con diferentes tipos de software (p.ej. Flash, Processing, MaxMSP). (ARDUINO, s.f)

Las placas pueden ser hechas a mano o compradas montadas de fábrica; el software puede ser descargado de forma gratuita. Los ficheros de diseño de referencia (CAD) están disponibles bajo una licencia abierta, así pues eres libre de adaptarlos a tus necesidades. (ARDUINO, s.f)

Esta plataforma cuenta con una gama completa de modelos, que se ajustan a las necesidades del programador¹⁵.

Para este proyecto se eligió de la plataforma ARDUINO el modelo Arduino Mega 2560, porque se ajusta a las necesidades del mismo y sus características son suficientes para abastecer la programación.

2.4.1. DESCRIPCIÓN GENERAL DE ARDUINO MEGA 2560

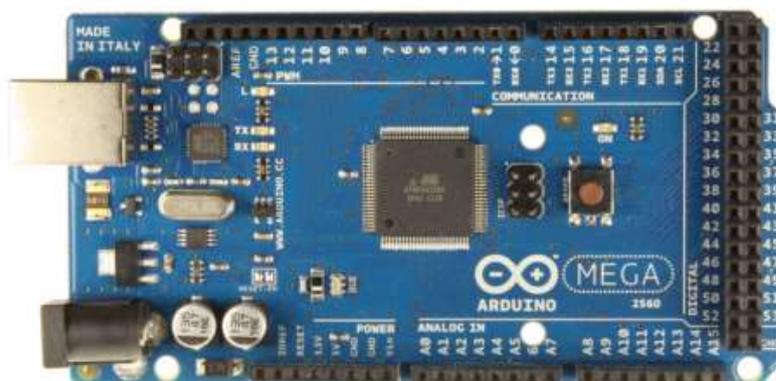


Figura 2.5. Arduino Mega 2560.

Fuente: ARDUINO, (s.f).

¹⁵ Ver Anexo I.

El Arduino mega es una placa basada en el microcontrolador ATmega2560. Dicha Placa cuenta con 54 entradas/salidas digitales (15 proporcionan salida PWM), 16 entradas analógicas, 4 UARTS (puertos serie por hardware), un oscilador de cristal de 16MHZ, conexión USB, conector para fuente externa, conector ICSP y botón de reset. Contiene toda la conexión necesaria para que el microcontrolador que contiene funcione con solo conectarlo al ordenador con el cable USB o directamente con una fuente externa. (ARDUINO, s.f)

Tabla 2.4. Características Arduino Mega 2560.

PARÁMETRO	VALOR
Microcontrolador	ATmega 2560
Voltaje de funcionamiento	5 V
Voltaje de entrada (recomendado)	7-12 V
Voltaje de entrada (límite)	6-20 V
Pines E/S digitales	54(15 proporcionan salida PWM)
Pines E analógica	16
Corriente de cada pin	40 mA
Corriente de cada pin 3.3V	50 mA
Memoria Flash	256 KB de los cuales 8 KB las usa el gestor de arranque bootloader
SRAM	8 KB
EEPROM	4 KB
Velocidad de reloj	16 MHz

Fuente: ARDUINO, (s.f).

2.4.1.1. ENTRADAS Y SALIDAS

Cada uno de los 54 pines digitales se pueden utilizar como entradas o salidas mediante las funciones `pinMode()`, `digitalWrite()`, y `digitalRead()`. Las E/S trabajan a 5 voltios, y pueden recibir o dar una intensidad de 40 mA máximo y tiene una resistencia interna (desconectada por defecto) de 20-50 kOhms. Presenta también 16 entradas análogas, y cada una de ellas proporciona una resolución de 10 bits (1024 valores).

Además, algunos pines tienen funciones especializadas:

- **Serie:** 0 (RX) y 1 (TX), Serie 1: 19 (RX) y 18 (TX); Serie 2: 17 (RX) y 16 (TX); Serie 3: 15 (RX) y 14 (TX).
- **Interrupciones Externas:** 2 (interrupción 0), 3 (interrupción 1), 18 (interrupción 5), 19 (interrupción 4), 20 (interrupción 3), y 21 (interrupción 2). Estos pines se pueden configurar para lanzar una interrupción en un valor LOW (0V), en flancos de subida o bajada (cambio de LOW a HIGH (5V) o viceversa), o en cambios de valor.
- **PWM:** de 2 a 13 y 44 a 46. Proporciona una salida PWM (Pulse Wave Modulation, modulación de onda por pulsos) de 8 bits de resolución (valores de 0 a 255) a través de la función `analogWrite ()`.
- **SPI:** 50 (MISO), 51 (MOSI), 52 (SCK), 53 (SS). Estos pines proporcionan comunicación SPI usando la librería SPI.
- **LED 13:** Hay un LED integrado en la placa conectado al pin digital 13, cuando este pin tiene un valor HIGH(5V) el LED se enciende y cuando este tiene un valor LOW(0V) este se apaga.
- **TWI:** 20 (SDA) y 21 (SCL). Soporta comunicación TWI usando la librería Wire.
- **AREF:** Voltaje de referencia para las entradas analógicas usando `analogReference ()`.
- **Reset:** reinicia el microcontrolador suministrando un valor LOW (0V) (ARDUINO, s.f).

2.5.SELECCIÓN DEL MÓDULO DE RECONOCIMIENTO DE VOZ

Para la elaboración de este proyecto, se ha optado por la utilización del Módulo EasyVr.

Se trata de un potente módulo de bajo coste para el reconocimiento de voz y reproducción de sonidos. Es la versión mejorada y actualizada del VRbot de la firma Veeer. Las voces a reconocer pueden estar predefinidas y grabadas internamente, y se las conoce

como voces independientes del micrófono (SI). También se puede grabar y reconocer voces definidas por el propio usuario y en cualquier idioma. En este caso se tratan de voces dependientes del micrófono (SD), que se supone previamente han sido “enseñadas” y grabadas en la memoria interna del módulo. (Microsystems Engineering, s.f, p. 1)



Figura 2.6. Módulo EasyVR.

Fuente: Microsystems Engineering, (s.f).

2.5.1. CARACTERÍSTICAS

Se pueden destacar las más relevantes:

- 26 comandos y voces pre-programados (SI) en: en inglés, italiano, japonés, alemán, francés y español.
- Admite hasta 32 comandos y sus correspondientes voces definidas por el usuario (SD) en cualquier idioma.
- Los comandos y voces SD se pueden organizar en hasta 16 grupos.
- Se dispone de un interface gráfico de usuario (GUI) para Windows que permite una rápida familiarización con el uso del módulo.
- El módulo se puede conectar fácilmente con cualquier tipo de controlador mediante una sencilla comunicación serial, en nuestro caso se lo realizará con el Arduino Mega.
- Dispone de un potente protocolo de comandos para el desarrollo de cualquier aplicación basada en el reconocimiento de voz.
- Alimentación de 3.3V a 5V.
- Líneas de E/S o GPIO (IO1, IO2 e IO3) que se controlan directamente mediante los comandos correspondientes.

2.5.2. APLICACIONES

Son numerosas las posibles aplicaciones del módulo de reconocimiento EasyVR. Algunos ejemplos son los siguientes:

- Sistemas de control de propósito general que se deseen gobernar mediante voz.
- Automatización de aplicaciones en el ámbito doméstico.
- Control de acceso por voz.
- Sistemas robóticos controlados por voz.

2.5.3. INSTALACIÓN DEL MÓDULO DE RECONOCIMIENTO DE VOZ

El módulo EasyVR es capaz de conectarse de dos diferentes maneras, dependiendo de lo que se vaya a realizar, y son las siguientes:

- **Modo puente.-** El modo puente es utilizado para trabajar con el Arduino, y utiliza la librería software serial, la cual cambia los pines de transmisión y recepción del puerto serial, a otros pines previamente configurados. La conexión la podemos observar en la figura 2.7:

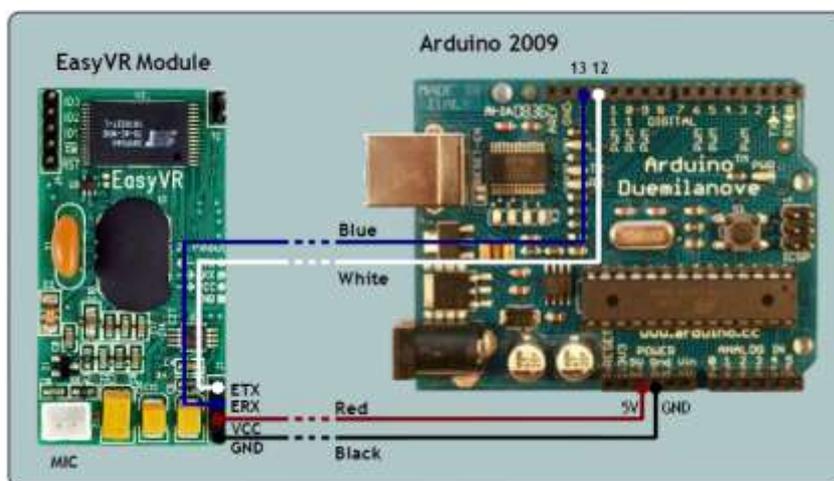


Figura 2.7. Conexión modo puente.

Fuente: VeeAR, (s.f).

Como se observa, los pines Tx y Rx se han trasladado a los pines 13 y 12 respectivamente, logrando trabajar normalmente tal y como se lo hiciera en los pines 0 y 1.

- **Modo adaptador.-** En cambio, el modo adaptador se lo utiliza para convertir al Arduino en bootloader, y así entablar comunicación entre Arduino y el software del EasyVR (Easy Commander), sin necesidad de montar otro circuito que permita la comunicación serial como puede ser un max232.

Este método también es utilizado para descargar la tabla de sonidos previamente realizada en el software Quick Synthesis.

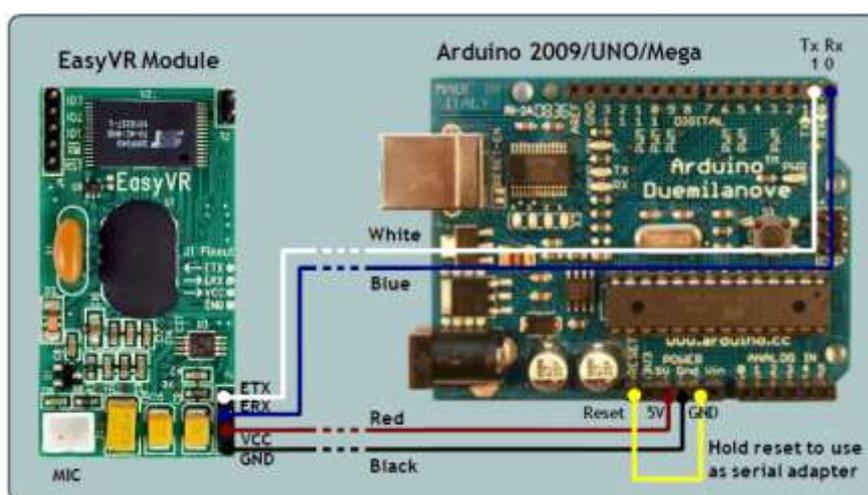


Figura 2.8. Conexión modo adaptador.

Fuente: VeeR, (s.f).

2.6. SELECCIÓN DE MOTORES

Los motores brushless fueron elegidos por su gran eficiencia frente a los motores tradicionales, convirtiéndose a la vez, en los motores más populares en los últimos tiempos. Esta popularidad se debe a que elimina el gran problema de los motores eléctricos con escobillas, que es el rozamiento. El rozamiento produce una disminución del rendimiento, excesiva acumulación de calor, ruido y la necesidad de sustitución periódica del motor, que aumenta el precio del mantenimiento. Los motores Brushless acaban con estos problemas ya que, al eliminar las escobillas, se elimina el rozamiento, con lo que aumenta de manera significativa el rendimiento del motor.

2.6.1. VENTAJAS DEL MOTOR BRUSHLESS FRENTE AL MOTOR ELÉCTRICO CONVENCIONAL

La principal ventaja del motor Brushless sin escobillas frente al motor eléctrico convencional radica en relación al tipo de conmutación que realiza para la transferencia de la energía. El motor Brushless, al no utilizar escobillas, realiza la conmutación de forma electrónica. La consecuencia de esto es una mayor eficiencia del motor gracias a que se produce menor pérdida de calor y se produce una mejor disipación del mismo. Esto supone un aumento del rendimiento, ya que es necesario menos peso para poder obtener la misma potencia. (García, 2011, p. 37)

2.6.2. INSTALACIÓN DE LOS MOTORES BRUSHLESS

Los motores brushless fueron adquiridos de una compañía que diseña motores para bicicletas eléctricas, gracias a ello, el diseño se acopla fácilmente a los radios y llanta de la silla de ruedas ya antes mencionada, como se puede observar en la siguiente figura:



Figura 2.9. Motor Brushless acoplado a la llanta de la silla de ruedas.

El motor posee 36 ranuras listas para los respectivos radios. El diseño de este motor se puede acoplar a cualquier rueda y puede transmitir 250 Watts de potencia, dando una idea muy clara de la fuerza y velocidad que se puede obtener.

2.6.3. ACTIVACIÓN DEL GIRO EN AMBOS SENTIDOS DEL MOTOR BRUSHLESS

El inconveniente principal de utilizar este tipo de motores, es que ellos solo giran en un solo sentido, pues al ser utilizados en bicicletas el otro giro queda en desuso. Esto obligó a desmontar cada parte del motor y encontrar el lugar y pieza que hacen posible el bloqueo del otro giro, para después buscar la solución a ello.



Figura 2.10. Motor Brushless desmontado.

Una vez desmontado el motor, se percató que se trata de un sistema de engranajes epicicloidales¹⁶, y que el giro inverso queda bloqueado gracias a un rodamiento capaz de girar en un solo sentido, el cual, tuvo que ser soldado para así permitirle girar en ambos sentidos al resto del motor, como se puede observar en la siguiente figura:



Figura 2.11. Piñones montados en el rodamiento.

¹⁶ Engranajes epicicloidales o planetarios, consistente en uno o más engranajes externos o planetas que rotan sobre un engranaje central o sol.

Al lado izquierdo de la figura 2.11 se observa tres piñones montados en el rodamiento que hace posible el giro en un solo sentido; y en el lado derecho, se encuentra el rodamiento ya soldado, con el fin de lograr mover al rodamiento cuando el eje se mueva y así obtener los dos giros. Para ellos se utilizó suelda MIG¹⁷, y se procuró soldar en la parte más fija y sólida, para no debilitar al rodamiento.

2.6.4. CIRCUITO CONTROLADOR DE GIRO

Una vez montado cada una de las partes en su respectivo lugar, se realizó un circuito controlador de giro para cada uno de los motores; el mismo que consta principalmente de cuatro relés que contengan tres contactos abiertos, y que soporten corrientes de hasta 10 A.

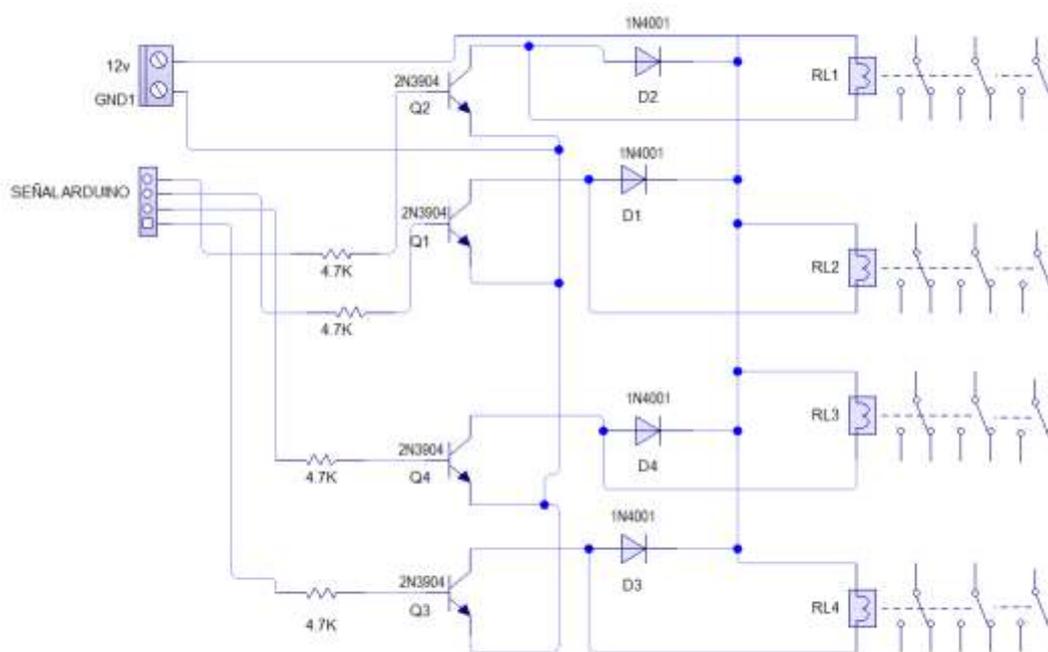


Figura 2.12. Circuito controlador de giro.

El control se lo realizará por medio de las salidas digitales de Arduino, el objetivo principal del circuito ya mencionado es cambiar el orden de dos de las tres líneas del motor, como se observa en la figura 2.13, cambiando así, el sentido de giro.

¹⁷ MIG: Soldadura por arco bajo gas inerte protector con electrodo consumible.

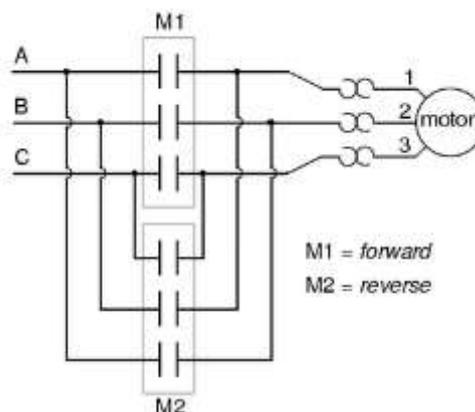


Figura 2.13. Cambio de giro del motor Brushless.

Fuente: Over, (2011).

2.6.5. SELECCIÓN DEL DRIVER PARA EL MOTOR BRUSHLESS

En la actualidad, existen diversos drivers construidos para el control de motores brushless tanto sensored como sensorless.

Como ya se mencionó anteriormente, los motores brushless sensored, utilizan sensores de efecto Hall para conocer la ubicación correcta del rotor, y así saber cuál es la secuencia de conmutación; en cambio, los motores brushless sensorless, utilizan otro tipo de lógica para su conmutación, como por ejemplo, por medio de la detección de la fuerza contraelectromotriz (BEMF) detallada en el capítulo anterior.

En el anexo G, se encuentra una recopilación de los drivers que hoy en día son utilizados para controlar motores brushless, ya sea, motores que utilicen sensores Hall, o que utilicen métodos para comprobar el cruce por cero de la fuerza contraelectromotriz.

Se puede observar, que dependiendo del fabricante, ofrecen diversos dispositivos dirigidos a las distintas aplicaciones utilizando BLDC, en esta ocasión, para la aplicación se utilizará el integrado MC33035, el cual se complementa, con la utilización de 6 transistores MOSFET, 3 de tipo P

(2SJ401), y 3 de tipo N (BUZ10); estos transistores, son los que permiten alimentar al motor en voltajes de 40V, siendo primordiales ya que se manejará corrientes superiores a las manejadas por el driver.

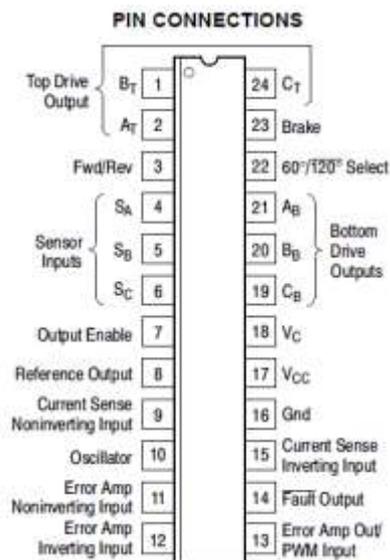


Figura 2.14. Distribución de pines del integrado MC33035.

Fuente: ON Semiconductor, (s.f).

El MC33035 es una segunda generación de alto rendimiento monolítica para controlar motores d.c. sin escobillas. Contiene todas las funciones activas requeridas para implementar un bucle abierto. Este dispositivo consta de un decodificador de posición del rotor para la secuenciación de la conmutación adecuada, así también, este recibe, una variación de voltaje de 0 a 4V, para variar la frecuencia y con ello la velocidad del motor, algunas características principales se las detalla a continuación:

- Alimentación para operar desde 10 a 30 V.
- Bloqueo por baja tensión.
- 6,25 V de referencia.
- Apagado térmico interno
- Selección de 60 ° / 300 ° o 120 ° / 240 °.
- Facilidad para integrar transistores de potencia y manejar corrientes superiores a las del integrado.

La etapa de potencia, tomando en cuenta a los transistores MOSFET se la puede observar en el siguiente gráfico:

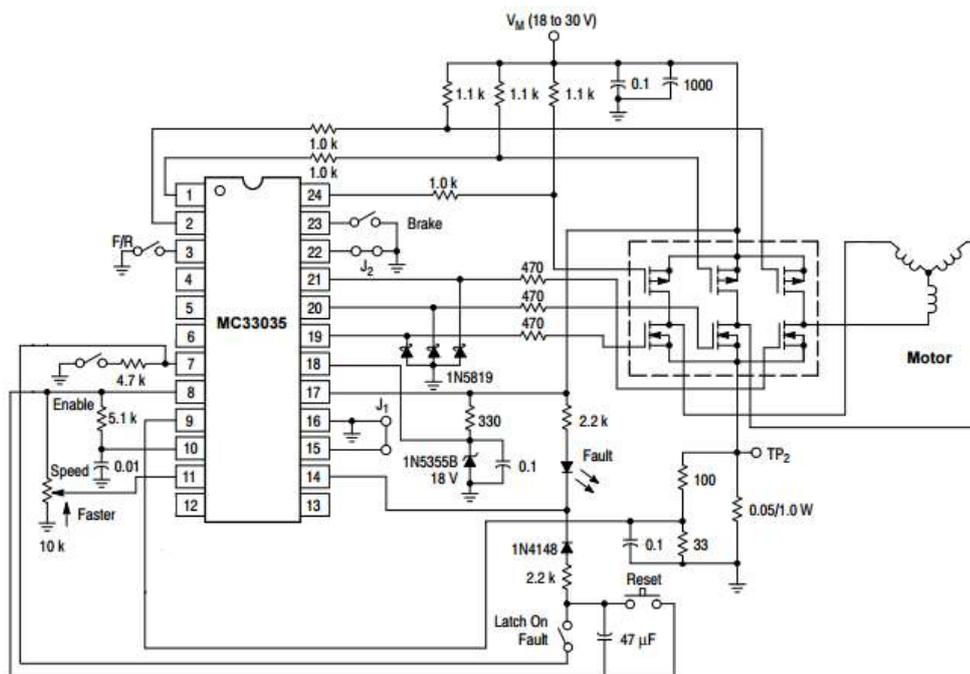


Figura 2.15. Conexión del Driver MC33035 con los transistores MOSFET

Fuente: ON Semiconductor, (s.f).

2.7. SELECCIÓN DEL SISTEMA DE FRENO

Con el fin de cuidar la integridad física del usuario, se ha optado en la implementación de frenos a cada rueda; estos frenos son utilizados normalmente en las bicicletas y por su facilidad de implementación se los colocará en la silla de ruedas. Se trata de unos frenos de llanta de accionamiento lateral, a los que por medio de un servomotor, se aplicará la fuerza necesaria para su activación.

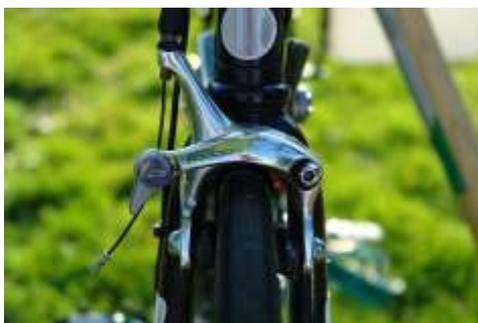


Figura 2.16. Freno de llanta de accionamiento lateral.

Fuente: flickr, (s.f).

2.7.1. SERVO MOTOR

Una vez realizada las pruebas pertinentes para conocer la capacidad necesaria para activar a cada freno, se ha optado en adquirir un servo motor de 50kgf.cm. A este servo motor se le ha implementado una polea de doble canal, en los cuales ira enrollado el cable de cada freno para posteriormente ser activado.



Figura 2.17. Servo motor con polea.

Las ventajas de utilizar un servo motor con dichas características son múltiples, ya que, a más de poseer una gran fuerza de torque en un tamaño reducido, sus engranes internos están hechos de metal, con lo que nos asegura un mayor tiempo de vida útil.

A este motor se lo puede alimentar, de 5V a 7V y es capaz de girar 6 vueltas en ambos sentidos, dando una gran facilidad de control y acoplamiento a la aplicación.

2.8. SELECCIÓN DE BATERÍAS

Para cumplir el requerimiento de 3 horas de autonomía expuesto en los objetivos, se ha procedido a calcular la capacidad de la batería necesaria para la aplicación, iniciando con los siguientes datos:

$$t_a = 3 \text{ horas}$$

$$C_c = 2.5 \text{ A.}$$

Eficiencia de la batería= 80% al 90%

$$C = t_a * C_c \quad \text{Ecuación 2.1}$$

$$C = 3 h * 2.5 A \quad \text{Ecuación 2.2}$$

$$C = 7.5Ah \quad \text{Ecuación 2.3}$$

Siendo C la capacidad de la batería en amperios-hora, t_a el tiempo de autonomía y C_c la corriente consumida.

Se toma como eficiencia el 85%, con el fin de tener un margen de eficiencia promedio, dando así los siguientes resultados:

$$C = 7.5Ah/0.85 \quad \text{Ecuación 2.4}$$

$$C = 8.8 Ah \quad \text{Ecuación 2.5}$$

Sabiendo que la velocidad de descarga es lenta, nos queda el siguiente resultado:

$$C = 8.8 Ah/0.8 \quad \text{Ecuación 2.6}$$

$$C = 11Ah \quad \text{Ecuación 2.7}$$

Por lo tanto, se necesita 11 Ah para hacer funcionar la silla de ruedas por 3 horas con una corriente promedio de 2.5 A.

Cabe decir, que en la aplicación se utilizó dos baterías de 10Ah, colocadas en paralelo, con el fin de asegurar el correcto funcionamiento dentro del tiempo previsto, y cubrir las variaciones de corriente debido a la influencia del peso del paciente.

Es por eso, que se adquirió baterías de ion litio, cuyas características se detallan a continuación:

<p>Tipo: BT</p> <p>Voltaje: 36 V</p> <p>Ah: 10 Ah</p> <p>Medidas: 32*10 cm</p> <p>Peso: 2.10 Kg</p> <p>Autonomía: 45-55 km</p>	
--	--

Figura 2.18. Características de las baterías seleccionadas.

Al ser una batería para aplicación de bicicletas, la autonomía calculada por el fabricante está dada en condiciones normales de trabajo con apoyo promedio de pedaleo del usuario en una zona llana y puede variar en función del usuario, tipo del terreno, climatología, etc.

CAPÍTULO 3

3. DISEÑO DEL SOFTWARE

Para la ejecución del movimiento de la silla de ruedas, se ha dispuesto una secuencia lógica, como la que se describe a continuación:

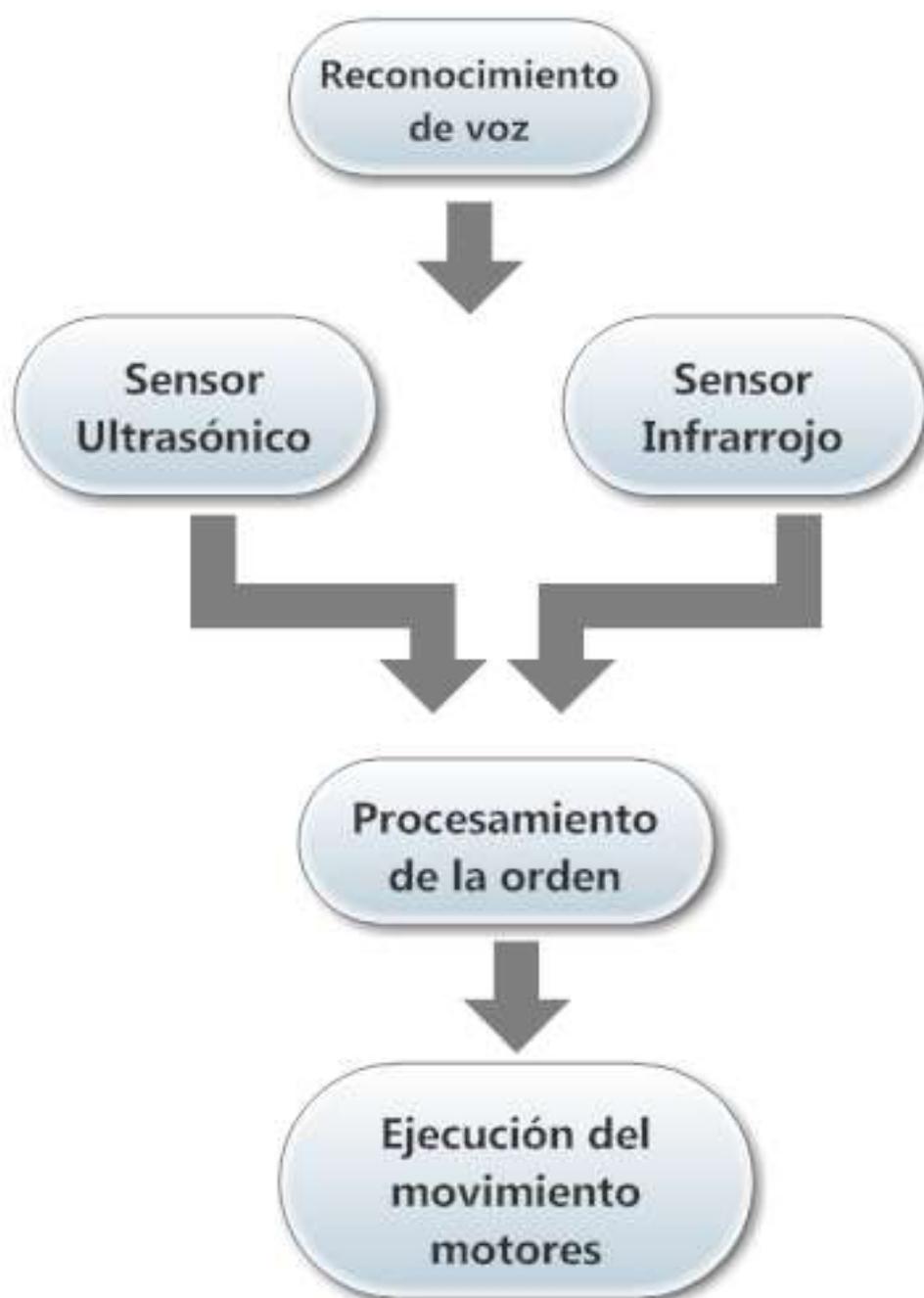


Figura 3.1. Diagrama de bloques del programa en general.

3.1. FLUJOGRAMA DEL PROGRAMA DE LOS SENSORES INFRARROJOS

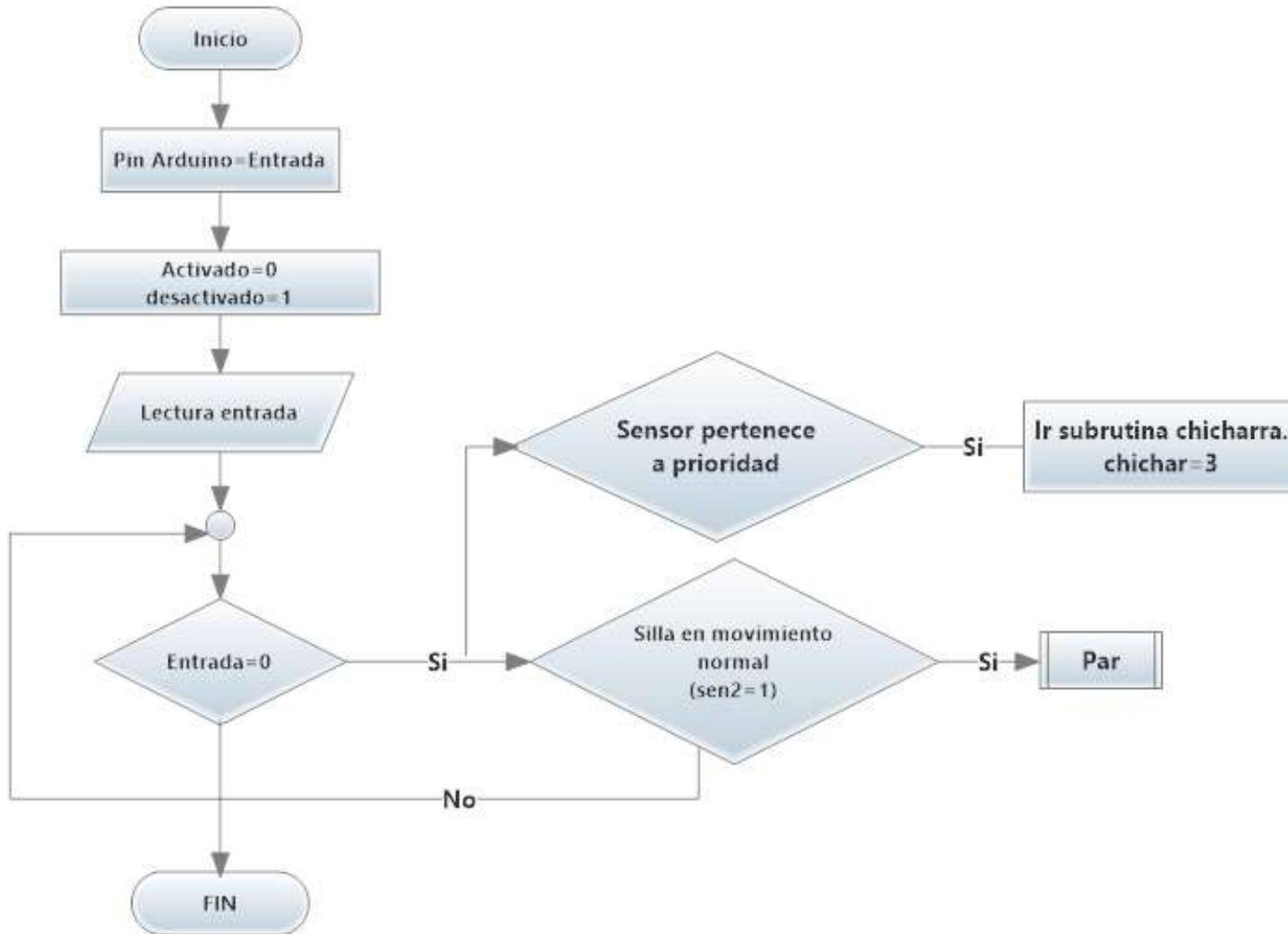


Figura 3.2. Flujoograma de sensores infrarrojos.

3.2. FLUJOGRAMA DEL PROGRAMA DE LOS SENSORES ULTRASÓNICOS

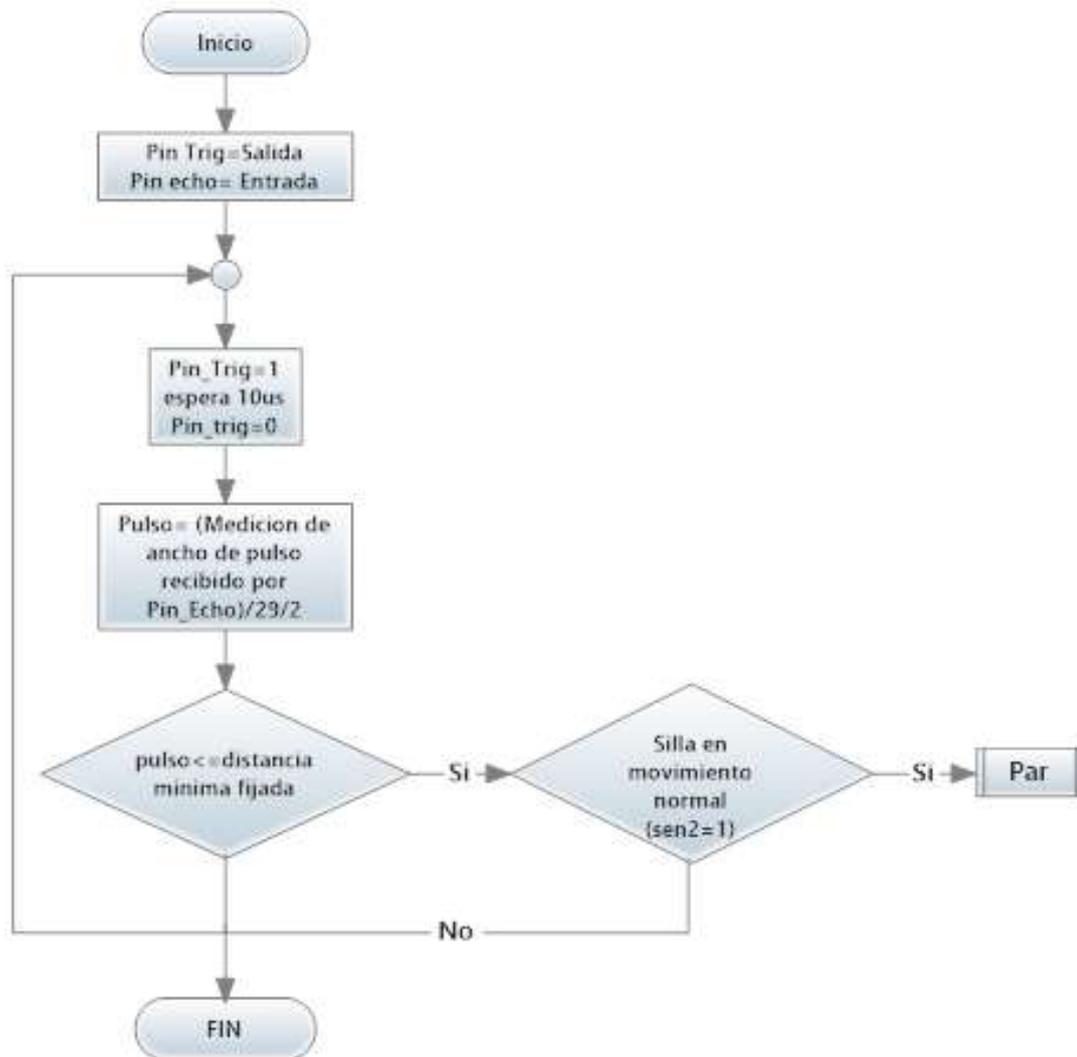


Figura 3.3. Flujograma de los sensores ultrasónicos.

3.3. FLUJOGRAMA DEL PROGRAMA DEL MÓDULO DE RECONOCIMIENTO DE VOZ

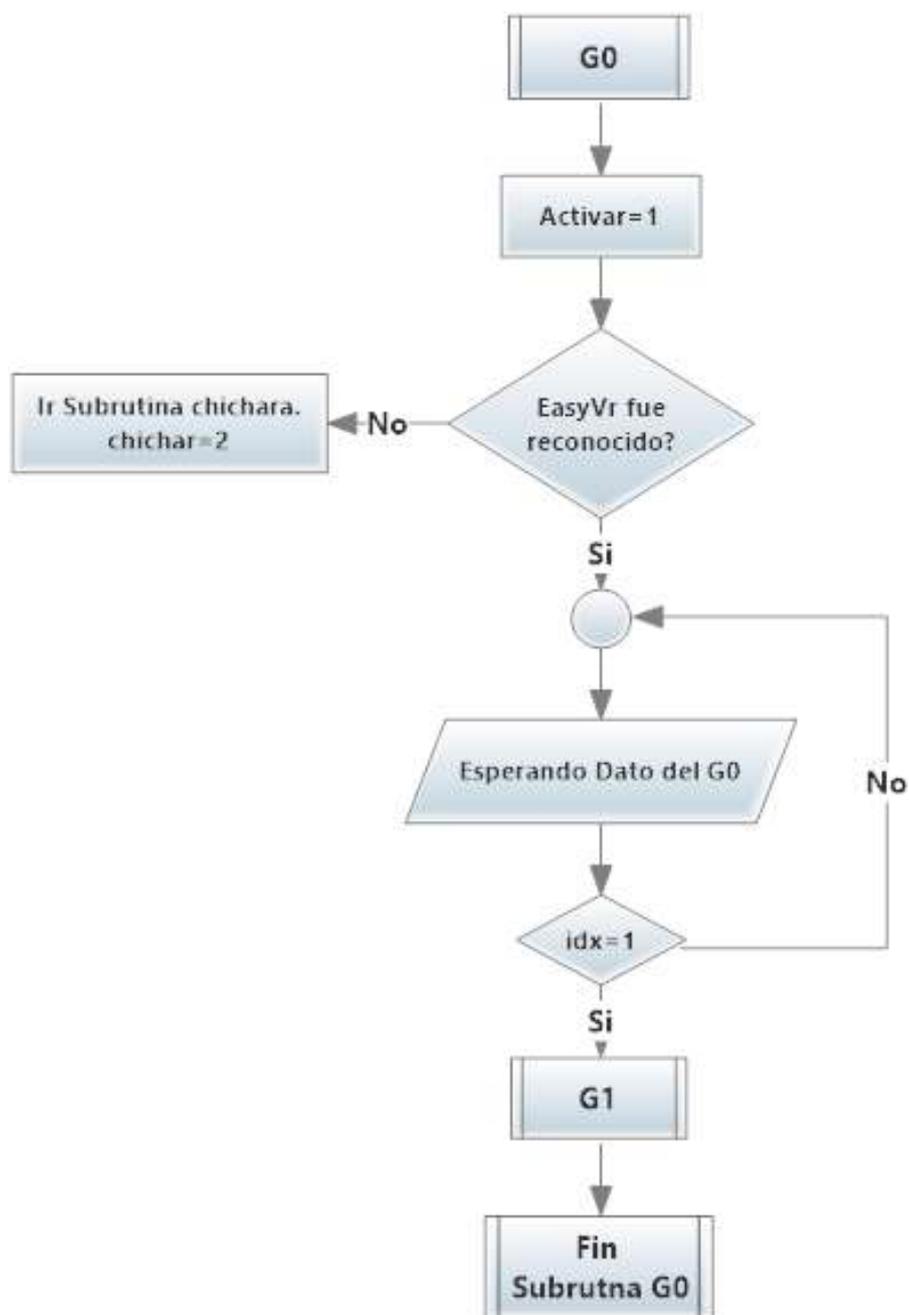


Figura 3.4. Flujograma de la subrutina Grupo 0 del módulo de reconocimiento de voz.

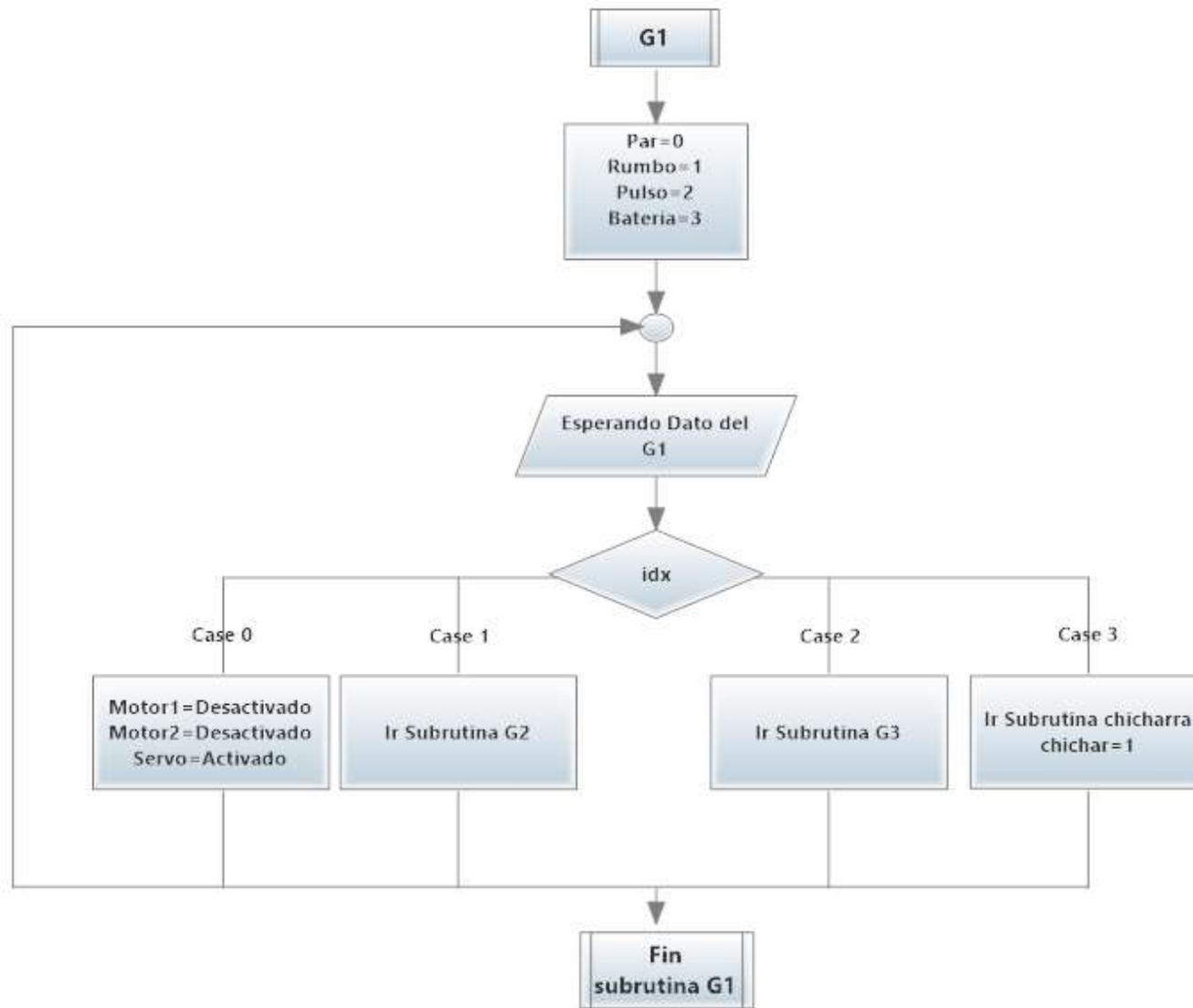


Figura 3.5. Flujograma de la subrutina Grupo1 del módulo de reconocimiento de voz.

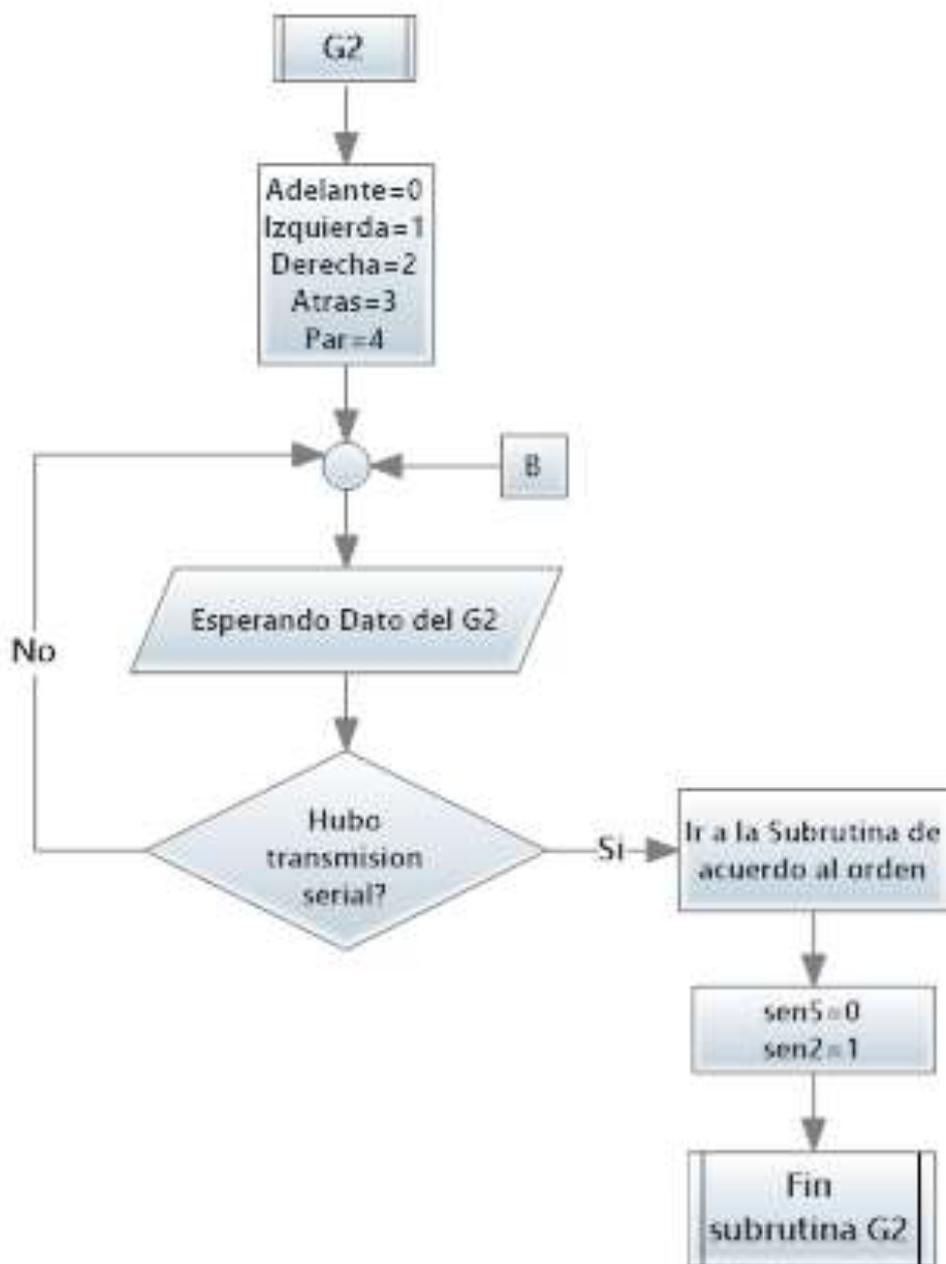


Figura 3.6. Flujograma de la subrutina Grupo2 del módulo de reconocimiento de voz.

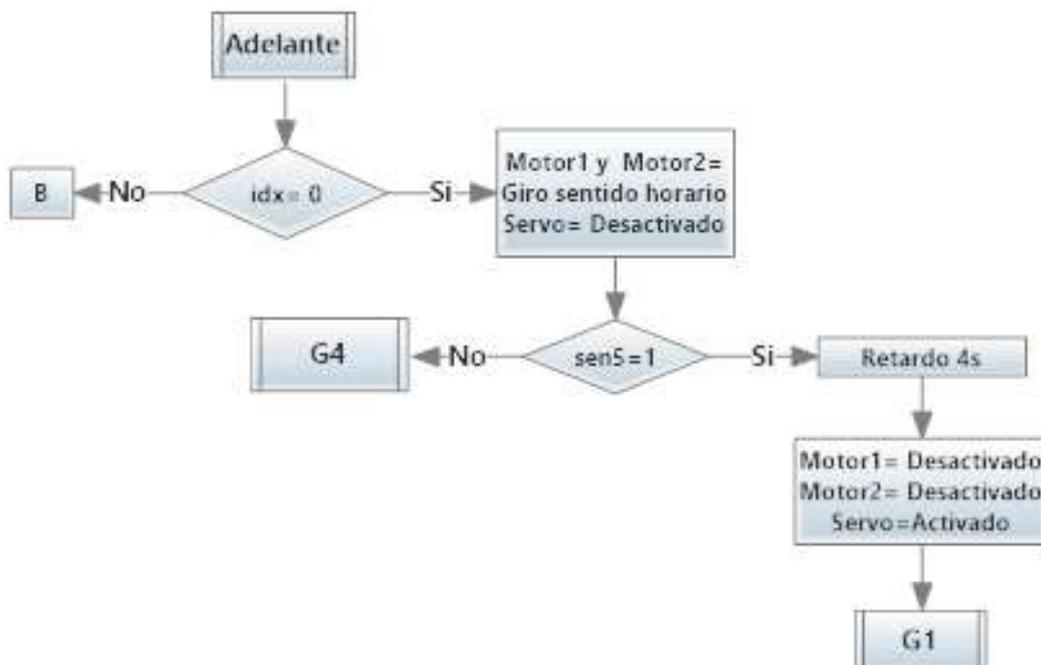


Figura 3.7. Flujograma de la subrutina adelante.

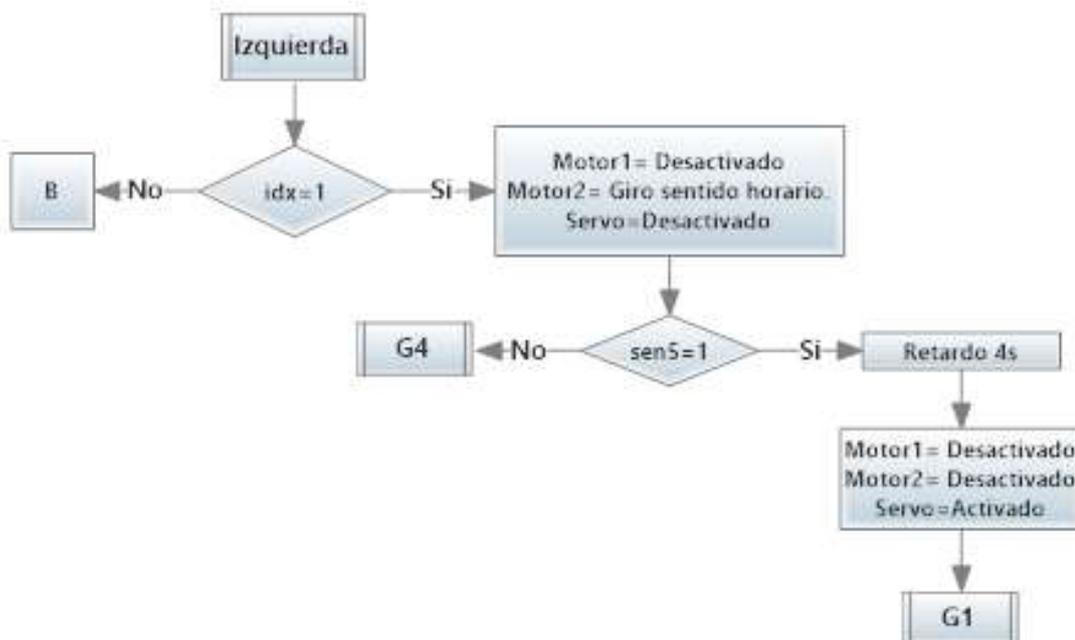


Figura 3.8. Flujograma de la subrutina izquierda.

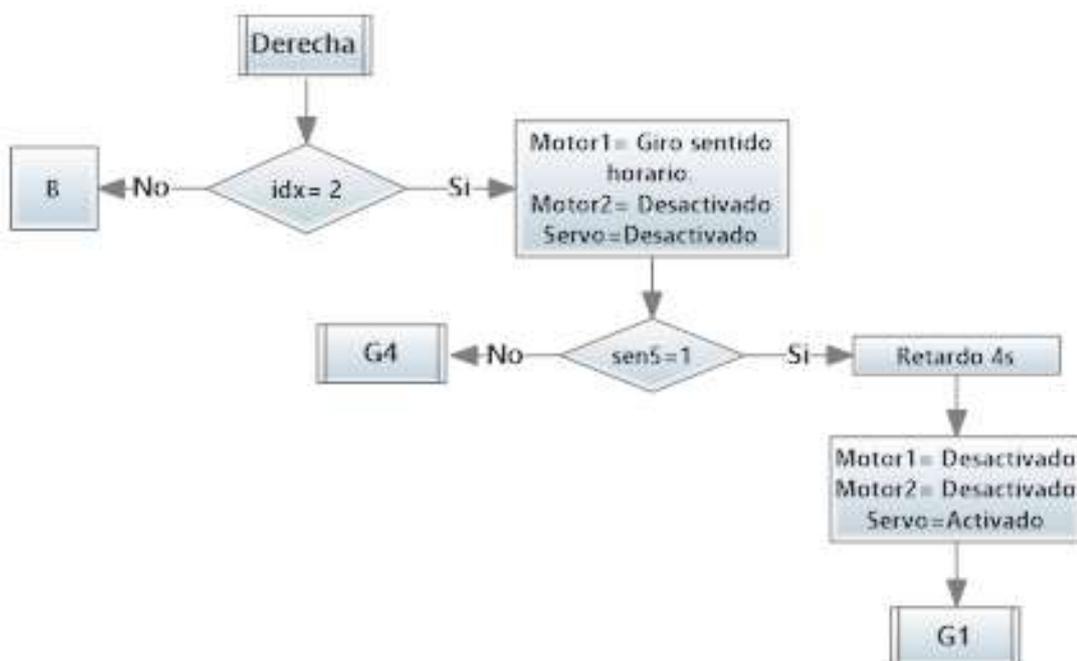


Figura 3.9. Flujograma de la subrutina derecha.

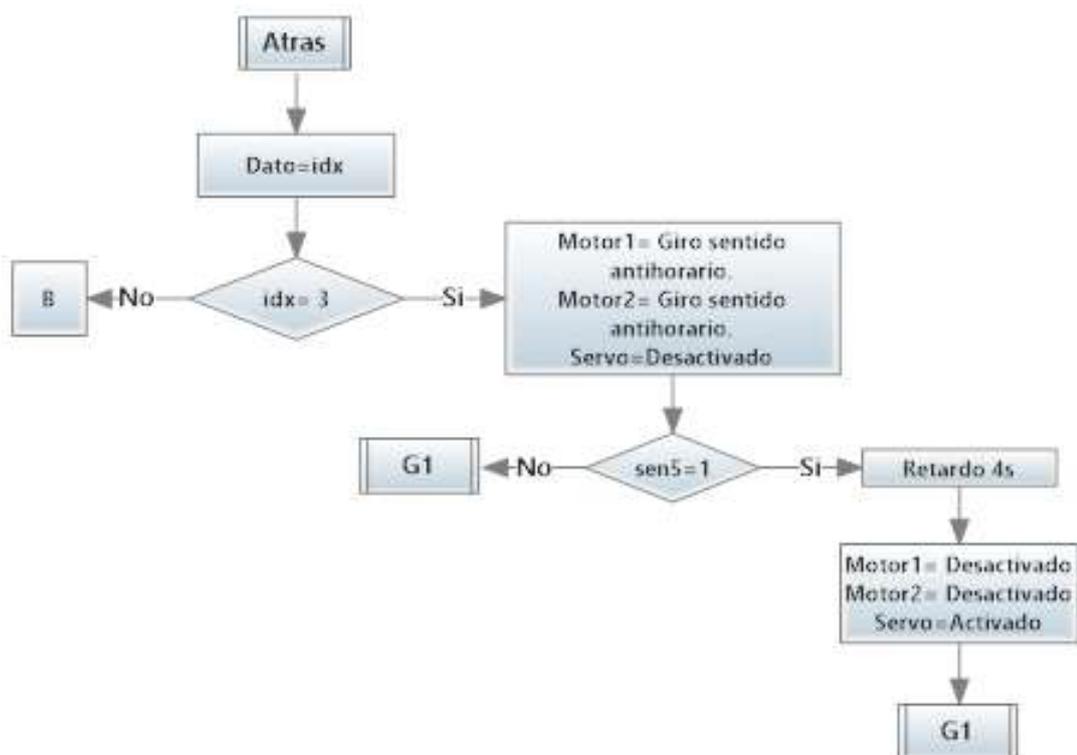


Figura 3.10. Flujograma de la subrutina atrás.

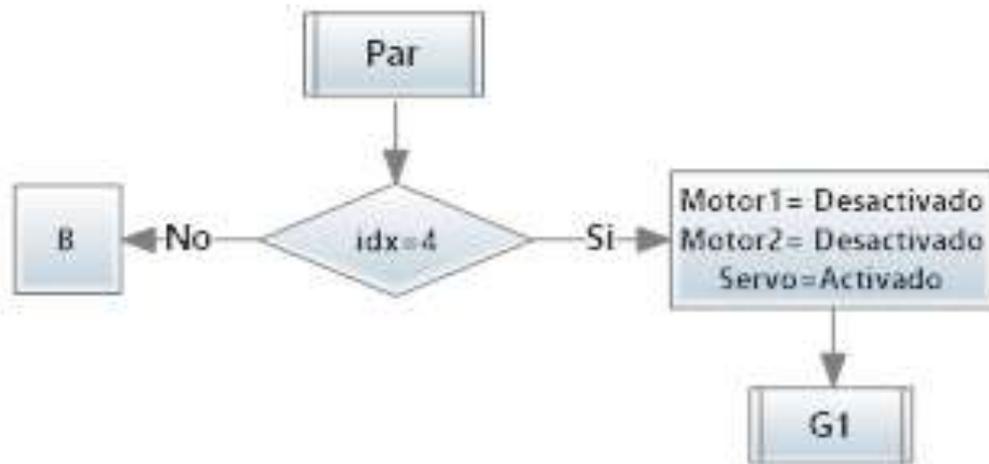


Figura 3.11. Flujograma de la subrutina paro.

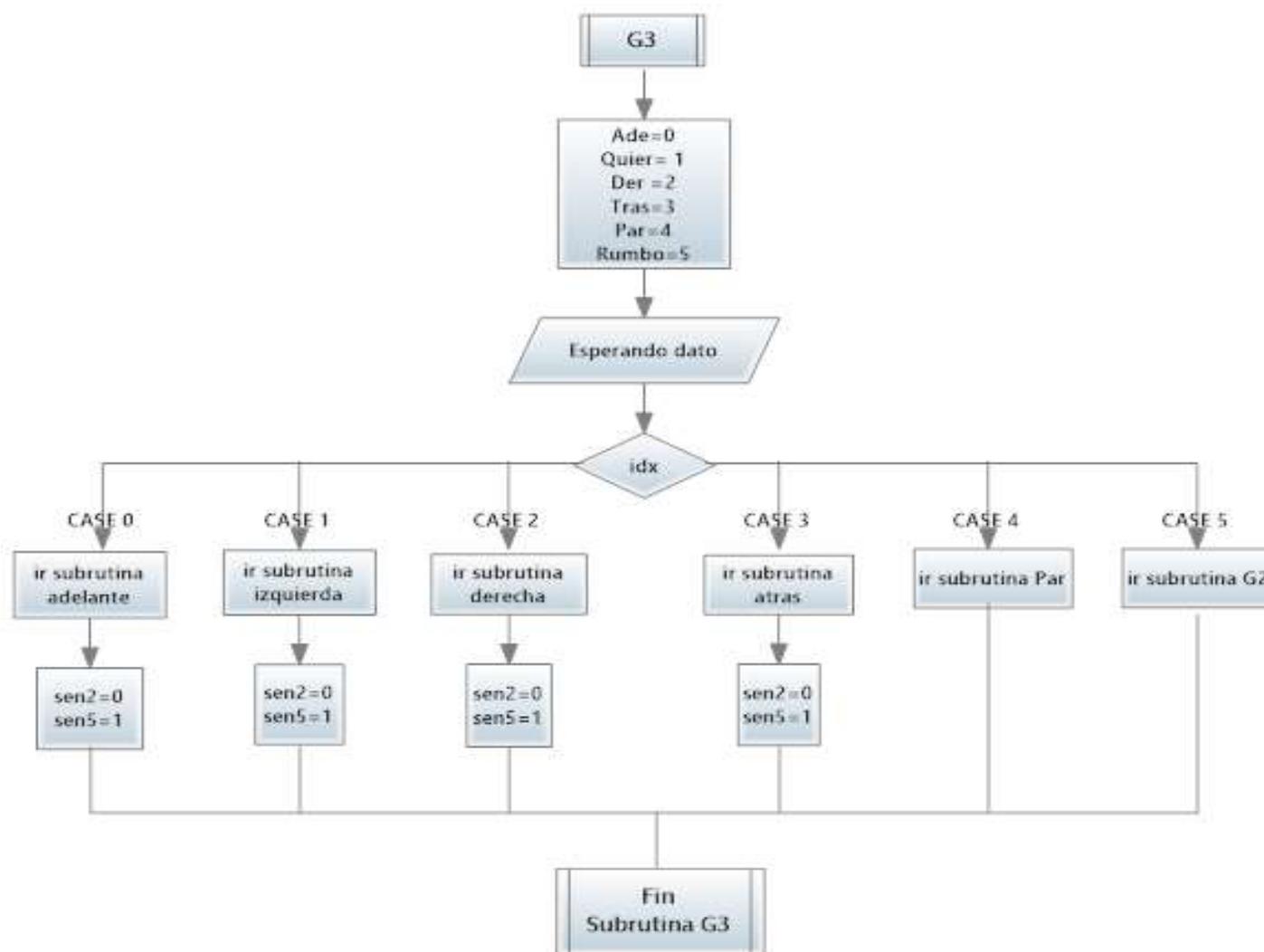


Figura 3.12. Flujograma de la subrutina Grupo3 del módulo de reconocimiento de voz.

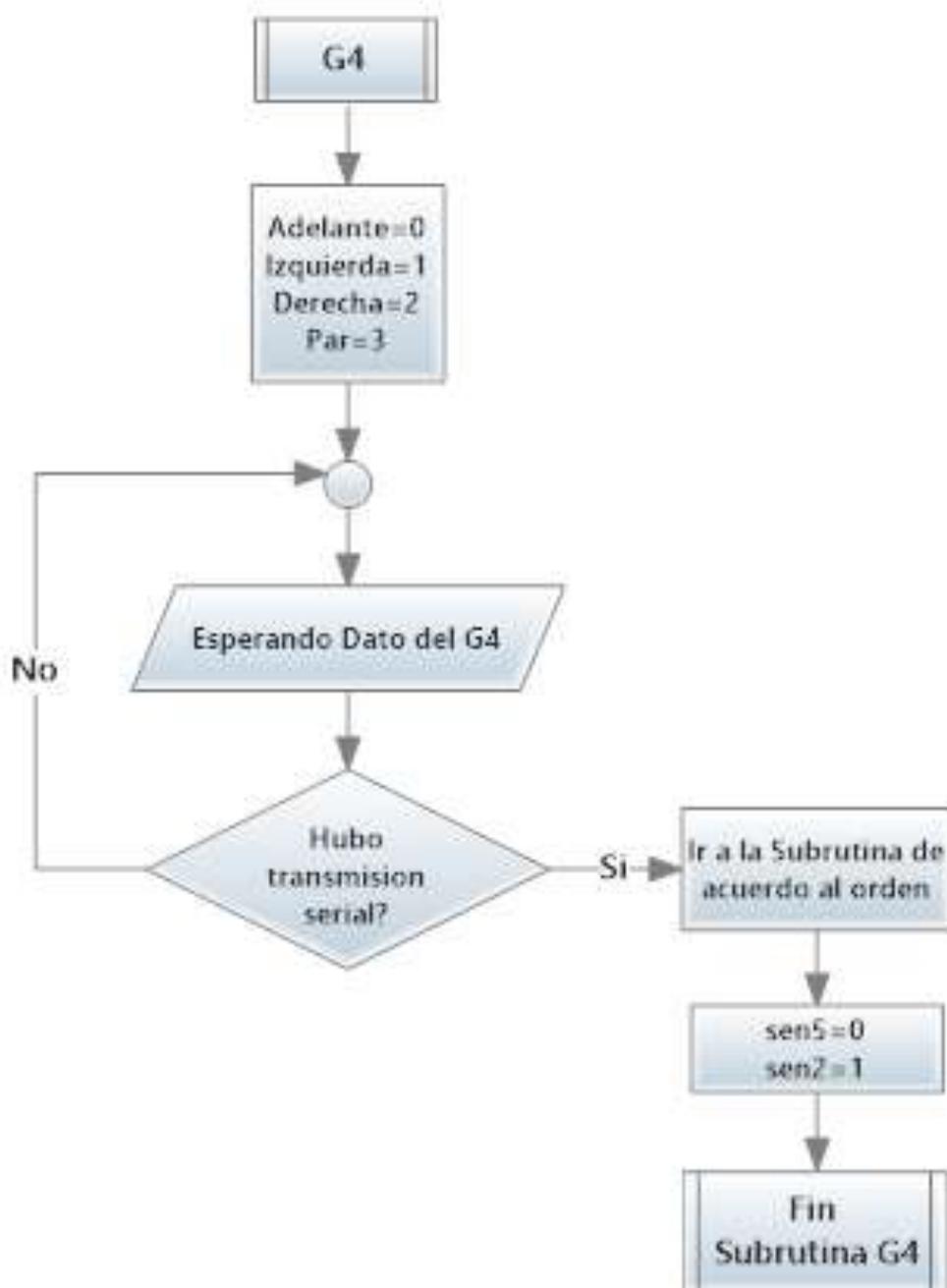


Figura 3.13. Flujograma de la subrutina Grupo4 del módulo de reconocimiento de voz.

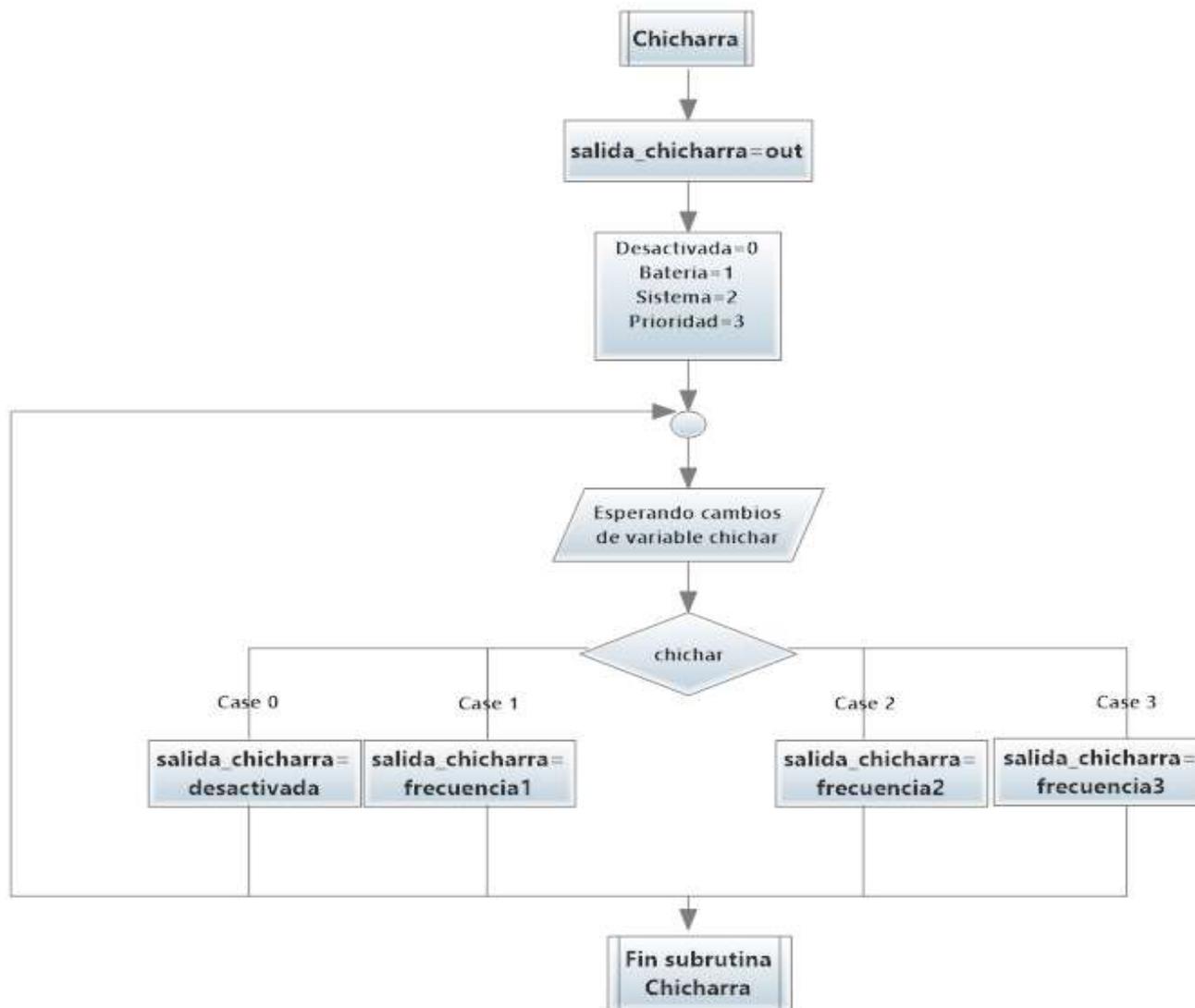


Figura 3.14. Flujograma de la subrutina Chicha (Chicharra).

3.3.1. PROGRAMA DE APLICACIÓN DEL MÓDULO DE RECONOCIMIENTO DE VOZ EASY VR

El módulo de reconocimiento de voz EasyVR para ser configurado cuenta con la ayuda del software EasyVR Commander, el cual se lo puede descargar de manera gratuita y actualmente se encuentra disponible la versión 3.3.7; en este programa se puede ingresar los comandos a reconocer, entrenar el reconocimiento de voz, cargar tabla de sonidos de salida y generar el programa en lenguaje C, compatible con algunos microcontroladores y la plataforma Arduino.

3.3.1.1. Creación de comandos a través de EasyVR Commander v3.3.7

Para realizar esta acción y todas las nombradas anteriormente con este software, es necesario que el módulo de reconocimiento de voz esté conectado con la plataforma Arduino en modo bootloader, especificado en el Anexo J.

Al conectar el Arduino a la PC se genera un puerto COM, el mismo que se debe sincronizar con el programa EasyVR Commander.

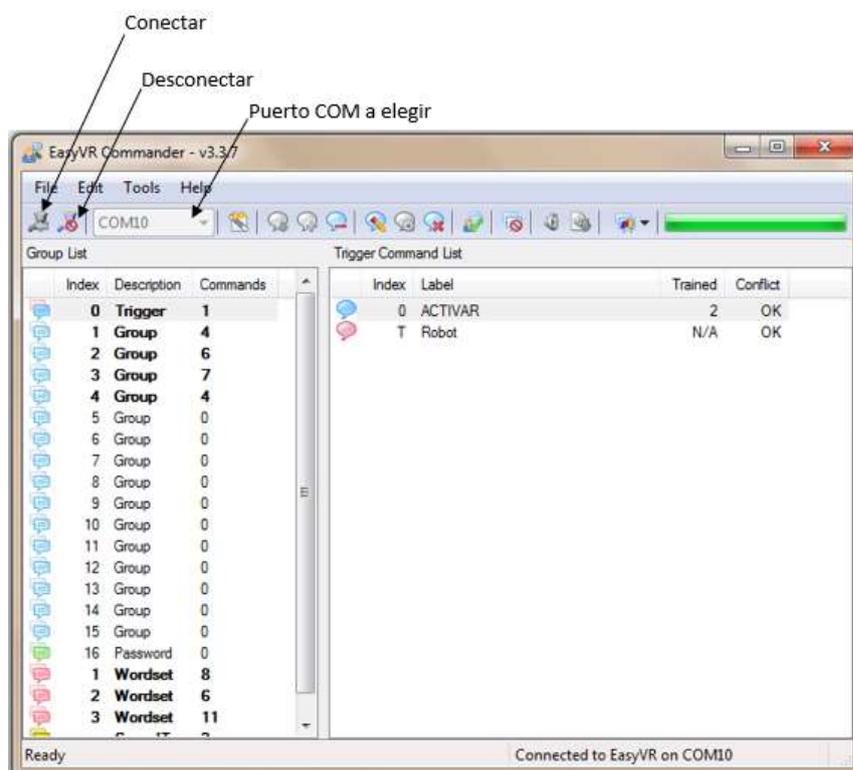


Figura 3.15. Conexión del módulo EasyVR con el Software EasyVR Commander.

Una vez realizada esta acción, se procede a insertar los comandos de voz deseados.

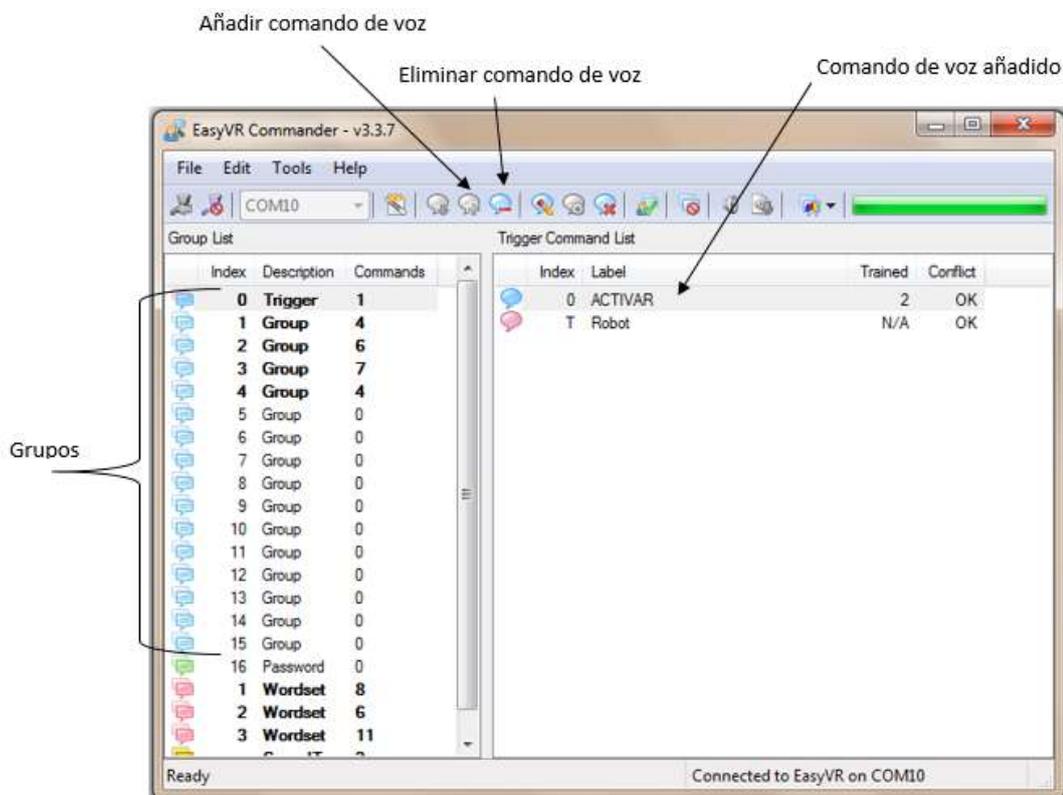


Figura 3.16. Inserción de comandos de voz.

Esta inserción se puede realizar en diferentes grupos (0-15); dichos grupos cuentan con prioridad, es decir, las palabras que se encuentren en el grupo 0 tienen la máxima prioridad y las del grupo 15 la mínima.

Es así que para llegar a un comando del grupo 3, primero se debe decir una palabra del grupo 1 seguida de una del grupo 2 y finalmente el comando requerido del grupo 3.

Grupos **Comandos añadidos**

Group List			Trigger Command List			
Index	Description	Commands	Index	Label	Trained	Conflict
0	Trigger	1	0	ACTIVAR	2	OK
1	Group	4	T	Robot	N/A	OK
2	Group	6				

Group List			Group 1 Command List			
Index	Description	Commands	Index	Label	Trained	Conflict
0	Trigger	1	0	PAR	0	OK
1	Group	4	1	RUMBO	2	OK
2	Group	6	2	PULSO	2	OK
3	Group	7	3	BATERIA	2	OK

Group List			Group 2 Command List			
Index	Description	Commands	Index	Label	Trained	Conflict
0	Trigger	1	0	ADELANTE	2	OK
1	Group	4	1	IZQUIERDA	2	OK
2	Group	6	2	DERECHA	2	OK
3	Group	7	3	ATRAS	2	OK
4	Group	4	4	PAR	2	OK
5	Group	0	5	MARCHA	2	OK

Group List			Group 3 Command List			
Index	Description	Commands	Index	Label	Trained	Conflict
0	Trigger	1	0	ADE	2	OK
1	Group	4	1	QUIER	2	OK
2	Group	6	2	DER	2	OK
3	Group	7	3	TRAS	2	OK
4	Group	4	4	PAR	2	OK
5	Group	0	5	RUMBO	2	OK
6	Group	0	6	SIGUE	2	OK

Group List			Group 4 Command List			
Index	Description	Commands	Index	Label	Trained	Conflict
0	Trigger	1	0	IZQUIERDA	2	OK
1	Group	4	1	DERECHA	2	OK
2	Group	6	2	ADELANTE	2	OK
3	Group	7	3	PAR	2	OK
4	Group	4				

Figura 3.17. Comandos añadidos en cada grupo.

3.3.1.2. Entrenamiento de comandos a través de EasyVR Commander v3.3.7

Es necesario entrenar a los comandos ingresados, para que así el módulo de reconocimiento de voz no tenga problemas al reconocer e identificar los comandos.

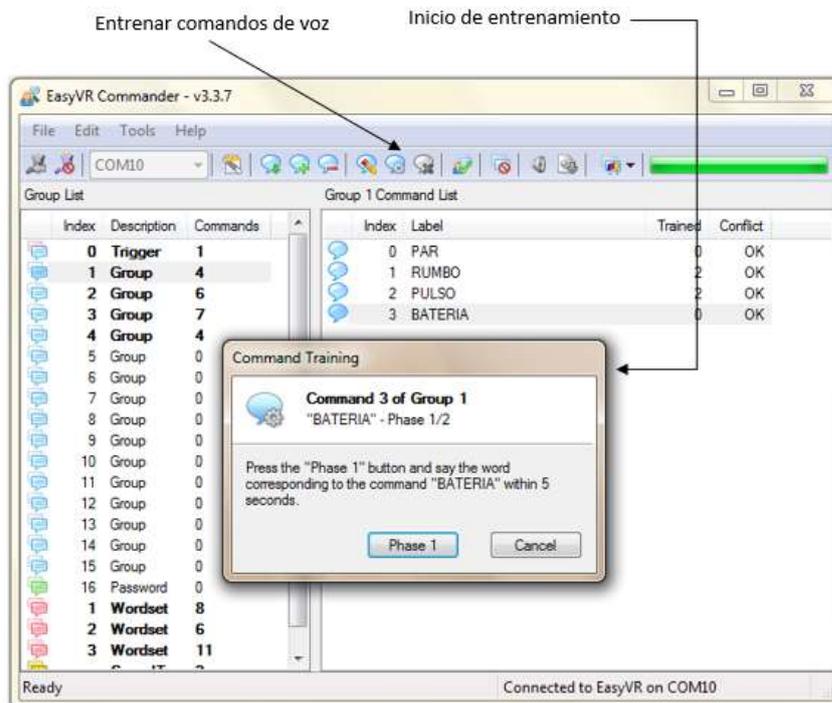


Figura 3.18. Entrenamiento de comando de voz.

El software pide entrenar al comando de voz dos veces, después de esto se debe verificar que en cada comando en la columna de "trained" aparezca el número dos, esto quiere decir que el comando de voz ha sido entrenado correctamente.

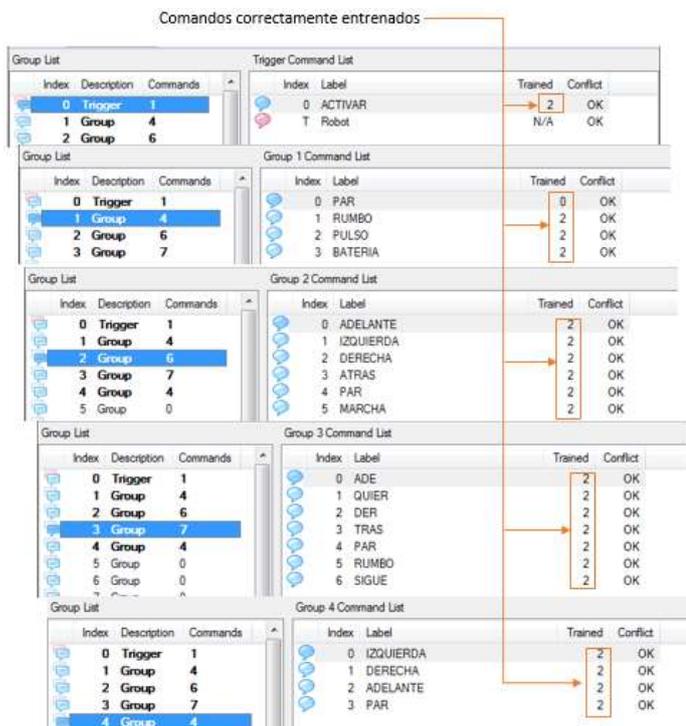


Figura 3.19. Verificación del correcto entrenamiento de los comandos de voz.

Después de esta verificación, se procede a testear el grupo, para constatar que el módulo de reconocimiento de voz lo esté detectando.

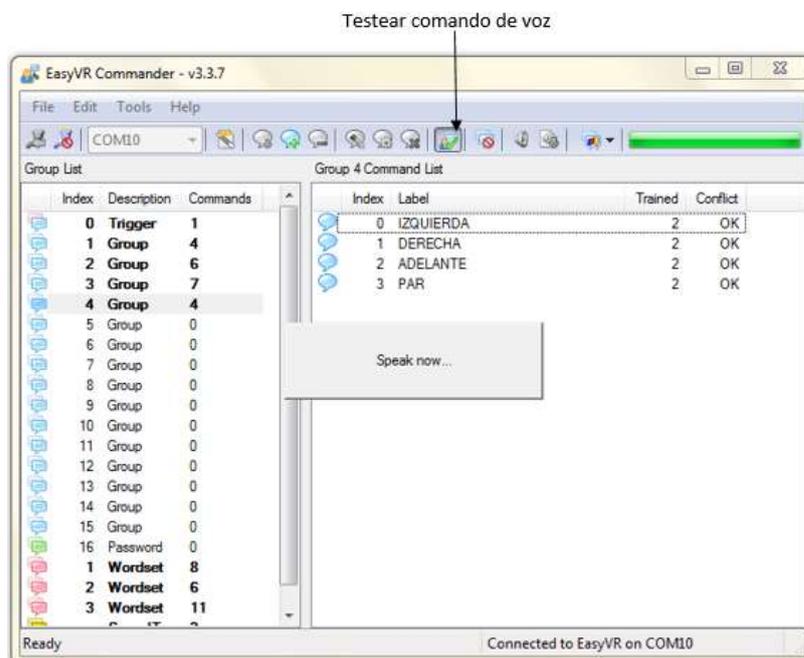


Figura 3.20. Testeado de los comandos de voz.

Si existe algún problema con el reconocimiento de voz presenta el mensaje de la siguiente figura, este problema se puede dar por la existencia de mucho ruido alrededor, micrófono no transmite o por no decir la palabra con la misma fonética con la que se realizó el entrenamiento.

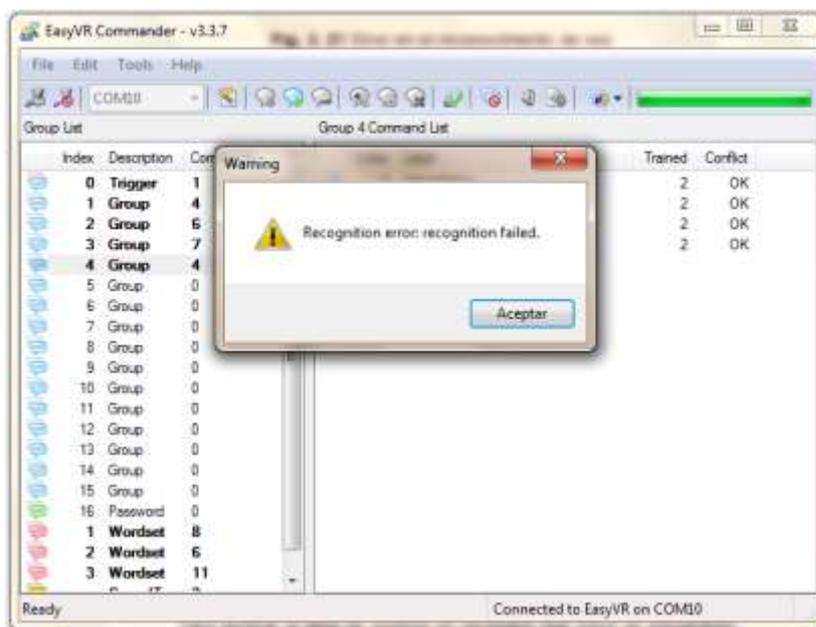


Figura 3.21. Error en el reconocimiento de voz.

3.3.1.3. Creación de mensajes de voz con el software Sensory QuickSynthesis5

Para generar la tabla de sonidos es necesario que estos se encuentren en formato. WAV a 22050 Hz, 16 bits, monofónicos.

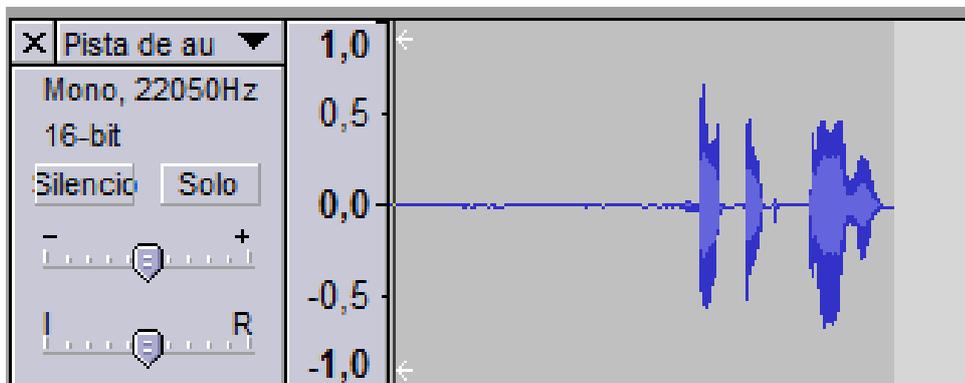


Figura 3.22. Edición del archivo de audio.

Se procede a crear un nuevo proyecto como se indica a continuación y se añade los archivos. WAV que se creó:

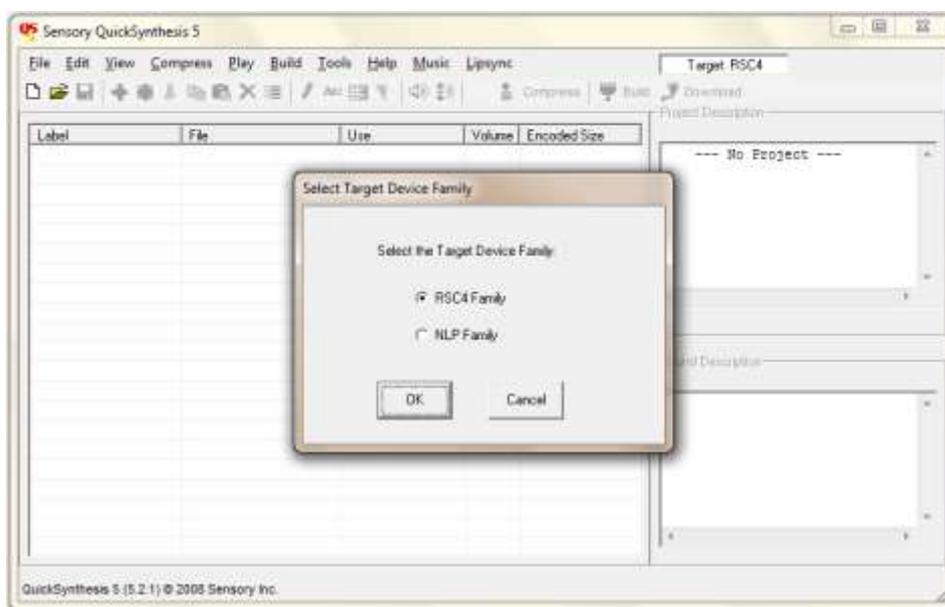


Figura 3.23. Creación de un nuevo proyecto en el software Sensory QuickSynthesis5.

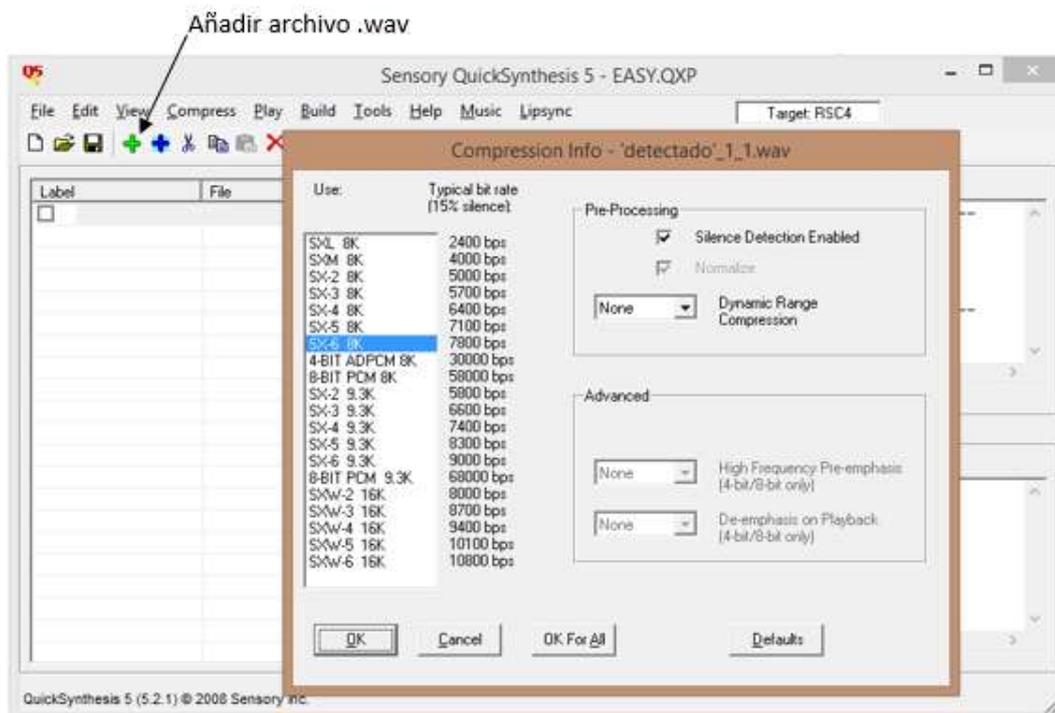


Figura 3.24. Añadir archivos .WAV.

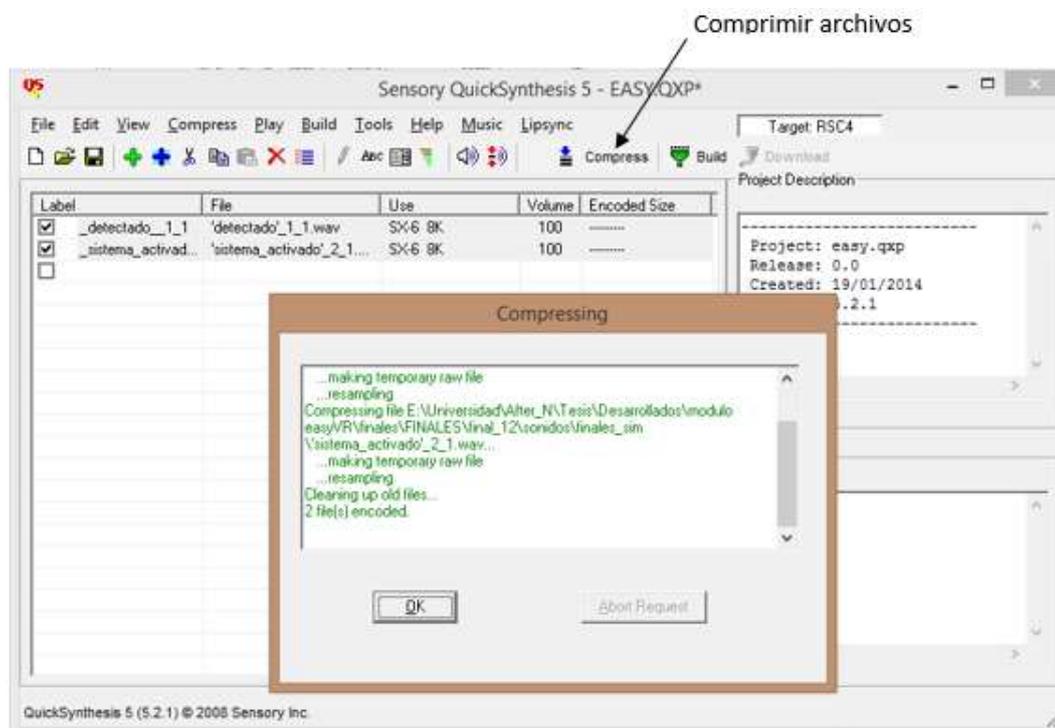


Figura 3.25. Compresion de archivos . WAV.

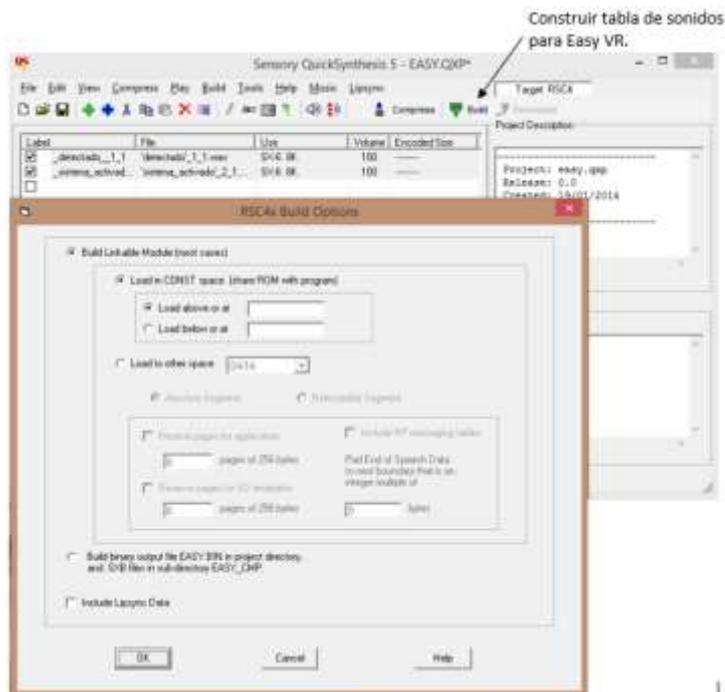


Figura 3.26. Construcción de tabla de sonidos para el EasyVR.

3.3.1.4. Importación de tabla de sonidos al software EasyVR Commander v3.3.7

Para importar la tabla al EasyVR es necesario conectar el PIN Xm del módulo del reconocimiento de voz a 3.3v.

Se conecta el Arduino a la PC sin sincronizar el puerto COM del Arduino con el del software EasyVR Commander v3.3.7 y se procede de la siguiente manera:

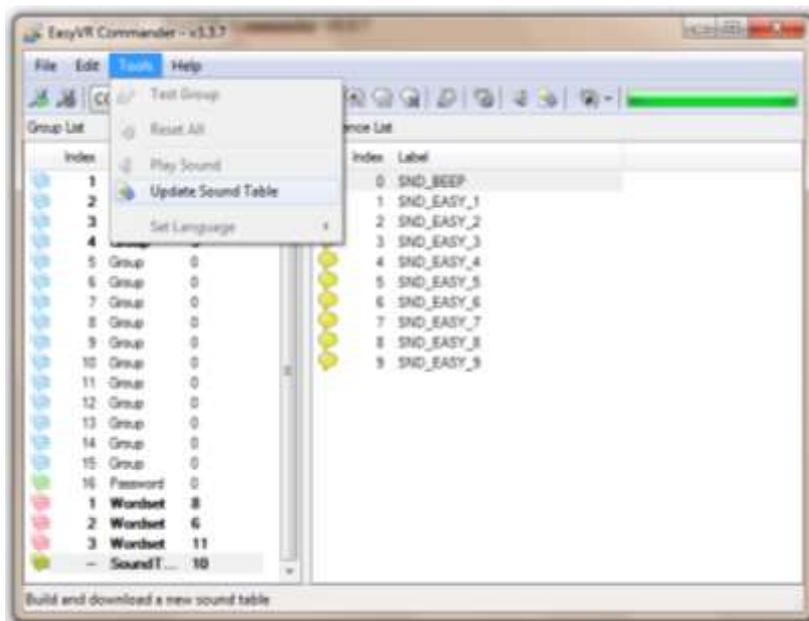


Figura 3.27. Subir tabla de sonidos al módulo de reconocimiento de voz.

Buscar la dirección de la carpeta en donde se guardó la construcción de la tabla de sonidos la cual se efectuó en el software Sensory QuickSynthesis5.

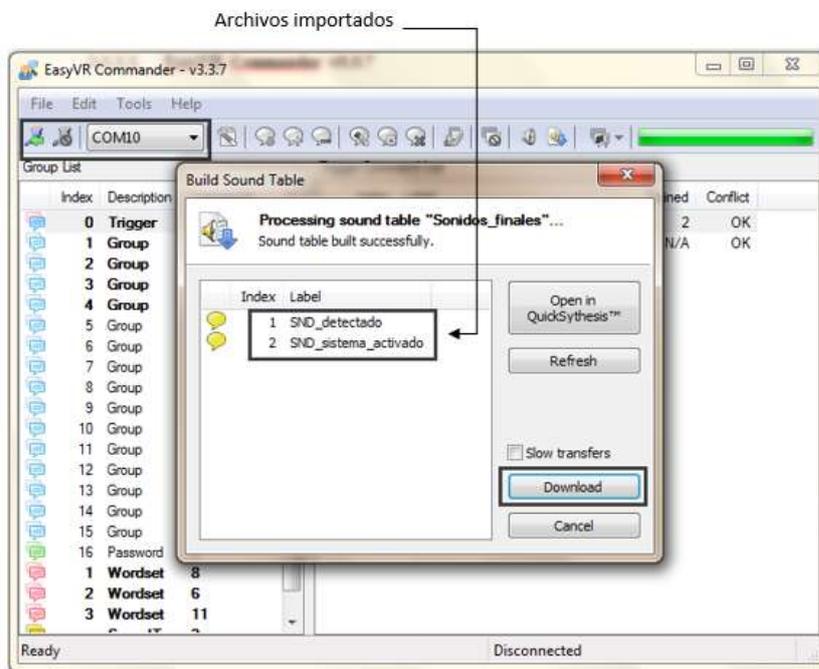


Figura 3.28. Subir tabla de sonidos al módulo de reconocimiento de voz.

Después de este proceso, se procede a desconectar el pin Xm del módulo de reconocimiento de voz de los 3.3v y se sincroniza el puerto COM con el software EasyVR Commander.

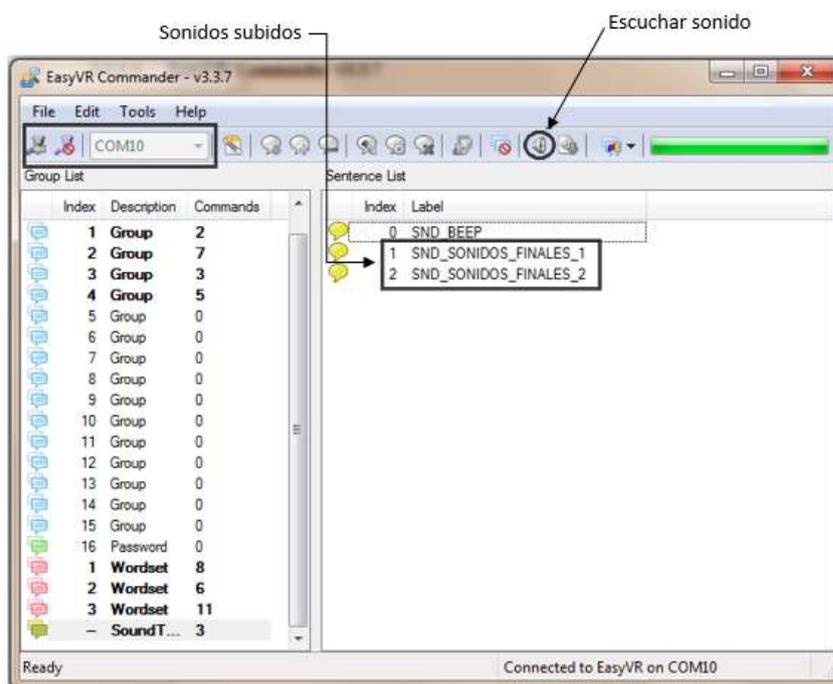


Figura 3.29. Actualización de la tabla de sonidos.

3.4. FLUJOGRAMA DEL PROGRAMA DEL SERVOMOTOR

A continuación se muestra el Flujograma de trabajo del servo motor, el mismo que, actúa como parte del sistema de frenado de la silla de ruedas como se explicó en capítulos anteriores:

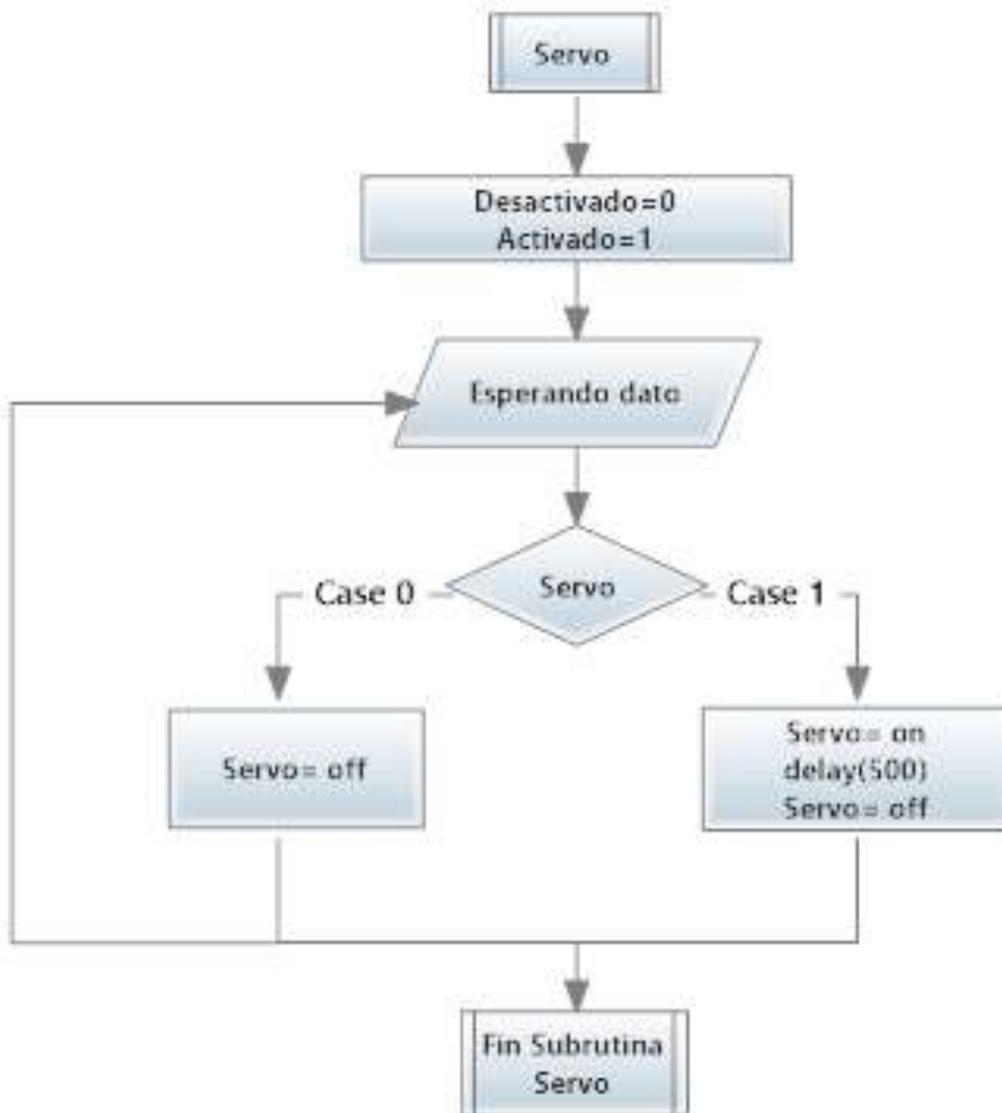


Figura 3.30. Flujograma de la subrutina del servomotor.

CAPÍTULO 4

4. ANÁLISIS MATEMÁTICO DEL SISTEMA

4.1. CONSTRUCCIÓN DEL MOTOR BRUSHLESS

La construcción del motor brushless es muy similar a la de cualquier motor eléctrico, cuenta principalmente con un estator, rotor y carcasa. El estator contiene varias bobinas por cada devanado de fase, distribuidas en ranuras alrededor de él, en este proyecto, el MB cuenta con 6 bobinas por cada fase distribuidas en 18 ranuras, dando un total de 6 polos y se obtiene de esta manera un avance de 20° por cada paso.

El rotor cuenta con uno o varios imanes permanentes con la intención de generar el campo magnético del rotor. La vida útil de estos imanes se ve afectada por temperaturas elevadas o por la presencia de un campo magnético externo mucho mayor que el de los imanes. Los materiales más utilizados para la construcción de rotores son el Neodimio-Hierro-Boro ($Nd_2Fe_{14}B$) y Samario de cobalto (Sm_1Co_5 y Sm_2Co_{17}), debido a que proporciona un alto par, alta densidad de potencia, eficacia y controlabilidad.

Por otro lado, la carcasa tiene como objetivo principal de proteger contra el medio ambiente y corrosión al motor, además, sobre la carcasa se montan los soportes del eje del motor y dispositivos de medición como por ejemplo un tacómetro para medir la velocidad.

El MB conceptualmente tiene una estructura como la mostrada en la figura 4.1. Aquí se muestra un motor de 6 polos y 3 fases; los devanados (a,b,c) son idénticos pero separados entre sí 120° ($2\pi/3$ radianes), cada uno con N_s vueltas y resistencia r_e , para nuestro análisis se asume que los devanados del estator están distribuidos senoidalmente. Los devanados del estator generan campos magnéticos, estos se representan como (ejes a, b y c) y los ejes magnéticos de rotor (ejes q y d). La salida de corrientes se la representa por cruces y la entrada como puntos (Langarica, 2010).

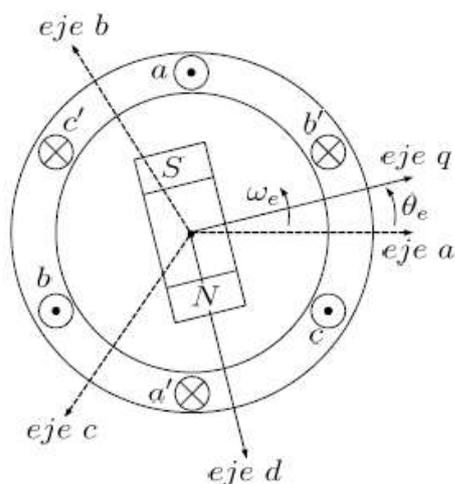


Figura 4.1. Sección transversal de MB.

Fuente: Langarica, (2010).

El motor se alimenta de los voltajes trifásicos aplicados a los devanados del estator, estos voltajes crean un campo magnético giratorio con una velocidad angular ω_e dada por:

$$\omega_e = 2\pi f \quad \text{Ecuación 4.1}$$

donde f es la frecuencia de los voltajes en Hz, ahora ω_e se relaciona con la velocidad angular mecánica ω_m con:

$$\omega_e = n_p \omega_m \quad \text{Ecuación 4.2}$$

con n_p como el número de pares de polos. De esta última expresión se puede decir que los motores con pocos pares de polos se utilizan para velocidades elevadas y los que cuentan con muchos pares de polos en aplicaciones de bajas velocidad.

Si se desea conocer las revoluciones por minuto (rpm) del rotor n_m , se tiene la siguiente expresión:

$$n_m = \frac{60 \cdot f}{n_p}, \quad \text{Ecuación 4.3}$$

De aquí se deduce que después del arranque el rotor gira la velocidad n_m . En la operación el número de pares de polos no se puede modificar, entonces para variar la velocidad del rotor sólo hace falta variar la frecuencia de los voltajes aplicados, esto se cumple desde la operación en vacío hasta la carga

máxima admisible por el MB. Si se supera el par de carga máximo el motor pierde sincronismo (Langarica, 2010).

4.2. CIRCUITO EQUIVALENTE DEL MOTOR BRUSHLESS

Se manifiesta la metodología para hallar el circuito equivalente del MB. Se inicia con el esquema representativo del devanado trifásico conjuntamente con las variables eléctricas asociadas al mismo, para luego determinar los elementos de la matriz de inductancias y los elementos del vector de enlaces de flujo debido al imán.

En la siguiente figura, se observa la representación trifásica del motor Brushless, tomando en cuenta que el devanado trifásico de MB generalmente se conecta en estrella y cada uno de los devanados se representa por una resistencia y una inductancia (Langarica, 2010).

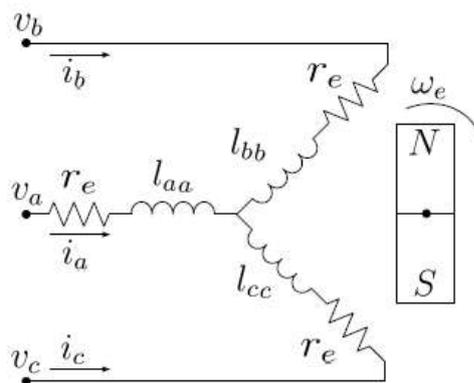


Figura 4.2. Devanados del estator del MB.

Fuente: Langarica, (2010).

Los enlaces de flujo del motor se muestran como una suma de enlaces de flujo del estator (definidos por el producto de las inductancias por las corrientes) más los enlaces de flujo dados por el material magnético del rotor, esta suma tiene la forma:

$$\begin{aligned}\lambda_a &= l_{aa} \cdot i_a + l_{ab} \cdot i_b + l_{ac} \cdot i_c + \lambda_{am} \\ \lambda_b &= l_{ba} \cdot i_a + l_{bb} \cdot i_b + l_{bc} \cdot i_c + \lambda_{bm} \\ \lambda_c &= l_{ca} \cdot i_a + l_{cb} \cdot i_b + l_{cc} \cdot i_c + \lambda_{cm}\end{aligned}$$

Ecuación 4.4

donde;

- $\lambda_a, \lambda_b, \lambda_c$ son los enlaces de flujo del motor,
- $l_{aa}, l_{ab}, l_{ac}, l_{ba}, l_{bb}, l_{bc}, l_{ca}, l_{cb}, l_{cc}$, son las inductancias de los devanados del estator,
- i_a, i_b, i_c son las corrientes que circulan en los devanados,
- $\lambda_{am}, \lambda_{bm}, \lambda_{cm}$, son los enlaces de flujo establecidos por el imán permanente, estos enlaces son funciones periódicas de θ_e ¹⁸ y está dado por la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned}\lambda_{am} &= \lambda_m \sin \theta_e \\ \lambda_{bm} &= \lambda_m \sin(\theta_e - \frac{2}{3}\pi) \\ \lambda_{cm} &= \lambda_m \sin(\theta_e + \frac{2}{3}\pi)\end{aligned}\quad \text{Ecuación 4.5}$$

La magnitud de los enlaces está dada por λ_m determinada por el material del imán permanente.

Expresando la ecuación 4.4 en forma de matriz se tiene:

$$\begin{bmatrix} \lambda_a \\ \lambda_b \\ \lambda_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{aa} & I_{ab} & I_{ac} \\ I_{ba} & I_{bb} & I_{bc} \\ I_{ca} & I_{cb} & I_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \lambda_{am} \\ \lambda_{bm} \\ \lambda_{cm} \end{bmatrix}\quad \text{Ecuación 4.6}$$

donde;

$$\Lambda = \begin{bmatrix} \lambda_a \\ \lambda_b \\ \lambda_c \end{bmatrix}, L = \begin{bmatrix} I_{aa} & I_{ab} & I_{ac} \\ I_{ba} & I_{bb} & I_{bc} \\ I_{ca} & I_{cb} & I_{cc} \end{bmatrix}, I = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \text{ y } \Lambda_m = \begin{bmatrix} \lambda_{am} \\ \lambda_{bm} \\ \lambda_{cm} \end{bmatrix}$$

Entonces la ecuación 4.6 se puede escribir de la siguiente forma:

$$\Lambda = LI + \Lambda_m \quad \text{Ecuación 4.7}$$

- Λ = Vector de enlaces del flujo del motor.
- L = Matriz de inductancias.
- I = Vector de corrientes de fase.
- Λ_m = Vector de enlaces de flujo debido al imán (Langarica, 2010).

¹⁸ Desplazamiento angular eléctrico.

4.3. DETERMINACIÓN DE LA MATRIZ DE INDUCTANCIAS DEL ESTATOR.

Los elementos de la matriz L son inductancias dependientes del desplazamiento angular eléctrico θ_e entre los ejes magnéticos del rotor y estator. Si los subíndices de las inductancias l son iguales indican que son inductancias propias (l_{aa} , l_{bb} , l_{cc}) y si son diferentes indican que es una inductancia mutua entre dos devanados (l_{ab} , l_{ac} , l_{ba} , l_{bc} , l_{ca} , l_{cb}). De forma general la inductancia l_{ij} es la inductancia del devanado de la fase i , debida a la corriente del devanado de la fase j (Langarica, 2010).

4.3.1. INDUCTANCIAS PROPIAS DEL ESTATOR

La inductancia propia o auto inductancia l_{aa} es igual a la razón del enlace de flujo del devanado de la fase a con respecto a la corriente i_a con todas las demás corrientes iguales a cero, además, esta inductancia propia cuenta con una componente de dispersión L_{ls} , debida al flujo disperso en el devanado y una componente de magnetización, debida al flujo de magnetización causada por el devanado. La inductancia l_{aa} es un máximo cuando $\theta_e = 0^\circ$, es un mínimo cuando $\theta_e = 90^\circ$ y vuelve a ser un máximo con $\theta_e = 180^\circ$ y así sucesivamente. La fuerza magnetomotriz de la fase a (\mathcal{F}_a) tiene una distribución senoidal con un valor máximo $N_s i_a$ centrado en el eje magnético de la fase a . La siguiente figura muestra las componentes de la fuerza magnetomotriz de la fase a a lo largo de los ejes q y d (Langarica, 2010).

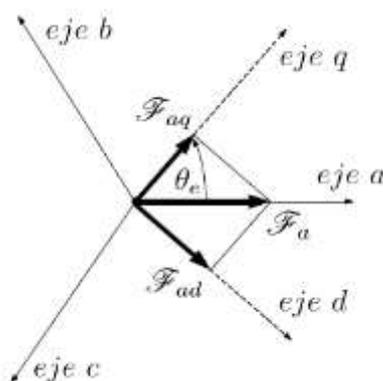


Figura 4.3. Componentes \mathcal{F}_{aq} y \mathcal{F}_{ad} de la fuerza \mathcal{F}_a .

Fuente: Langarica, (2010).

Entonces, si $\mathcal{F}_a = N_s i_a$ es la fuerza magnetomotriz de la fase a , sus componentes a lo largo de los ejes del rotor están dados por:

$$\mathcal{F}_{aq} = \mathcal{F}_a \cos \theta_e \quad \text{Ecuación 4.8}$$

$$\mathcal{F}_{ad} = \mathcal{F}_a \sin \theta_e \quad \text{Ecuación 4.9}$$

Para motores síncronos de imán permanente de rotor cilíndrico como es el de este caso, se cumple que los coeficientes de permanencia magnética son iguales $\mathcal{P}_q = \mathcal{P}_d = \mathcal{P}$; y que la amplitud pico de la variación senoidal de la inductancia de magnetización $L_{\Delta m} = 0$ debido a que:

$$L_{\Delta m} = N_s^2 \left(\frac{\mathcal{P}_d - \mathcal{P}_q}{2} \cos 2\theta_e \right)$$

Ecuación 4.10

Entonces, los flujos por polo en el entrehierro a lo largo de los ejes del rotor son:

$$\Phi_{aq} = \mathcal{P} \mathcal{F}_a \cos \theta_e,$$

$$\Phi_{ad} = \mathcal{P} \mathcal{F}_a \sin \theta_e,$$

Ecuación 4.11

El enlace de flujo total de la fase a en el entrehierro es:

$$\lambda_{aa0} = N_s (\Phi_{aq} \cos \theta_e + \Phi_{ad} \sin \theta_e) \quad \text{Ecuación 4.12}$$

Al sustituir los valores de Φ_{aq} y Φ_{ad} en la ecuación anterior se obtiene:

$$\lambda_{aa0} = N_s \mathcal{F}_a (\mathcal{P} \cos^2 \theta_e + \mathcal{P} \sin^2 \theta_e) \quad \text{Ecuación 4.13}$$

y al usar las identidades trigonométricas $\cos^2 = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos 2\theta_e$ y $\sin^2 = \frac{1}{2} -$

$\frac{1}{2} \cos 2\theta_e$ se tiene que:

$$\lambda_{aa0} = N_s \mathcal{F}_a \left(\frac{\mathcal{P} + \mathcal{P}}{2} - \frac{\mathcal{P} - \mathcal{P}}{2} \cos 2\theta_e \right) \quad \text{Ecuación 4.14}$$

Simplificando,

$$\lambda_{aa0} = N_s \mathcal{F}_a \mathcal{P} \quad \text{Ecuación 4.15}$$

La relación entre el enlace de flujo λ_{aa0} y la inductancia l_{aa0} es:

$$l_{aa0} = \frac{\lambda_{aa0}}{i_a} = \frac{\lambda_{aa0}}{\mathcal{F}_a / N_s} = \frac{N_s \lambda_{aa0}}{\mathcal{F}_a} \quad \text{Ecuación 4.16}$$

Entonces la componente de magnetización de la inductancia propia de la fase a esta dada por:

$$l_{aa0} = N_s^2 \mathcal{P} = L_m \quad \text{Ecuación 4.17}$$

Siendo L_m el valor promedio de la inductancia de magnetización. A esta inductancia l_{aa0} se le suma la inductancia de la componente de dispersión L_{ls} , debida al flujo producido por i_a que no cruza en entrehierro y sólo afecta al devanado de la fase a , entonces la inductancia propia queda:

$$l_{aa} = L_{ls} + L_m \quad \text{Ecuación 4.18}$$

Entonces, como se manifestó al inicio, este análisis es para motores de imán permanente de rotor cilíndrico, donde se cumple que las inductancias propias del estator de las tres fases son iguales, por tanto tenemos (Langarica, 2010):

$$l_{aa} = l_{bb} = l_{cc} = L_{ls} + L_m \quad \text{Ecuación 4.19}$$

4.3.2. INDUCTANCIAS MUTUAS DEL ESTATOR

Estas se definen como la razón del enlace del flujo de un devanado debido a la corriente que circula en un segundo devanado, con todas las demás corrientes iguales a cero. La inductancia mutua l_{ba} se puede encontrar por la evaluación del enlace de flujo de la fase b (λ_{ba}) en el entrehierro cuando la fase a es excitada.

Entonces se define que la inductancia mutua entre las fases a y b es igual a:

$$l_{ba} = l_{ab} = -\frac{1}{2} L_m - L_{\Delta m} \cos 2(\theta_e - \frac{\pi}{3}) \quad \text{Ecuación 4.20}$$

En este caso, como se especificó en la sección anterior, $L_{\Delta m} = 0$ entonces se tiene;

$$l_{ba} = l_{ab} = -\frac{1}{2}L_m \quad \text{Ecuación 4.21}$$

Por lo tanto;

$$l_{ba} = l_{ab} = l_{ac} = l_{ca} = l_{bc} = l_{cb} = -\frac{1}{2}L_m \quad \text{Ecuación 4.22}$$

Una vez que se obtuvieron todos los elementos de la matriz de inductancias, se continúa con el desarrollo del circuito equivalente para la fase a . De la ecuación 4.4, el enlace de flujo para la fase a es:

$$\lambda_a = l_{aa} \cdot i_a + l_{ab} \cdot i_b + l_{ac} \cdot i_c + \lambda_{am} \quad \text{Ecuación 4.23}$$

Reemplazando (4.19) y (4.22) en (4.23) se tiene:

$$\lambda_a = (L_{ls} + L_m)i_a + \left(-\frac{1}{2}L_m\right)(i_b + i_c) + \lambda_m \sin \theta_e \quad \text{Ecuación 4.24}$$

Cuando un conjunto de voltajes trifásicos con la misma amplitud alimenta a los devanados del motor se cumple que:

$$v_a + v_b + v_c = 0 \quad \text{Ecuación 4.25}$$

Estos voltajes de alimentación son:

$$\begin{aligned} v_a &= V_m \cos(\omega_e t), \\ v_b &= V_m \cos\left(\omega_e t - \frac{2\pi}{3}\right), \\ v_c &= V_m \cos\left(\omega_e t + \frac{2\pi}{3}\right), \end{aligned} \quad \text{Ecuación 4.26}$$

Donde V_m es la amplitud pico de voltaje. Los voltajes aplicados al estator producen corrientes que circulan por los devanados; estas se representan por:

$$\begin{aligned} i_a &= I_m \cos(\omega_e t - \varphi), \\ i_b &= I_m \cos\left(\omega_e t - \varphi - \frac{2\pi}{3}\right), \\ i_c &= I_m \cos\left(\omega_e t - \varphi - \frac{2\pi}{3}\right), \end{aligned} \quad \text{Ecuación 4.27}$$

Donde;

- I_m es la amplitud máxima de las corrientes
- φ es el ángulo cuyo coseno es el factor de potencia al cual opera el motor.

Las corrientes cumplen con:

$$i_a + i_b + i_c = 0$$

$$i_a = -(i_b + i_c) \quad \text{Ecuación 4.28}$$

Sustituyendo (4.28) en (4.24) tenemos:

$$\lambda_a = \left(\frac{3}{2}L_m + L_{ls}\right)i_a + \lambda_m \sin \theta_e \quad \text{Ecuación 4.29}$$

Si se considera el desplazamiento de $-2\pi/3$ y $+2\pi/3$ para las fases b y c , respectivamente, entonces los enlaces de flujo serán:

$$\lambda_b = \left(\frac{3}{2}L_m + L_{ls}\right)i_b + \lambda_m \sin\left(\theta_e - \frac{2\pi}{3}\right),$$

$$\lambda_c = \left(\frac{3}{2}L_m + L_{ls}\right)i_c + \lambda_m \sin\left(\theta_e + \frac{2\pi}{3}\right), \quad \text{Ecuación 4.30}$$

Se aplica la segunda ley de Kirchhoff al devanado de la fase a y se tiene:

$$v_a = r_e i_a + \frac{d\lambda_a}{dt}, \quad \text{Ecuación 4.31}$$

Se debe tomar en cuenta que $\theta_e = \omega_e t + \theta_{e0}$, donde θ_{e0} es la posición inicial del rotor, entonces se tiene que el voltaje en la fase a es:

$$v_a = r_e i_a + \left(\frac{3}{2}L_m + L_{ls}\right)\frac{di_a}{dt} + \lambda_m \frac{d}{dt}(\sin(\omega_e t + \theta_{e0})) \quad \text{Ecuación 4.32}$$

Donde λ_m es la magnitud de los enlaces de flujo y la determinada el material magnético en el rotor. Derivando la ecuación anterior se tiene;

$$v_a = r_e i_a + \left(\frac{3}{2}L_m + L_{ls}\right)\frac{di_a}{dt} + \lambda_m \omega_e \cos(\omega_e t + \theta_{e0}), \quad \text{Ecuación 4.33}$$

De esta última ecuación se deduce que;

- $r_e i_a$ es la caída de voltaje en la resistencia

- $\left(\frac{3}{2}L_m + L_{ls}\right) \frac{di_a}{dt}$ es el voltaje en la inductancia efectiva de la fase a . A esta inductancia se le conoce como inductancia síncrona, definida como:

$$L_s = \left(\frac{3}{2}L_m + L_{ls}\right) \quad \text{Ecuación 4.34}$$

- $\lambda_m \omega_e \cos(\omega_e t + \theta_{e0})$ es el voltaje generado por el movimiento del rotor.

$$e_{ag} = \lambda_m \omega_e \cos(\omega_e t + \theta_{e0}) \quad \text{Ecuación 4.35}$$

Así finalmente el circuito para la fase a se muestra en la siguiente figura:

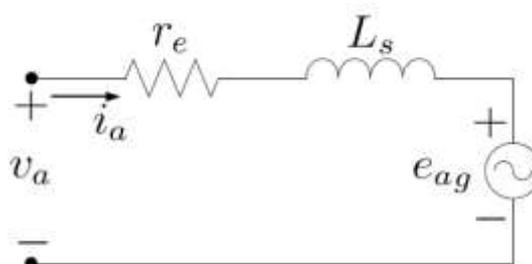


Figura 4.4. Circuito equivalente de la fase a .

Fuente: Langarica, (2010).

Y sus ecuaciones serán:

$$v_a = r_e i_a + L_s \frac{di_a}{dt} + e_{ag} \quad \text{Ecuación 4.36}$$

$$v_a = r_e i_a + \left(\frac{3}{2}L_m + L_{ls}\right) \frac{di_a}{dt} + \lambda_m \omega_e \cos(\omega_e t + \theta_{e0}) \quad \text{Ecuación 4.37}$$

Para la fase b y c , se obtienen circuitos similares, solo se requiere considerar el desfase $-2\pi/3$ y $+2\pi/3$, respectivamente (Langarica, 2010).

4.4. OPERACIÓN EN ESTADO ESTACIONARIO

En estado estacionario el MB es alimentado con los voltajes dados en la ecuación 4.26, repetidos aquí:

$$v_a = V_m \cos(\omega_e t),$$

$$v_b = V_m \cos\left(\omega_e t - \frac{2\pi}{3}\right), \quad \text{Ecuación 4.38}$$

$$v_c = V_m \cos\left(\omega_e t + \frac{2\pi}{3}\right),$$

Estos voltajes se encuentran representados en el dominio del tiempo y cuentan con la misma amplitud V_m . Al considerar que $\omega_e = 2\pi f$, entonces, los tres voltajes tienen la misma frecuencia y la diferencia entre estos es el ángulo de fase. Es posible representar este sistema de voltajes por medio de fasores. El fasor representa una función senoidal en base a su valor rms y a su ángulo de desfase. Así la representación en el dominio de la frecuencia de las ecuaciones (4.38) es:

$$\begin{aligned}\hat{V}_a &= \frac{V_m}{\sqrt{2}} \angle 0, \\ \hat{V}_b &= \frac{V_m}{\sqrt{2}} \angle -\frac{2\pi}{3}, \\ \hat{V}_c &= \frac{V_m}{\sqrt{2}} \angle +\frac{2\pi}{3}\end{aligned}\tag{Ecuación 4.39}$$

Los elementos como la resistencia (R), el inductor (L) o el capacitor (C) se representan fasorialmente de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}R &= R, \\ X_L &= \omega L, \\ X_C &= -\frac{1}{\omega C},\end{aligned}\tag{Ecuación 4.40}$$

Donde X_L es la reactancia inductiva y X_C es la reactancia capacitiva. La reactancia es igual en el dominio de la frecuencia y en el dominio del tiempo. Bajo estas consideraciones el circuito equivalente de la fase a descrito por la figura 4.4 se puede plantear como el circuito mostrado a continuación:

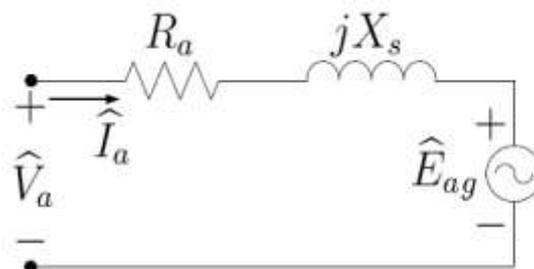


Figura 4.5. Circuito equivalente monofásico del MB en el dominio de la frecuencia.

Fuente: Langarica, (2010).

Si se aplica la primera ley de voltajes de Kirchhoff al circuito anterior se obtiene la siguiente ecuación:

$$\hat{V}_a = R_a \hat{I}_a + jX_s \hat{I}_a + \hat{E}_{ag} \quad \text{Ecuación 4.41}$$

Donde $X_s = \omega_e L_s$ es la reactancia síncrona. El diagrama fasorial correspondiente a esta ecuación 4.41 se muestra en la siguiente figura:

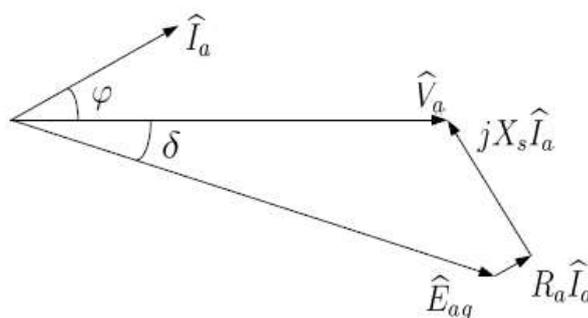


Figura 4.6. Diagrama fasorial del MB.

Fuente: Langarica, (2010).

El ángulo δ entre los fasores \hat{V}_a y \hat{E}_{ag} se llama ángulo de potencia debido a que está relacionado con la potencia y el par que desarrolla el MB (Langarica, 2010).

4.4.1. ANÁLISIS DE POTENCIA

El MB trifásico es una máquina eléctrica que convierte la potencia eléctrica suministrada en los devanados del estator en potencia mecánica aplicada en el eje del rotor. En este proceso de conversión se presentan pérdidas de potencia:

- **Potencia eléctrica de entrada:** es la potencia suministrada en los devanados del estator. Esta potencia de entrada no depende del tipo de conexión (Δ o Y) del motor.

$$P_{in} = 3V_\phi I_\phi \cos \varphi = \sqrt{3}V_L I_L \cos \varphi \quad \text{Ecuación 4.42}$$

Donde V_ϕ e I_ϕ es el voltaje y corriente por fase del motor respectivamente. V_L e I_L es el voltaje y corriente de línea respectivamente. φ es el ángulo cuyo coseno es el factor de potencia.

En conexiones Y se tiene que $I_L = I_\phi$ y que $V_L = \sqrt{3}V_\phi$.

En conexiones Δ se tiene que $V_L = V_\phi$ y que $I_L = \sqrt{3}I_\phi$.

- **Pérdida de potencia en la resistencia:** se presenta en las resistencias de los devanados del estator en forma de calor y están dadas por:

$$P_R = 3|I_a|^2 R_a \quad \text{Ecuación 4.43}$$

- **Pérdida de potencia en el núcleo:** esta pérdida se produce por histéresis y por corrientes parásitas en el metal del motor. Se la considera como cero.
- **Potencia electromagnética:** esta potencia se obtiene de la resta de la potencia eléctrica menos la pérdida de potencia en la resistencia menos la pérdida de potencia en el núcleo; esta potencia es la que se transforma de eléctrica a mecánica.

Para determinarla se utiliza el circuito equivalente monofásico en el dominio de la frecuencia dado por la figura que se muestra a continuación; en ella, se agrega la representación de la parte mecánica con la intención de ilustrar la transformación de potencia eléctrica a mecánica. La potencia electromagnética se presenta en la fuente de voltaje generado \hat{E}_{ag} .

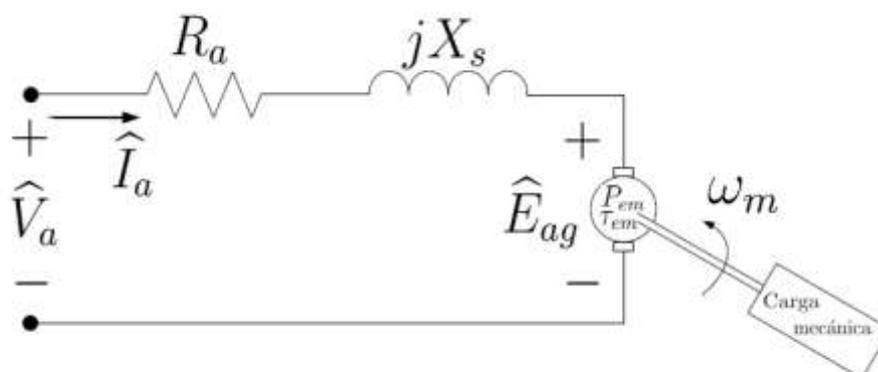


Figura 4.7. Representación de la parte eléctrica y mecánica del MB.

Fuente: Langarica, (2010).

- **Pérdida de potencia mecánica:** está dada por la fricción entre las partes móviles del motor y la fricción del rotor con el aire.
- **Potencia de salida:** esta resulta de restar el conjunto de todas las pérdidas a la potencia de entrada.

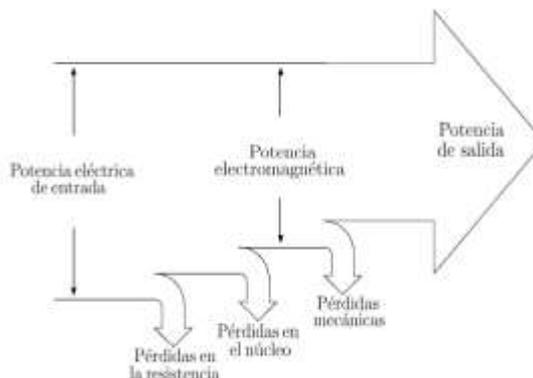


Figura 4.8. Diagrama de flujo de potencia.

Fuente: Langarica, (2010).

De la ecuación 4.41 se despeja el fasor de corriente \hat{I}_a :

$$\hat{I}_a = \frac{\hat{V}_a - \hat{E}_{ag}}{R_a + jX_s} = \frac{\hat{V}_a}{R_a + jX_s} - \frac{\hat{E}_{ag}}{R_a + jX_s} \quad \text{Ecuación 4.44}$$

Tomando en cuenta que $\hat{z} = |z| \angle \phi_z = R_a + jX_s$ es la impedancia del devanado y que $|Z| = \sqrt{R_a^2 + X_s^2}$ y $\phi_z = \arctan\left(\frac{X_s}{R_a}\right)$ representan la magnitud y la fase respectivamente, entonces se tiene que;

$$\hat{I}_a = \frac{|V_a|}{|Z|} \angle -\phi_z - \frac{|E_{ag}|}{|Z|} \angle -(\delta + \phi_z) \quad \text{Ecuación 4.45}$$

Se requiere conocer el conjugado de \hat{I}_a ; el superíndice * representa el conjugado.

$$\hat{I}_a^* = \frac{|V_a|}{|Z|} \angle \phi_z - \frac{|E_{ag}|}{|Z|} \angle (\delta + \phi_z) \quad \text{Ecuación 4.46}$$

Si se desarrolla los términos se tiene que:

$$\hat{I}_a^* = \frac{|V_a|}{|Z|} \cos \phi_z - \frac{|E_{ag}|}{|Z|} \cos(\delta + \phi_z) + j \left(\frac{|V_a|}{|Z|} \sin \phi_z - \frac{|E_{ag}|}{|Z|} \sin(\delta + \phi_z) \right)$$

Ecuación 4.47

Para hallar la potencia electromagnética real se debe encontrar primero la potencia aparente dada por:

$$\hat{S} = \hat{E}_{ag} \hat{I}_a^* \quad \text{Ecuación 4.48}$$

Al considerar que $\hat{E}_{ag} = |E_{ag}| \angle -\delta$ y realizando las operaciones correspondientes, se tiene que:

$$\hat{S} = \frac{|V_a||E_{ag}|}{|Z|} \cos(\phi_z - \delta) - \frac{|E_{ag}|^2}{|Z|} \cos \phi_z + j \left(\frac{|V_a||E_{ag}|}{|Z|} \sin(\phi_z - \delta) - \frac{|E_{ag}|^2}{|Z|} \sin \phi_z \right) \quad \text{Ecuación 4.49}$$

Se conoce también que $\hat{S} = P_{em} + jQ_{em}$, entonces de la ecuación anterior la potencia electromagnética real P_{em} y la potencia reactiva Q_{em} están dadas por:

$$P_{em} = \frac{|V_a||E_{ag}|}{|Z|} \cos(\phi_z - \delta) - \frac{|E_{ag}|^2}{|Z|} \cos \phi_z \quad \text{Ecuación 4.50}$$

$$Q_{em} = \frac{|V_a||E_{ag}|}{|Z|} \sin(\phi_z - \delta) - \frac{|E_{ag}|^2}{|Z|} \sin \phi_z \quad \text{Ecuación 4.51}$$

Por lo general, la resistencia de los devanados es muy pequeña en comparación con la reactancia síncrona, por lo tanto se considera que $R_a = 0$; bajo esta consideración el valor de la magnitud de impedancia es $|Z| = X_s$ y el valor del ángulo de fase es $\phi_z = \pi/2$, por lo tanto la expresión para la potencia electromagnética es:

$$P_{em} = \frac{|V_a||E_{ag}|}{X_s} \cos(\phi_z - \delta) = \frac{|V_a||E_{ag}|}{X_s} \sin \delta \quad \text{Ecuación 4.52}$$

Esta ecuación representa a la potencia electromagnética para una sola fase del MB, la potencia electromagnética total se obtiene multiplicando por 3 a la ecuación anterior;

$$P_{em,3\phi} = 3 \frac{|V_a||E_{ag}|}{X_s} \sin \delta \quad \text{Ecuación 4.53}$$

Otra expresión para la potencia electromagnética desde el punto de vista mecánico es:

$$P_{em,3\phi} = \omega_m \tau_{em} \quad \text{Ecuación 4.54}$$

Donde ω_m es el desplazamiento angular mecánico del eje del rotor y τ_{em} es el par producido por el motor, este se expresa como:

$$\tau_{em} = 3 \frac{|V_a| |E_{ag}|}{\omega_m X_s} \sin \delta \quad \text{Ecuación 4.55}$$

Cuando se opera esta máquina como motor, el ángulo de potencia δ siempre es negativo, en cambio, si se opera como generador, dicho ángulo será siempre positivo. La curva de potencia muestra cómo se comporta la potencia electromagnética en función de δ . En el primer cuadrante se tiene la acción generador y en el tercer cuadrante se tiene la acción motor. El máximo valor de la potencia en operación motor cuando $\delta = -\pi/2$, siempre y cuando $R_a = 0$. Si $R_a \neq 0$, el valor máximo de la potencia electromagnética se presenta cuando $\delta = \phi_z$ (Langarica, 2010).

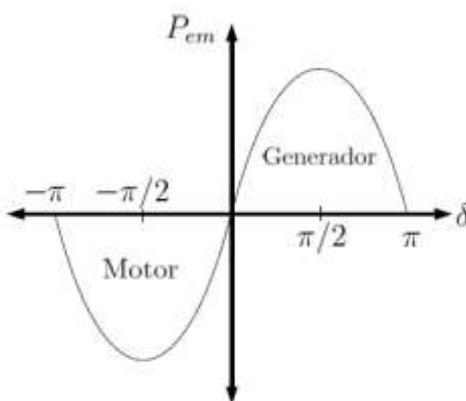


Figura 4.9. Curva de potencia del MB.

Fuente: Langarica, (2010).

4.5. DESARROLLO

Se presenta el análisis anteriormente descrito con base a los datos del motor brushless utilizado en este proyecto:

Tabla 4.1. Datos del motor Brushless.

Modelo: XF	Marca: CicloTEK
$V_L = 36 \text{ v}$	$P_{out} = 250 \text{ w} = 0,25 \text{ Hp}$
$r_e = 3,83 \Omega$	$L_s = ?$
$f_p = 0,93$	$n_p = 6$
$n_s = 2000 \text{ rpm}$	

La resistencia del motor, denominada r_e en la tabla 4.1, se la obtuvo gracias al siguiente gráfico:

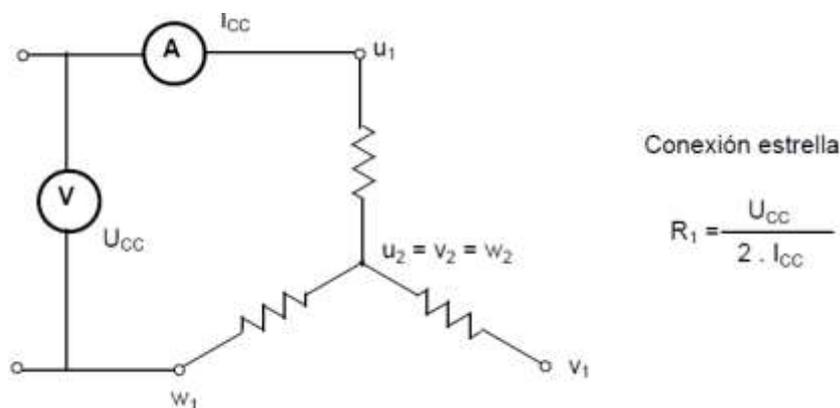


Figura 4.10. Medición de la resistencia en bobinas estáticas.

Se optó por esta forma de cálculo ya que al no tener acceso al bobinado, es la manera más práctica, la cual consiste en introducir un voltaje inferior a v_L , y medir la corriente que circula a través del circuito, obteniendo de esta manera el siguiente cálculo:

$$R_1 = \frac{12,24 \text{ V}}{2(1,6 \text{ A})}$$

$$\mathbf{R_1 = 3,83 \Omega}$$

Ahora, primeramente, se inicia calculando la velocidad angular mecánica ω_m y eléctrica ω_e a partir de la velocidad nominal del motor;

$$\omega_m = 1000 \left(\frac{2\pi}{60} \right)$$

$$\mathbf{\omega_m = 209,5 \text{ rad/seg}}$$

$$\omega_e = n_p \omega_m$$

$$\omega_e = 6(104,72)$$

$$\omega_e = 1256,6 \text{ rad/seg}$$

Se prosigue, obteniendo la frecuencia f del campo magnético del estator:

$$f = \frac{\omega_e}{2\pi}$$

$$f = 200 \text{ Hz}$$

A partir de aquí, los datos tomados para realizar los siguientes cálculos corresponden a datos no reales del motor utilizado en este proyecto, debido a que por falta de algunos de ellos entre los más importantes la inductancia, no permiten seguir haciendo los cálculos con información real. Los siguientes valores son basados en la tesis de maestría en ciencias denominada **“Control de un Motor Brushless para Aplicación a Vehículos Eléctricos”** del Ing. Diego Langarica Córdoba, teniendo como objetivo dejar un ejemplo claro de cómo se debe obtener el circuito equivalente del MB.

Tabla 4.2. Datos del MB de la tesis “Control de un Motor Brushless para aplicación a vehículos eléctricos”.

$V_L = 400 \text{ V}$	$P_{out} = 27,415 \text{ W} = 36.74 \text{ hp}$
$r_e = 0.121$	$L_s = 1.2 \text{ mH}$
$P = 8$	$n_p = 4$
$\eta_s = 3000 \text{ rpm}$	$f_p = 0.93$

Fuente: Langarica, (2010).

Entonces, la reactancia síncrona se obtiene del producto de la velocidad angular eléctrica con la inductancia síncrona;

$$X_s = \omega_e L_s = (1256,63)(1,2 \times 10^{-3}) = 1,5 \Omega \quad \text{Ecuación 4.56}$$

El fasor de voltaje \hat{V}_a se obtiene del voltaje de línea V_L . En conexiones Y la magnitud del fasor es:

$$|V_a| = \frac{V_L}{\sqrt{3}} = 231 \text{ V} \quad \text{Ecuación 4.57}$$

Por lo tanto el fasor es:

$$\hat{V}_a = 231 \angle 0^\circ V$$

Ahora, se procede a encontrar una expresión cuadrática para la corriente de fase. Con esta, se obtiene la magnitud del fasor de corriente y su ángulo está determinado por el factor de potencia al cual opera el motor. Para esto, se supone que las pérdidas de potencia mecánica y potencia en el núcleo son iguales a cero ($P_{perd\ mec} = P_{perd\ nuc} = 0$), además se toma en cuenta que $P_{em} = P_{out}$ entonces tenemos:

$$P_{in} = P_{em} + P_R \quad \text{Ecuación 4.58}$$

La potencia de entrada es $P_{in} = V_a I_a f_p$, la potencia en la resistencia es $P_R = r_e I_a^2$ y la potencia electromagnética es $P_{em} = \frac{P_{out}}{3}$, entonces:

$$\begin{aligned} r_e I_a^2 - V_a I_a f_p + P_{em} &= 0 & \text{Ecuación 4.59} \\ 0,121 I_a^2 - 214,76 I_a + 9138,33 &= 0 \end{aligned}$$

Al resolver la ecuación cuadrática se obtiene la magnitud del fasor de corriente \hat{I}_a , cuyo ángulo está dado por $\arccos f_p = \arccos 0,92$, se tiene;

$$\hat{I}_a = 43,62 \angle -21,6^\circ A$$

Se realiza el cálculo de la impedancia:

$$Z = r_e + jX_s = 0,121 + j1,5 = 1,51 \angle 85,4^\circ \quad \text{Ecuación 4.60}$$

El voltaje generado es:

$$\hat{E}_{ag} = \hat{V}_a - Z \hat{I}_a = 210,4 \angle -16,31^\circ V \quad \text{Ecuación 4.61}$$

De aquí se deduce que;

$$\delta = 16,31^\circ$$

Se calcula la potencia máxima con la siguiente expresión, para ello $\delta = \phi_z$;

$$P_{em} = \frac{|V_a| |E_{ag}|}{|Z|} - \frac{|E_{ag}|^2}{|Z|} \cos \phi_z = 29\,835,84 W \quad \text{Ecuación 4.62}$$

Por lo tanto;

$$P_{em,3\phi,max} = 89\,507,52 W = 120 hp$$

El par electromagnético máximo es el cociente de la potencia trifásica máxima y la velocidad angular mecánica:

$$\tau_{em,max} = \frac{89\,507,22}{314,16} = 285 \text{ Nm}$$

La siguiente ecuación define el circuito eléctrico monofásico y las figuras 4.11 y 4.12 muestran el circuito y el diagrama fasorial respectivamente.

$$\hat{V}_a = R_a \hat{I}_a + jX_s \hat{I}_a + \hat{E}_{ag}$$

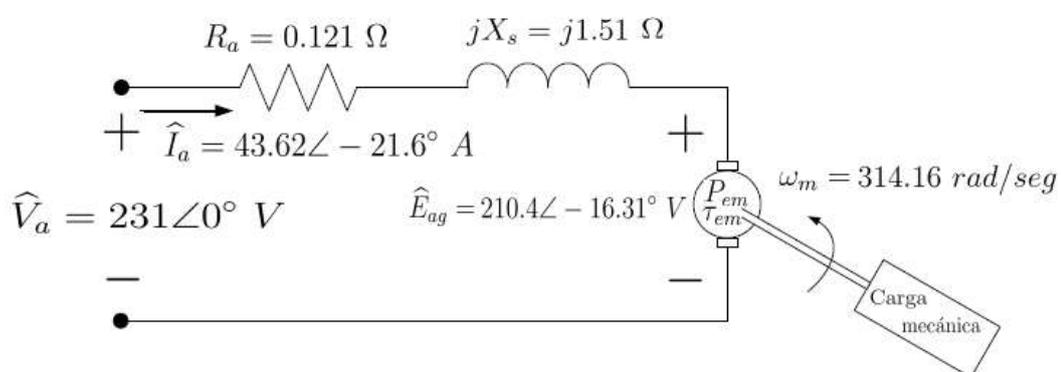


Figura 4.11. Circuito eléctrico para la fase **a** de MB.

Fuente: Langarica, (2010).

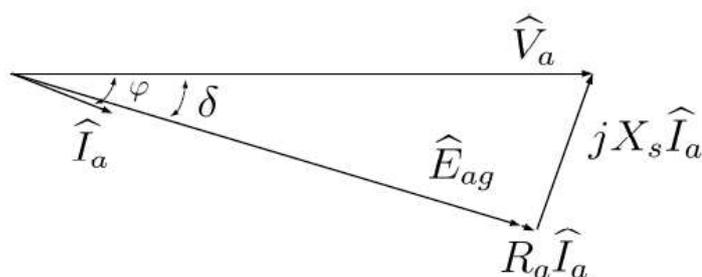


Figura 4.12. Diagrama fasorial.

Fuente: Langarica, (2010).

4.6. COMPORTAMIENTO VOLTAJE- VELOCIDAD

Para poder comprender de mejor manera el comportamiento de los motores, se toma en cuenta las señales de entrada y salida del sistema, por lo tanto, a

la entrada se tiene una señal análoga que permite variar la frecuencia de los motores, y a la salida se obtiene como respuesta, la velocidad.

Para realizar la medición de la velocidad de las ruedas, ha sido necesario la colocación de un sensor tipo hall, el cual posee 5 imanes, tal como nos muestra la siguiente figura:

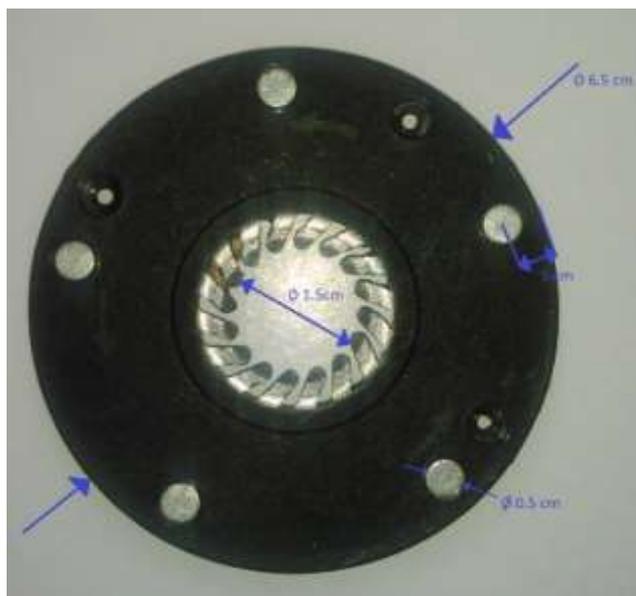


Figura 4.13. Dimensiones del disco de imanes del sensor efecto hall.

La tabla de datos se obtuvo gracias al uso de una pinza amperimétrica y al tacómetro incluido en el sistema, teniendo así los siguientes datos:

Tabla 4.3. Datos del MB sin carga.

Voltaje	p (ms)	p (s)	f=1/p	Tiempo vuelta (s)	Corrientes (A)			Angular (rad/s)	RPM 1
					L1	L2	L3		
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,4	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,6	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,8	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1,2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1,4	138	0,14	7,25	6,62	0,98	0,9	0,7	54,38	519,30
1,6	38,8	0,04	25,77	2,39	0,5	0,78	0,6	150,63	1438,38
1,8	23,33	0,02	42,86	1,22	0,71	0,78	0,54	295,08	2817,82
2	14,6	0,01	68,49	0,78	0,63	0,83	0,65	461,54	4407,36
2,2	11,04	0,01	90,58	0,59	0,68	0,74	0,69	610,17	5826,68

2,4	9	0,01	111,11	0,48	0,76	0,8	0,8	750,00	7161,96
2,6	7,8	0,01	128,21	0,41	0,8	0,8	0,7	878,05	8384,73
2,8	7,6	0,01	131,58	0,36	0,8	0,9	0,8	1000,00	9549,27
3	7,3	0,01	136,99	0,32	0,9	0,9	0,85	1125,00	10742,93
3,2	7	0,01	142,86	0,29	0,96	1	1	1241,38	11854,27
3,4	6,3	0,01	158,73	0,27	0,5	0,5	0,5	1333,33	12732,37
3,6	5,15	0,01	194,17	0,27	0,6	0,47	0,5	1333,33	12732,37
3,8	5,08	0,01	196,85	0,27	0,6	0,47	0,55	1333,33	12732,37
4	5,08	0,01	196,85	0,27	0,6	0,47	0,55	1333,33	12732,37

Sabiendo que:

- Voltaje, corresponde a la señal análoga de entrada.
- P, es el periodo de la señal de salida.
- F, es la frecuencia de la señal de salida y corresponde a $1/p$.
- Tiempo vuelta, es la duración del diámetro 1 (rueda de imanes) en dar una vuelta completa, teniendo en cuenta que el diámetro de ésta es de 5.5 cm.
- Las columnas de corrientes, corresponden a la corriente de cada línea.
- Angular, nos indica la velocidad angular del diámetro 1, expresada en radianes por segundo.
- RPM 1, corresponden a las revoluciones por minuto del diámetro 1, y, para poder sacar las rpm en función al diámetro de la llanta, es necesario realizar una relación de transmisión, la cual se detallará más adelante.

Para obtener la velocidad angular, fue necesario utilizar la siguiente formula:

$$\omega = \theta * t_v \quad \text{Ecuación 4.63}$$

Donde; $\omega = \text{Velocidad angular en rad/s}$

$\theta = \text{Angulo recorrido, en nuestro caso 1 vuelta}(360^\circ)$

$t_v = \text{tiempo que se demora en dar una vuelta}$

Y las rpm son sacadas mediante la siguiente relación:

$$1 \text{ rev} = 2\pi \text{ rad} \quad \text{Ecuación 4.64}$$

$$1 \text{ mint} = 60 \text{ s} \quad \text{Ecuación 4.65}$$

Mediante los datos de la tabla anterior, se puede graficar los puntos de dispersión, para luego obtener la línea que tiende a seguir a dichos puntos, logrando finalmente la ecuación del comportamiento del motor, frecuencia vs velocidad, en este caso, esta ecuación es de quinto grado, tal como se observa en la siguiente gráfica:

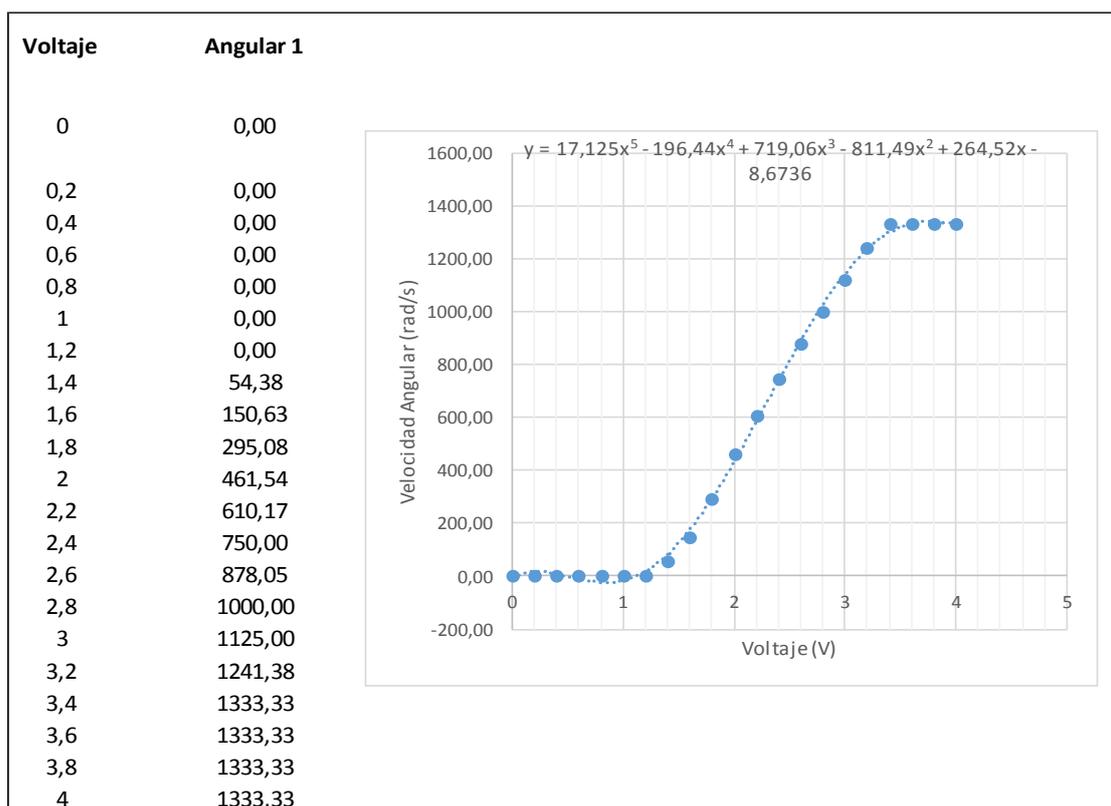


Figura 4.14. Gráfica voltaje-velocidad.

Se debe tomar en cuenta, que los datos de la tabla corresponden al motor en vacío, es decir, sin carga alguna.

4.7. DIMENSIONAMIENTO DE VELOCIDAD

Para obtener la velocidad deseada, se debe tomar muy en cuenta las dimensiones físicas de la silla de ruedas, principalmente del diámetro de las ruedas, partiendo así de los siguientes datos:

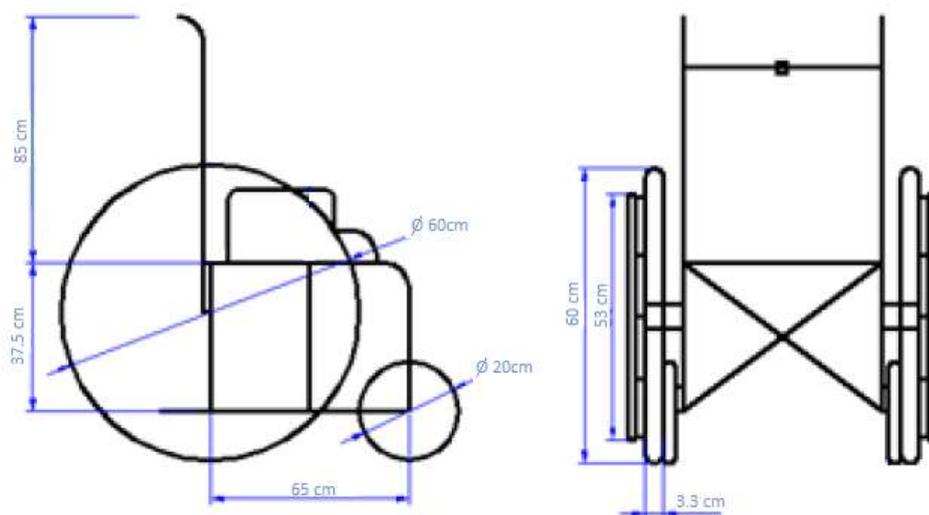


Figura 4.15. Dimensiones de la silla.

Además, de las dimensiones físicas de la silla de ruedas; los pesos que gobiernan a la estructura y el peso del paciente son de gran importancia, ya que afectarían directamente a la velocidad y duración de las baterías, teniendo así los siguientes datos:

Tabla 4.4. Pesos que intervienen en el sistema.

Detalle:	Cantidad	Peso unitario (lbs)	Peso total (lbs)
Batería	2	6	12
Motor con rueda	2	12	24
Estructura De Aluminio	1	52	52
Paciente	1	105	105
Peso total			193

De esta manera, y al tomar en cuenta las cargas y dimensiones físicas de la silla de ruedas, se ha llegado a conocer mediante pruebas experimentales que los voltajes de entrada necesarios para obtener una velocidad de estabilidad inferior a 6 Km/h, que es la velocidad estandarizada para sillas de ruedas, son de 2 y 1.6 voltios, para la velocidad de arranque y velocidad de estabilidad respectivamente, obteniendo así los siguientes datos:

Tabla 4.5. Datos del MB con carga.

Voltaje	p (ms)	p (s)	f=1/p	Tiempo vuelta (s)	Corrientes (A)			Angular (rad/s)	RPM 1
					L1	L2	L3		
1,6	38,8	0,0388	25,77	6	0,3	0,3	0,35	60,00	572,96
2	14,6	0,0146	68,49	4	9	8,9	9,2	90,00	859,43

Tomando en cuenta todos los datos indicados anteriormente, se prosigue al cálculo de la velocidad, partiendo de las rpm (revoluciones por minuto) obtenidas en la tabla anterior:

$$\omega_{a1} = \text{Velocidad angular de arranque} = 90 \text{ rad/s}$$

$$\omega_{e1} = \text{Velocidad angular de estabilidad} = 60 \text{ rad/s}$$

Al comenzar el movimiento en cualquier dirección, la silla de ruedas inicia con una determinada velocidad, denominada en este caso, velocidad de arranque (ω_{a1}), la cual tiene un tiempo de duración de 2 segundos como máximo, dependiendo del tipo de comando y siendo suficiente para dar el primer impulso, después se cambia a la segunda velocidad llamada velocidad de estabilidad (ω_{e1}), que es a la que se movilizará la silla de ruedas.

Para obtener la velocidad final de la silla, se debe calcular mediante la relación del diámetro interno, disco de imanes del sensor y el diámetro externo, que para este caso, es el diámetro externo de la rueda, y así obtener la velocidad a la que la silla se trasladará, tomando en cuenta, que ésta, puede ser afectada por el peso del paciente.

Entonces, la fórmula de relación de transmisión será:

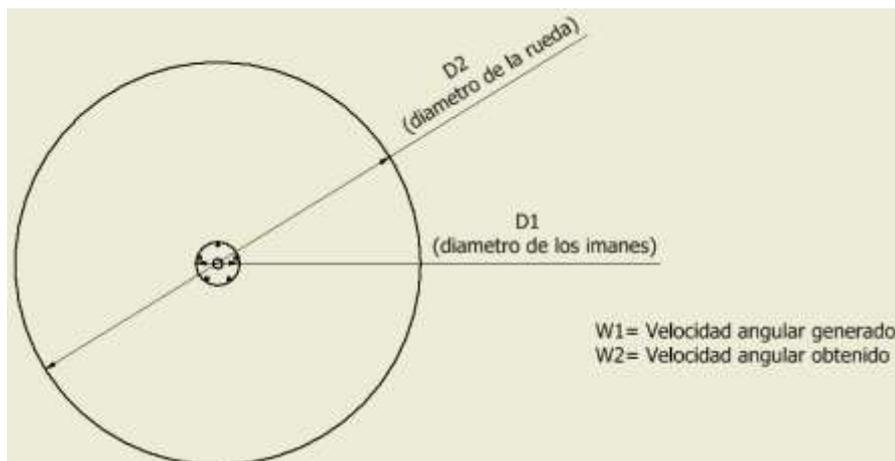


Figura 4.16. Relación de transferencia de velocidad.

Obteniendo así los siguientes datos:

Tabla 4.6. Velocidad de arranque y velocidad de estabilidad.

Velocidad de arranque	Velocidad de estabilidad
$D1 = 5.5 \text{ cm} = 0.055 \text{ m}$ $D2 = 60 \text{ cm} = 0.6 \text{ m}$	$D1 = 5.5 \text{ cm} = 0.055 \text{ m}$ $D2 = 60 \text{ cm} = 0.6 \text{ m}$
$\omega_{a2} = \frac{5.5 \text{ cm}}{60 \text{ cm}} * 90 \text{ rad/s}$ $\omega_{a2} = 8.25 \text{ rad/s}$	$\omega_{e2} = \frac{5.5 \text{ cm}}{60 \text{ cm}} * 60 \text{ rad/s}$ $\omega_{e2} = 5.5 \text{ rad/s}$
$v = \omega * r1$ $v = 8.25 \frac{\text{rad}}{\text{seg}} * 0.3\text{m}$ $v = 2.48 \frac{\text{m}}{\text{s}}$	$v = \omega * r1$ $v = 5.5 \frac{\text{rad}}{\text{seg}} * 0.3\text{m}$ $v = 1.65 \frac{\text{m}}{\text{s}}$
$2.48 \frac{\text{m}}{\text{s}} * \frac{1\text{Km}}{1000\text{m}} * \frac{3600\text{s}}{1\text{h}}$ $= 8.91 \frac{\text{Km}}{\text{h}}$	$01.65 \frac{\text{m}}{\text{s}} * \frac{1\text{Km}}{1000\text{m}} * \frac{3600\text{s}}{1\text{h}}$ $= 5.94 \frac{\text{Km}}{\text{h}}$

La velocidad lineal de la silla de ruedas, se la puede obtener con la siguiente formula:

$$V = \omega * r \quad \text{Ecuación 4.66}$$

Siendo: $V = \text{Velocidad Lineal}$
 $\omega = \text{Velocidad angular en rad/s}$
 $r = \text{radio de la rueda}$

Se determina de esta manera la siguiente tabla de velocidades:

Tabla 4.7. Tabla de velocidades en funcion del diámetro 2.

Angular 1 (rad/s)	RPM 1	Angular 2 (rad/s)	RPM 2	Vel (m/s)	Vel (Km/h)
60,00	572,96	5,50	52,52	1,65	5,94
90,00	859,43	8,25	78,78	2,48	8,91

Una vez que se obtienen las tablas, se puede entender de mejor manera el comportamiento de los motores, siendo primordial obtener las gráficas de corriente con el fin de conocer la potencia utilizada y sobre todo para el dimensionamiento de elementos eléctricos y del cableado.

Como ya se mencionó anteriormente, la velocidad de arranque tiene una duración de 2 segundos, para luego pasar a la velocidad de estabilidad, dándonos como resultado la siguiente gráfica:

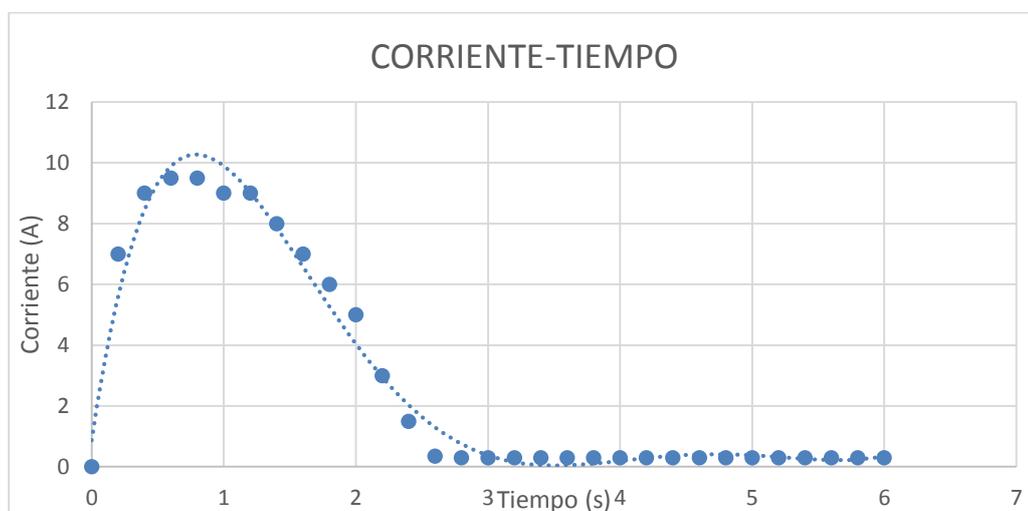


Figura 4.17. Curva corriente-tiempo.

4.8. DIMENSIONAMIENTO DE ELEMENTOS EN FUNCIÓN DE CORRIENTE NOMINAL.

Al analizar la figura 4.17, se puede observar que los dos primeros segundos, presentan corrientes inferiores a 10A, dando una idea clara de los valores nominales que se van a manejar.

Al tener señales alternas para alimentación de los motores, y, siendo el tiempo relativamente corto en relación al periodo de funcionamiento, los relés de 10A, son suficientes para ser utilizados en esta aplicación, los cuales ayudaran a la activación y cambio de giro de los motores, cuentan con 3 contactos independientes, teniendo finalmente 11 pines para su utilización, tal como se observa en la siguiente figura:



Figura 4.18. Relé de estado sólido.

Fuente: All Datasheet, (s.f).

Al tomar en cuenta los valores nominales de corriente que circula por cada línea de alimentación del motor, se ha elegido el cable #12 de la tabla AWG para la conexión entre los relés y los motores, teniendo como valores soportados de corriente la siguiente información:

AWG	Dia-mils	TPI	Dia-mm	Circ-mils	Ohms/Kft	Ft/Ohm	Ft/Lb	Ohms/Lb	Lb/Kft	*Amps	MaxAmps
10	101.90	9.8140	2.5881	10383	0.9989	1001.1	31.819	0.0318	31.428	13.844	20.765
11	90.741	11.020	2.3048	8233.9	1.2596	793.93	40.122	0.0505	24.924	10.978	16.468
12	80.807	12.375	2.0525	6529.8	1.5883	629.61	50.593	0.0804	19.765	8.7064	13.060
13	71.961	13.896	1.8278	5178.3	2.0028	499.31	63.797	0.1278	15.675	6.9045	10.357
14	64.083	15.605	1.6277	4106.6	2.5255	395.97	80.447	0.2031	12.431	5.4755	8.2132
15	57.067	17.523	1.4495	3256.7	3.1845	314.02	101.44	0.3230	9.8579	4.3423	6.5134
16	50.820	19.677	1.2908	2582.7	4.0156	249.03	127.91	0.5136	7.8177	3.4436	5.1654
17	45.257	22.096	1.1495	2048.2	5.0636	197.49	161.30	0.8167	6.1997	2.7309	4.0963
18	40.302	24.813	1.0237	1624.3	6.3851	156.62	203.39	1.2986	4.9166	2.1657	3.2485
19	35.890	27.863	0.9116	1288.1	8.0514	124.20	256.47	2.0648	3.8991	1.7175	2.5762

Figura 4.19. Tabla de grosores AWG.

Fuente: American Wire Gauge, (s.f).

Como se puede observar, el cable #12, soporta 13 A como máximo, siendo suficiente para resistir las corrientes manejadas en esta aplicación.

De la misma manera, es posible calcular los valores de los fusibles principales del sistema, ya que al tener los datos de corrientes utilizadas, únicamente se elige un valor conveniente que será explicado más adelante, tomando en cuenta que dicho valor, sea comercializado en el mercado y suficiente para soportar las corrientes que circulan en el sistema, con el fin de cumplir con el objetivo principal que es proteger a todo el circuito eléctrico.

Al realizar pruebas experimentales y al tener en cuenta los valores de corriente consumidos por todo el sistema, se puede llegar a la conclusión de que los fusibles deben proteger de corrientes no mayores a 15A; siendo este valor suficiente para proteger a todo el sistema en caso de existir algún cortocircuito.

Es por ello, que se ha elegido un fusible de 2*20 mm, con capuchón de vidrio y respuesta lenta (clase T).

En la siguiente figura podemos observar el comportamiento del fusible en función corriente- tiempo, con el fin de respaldar lo antes mencionado:

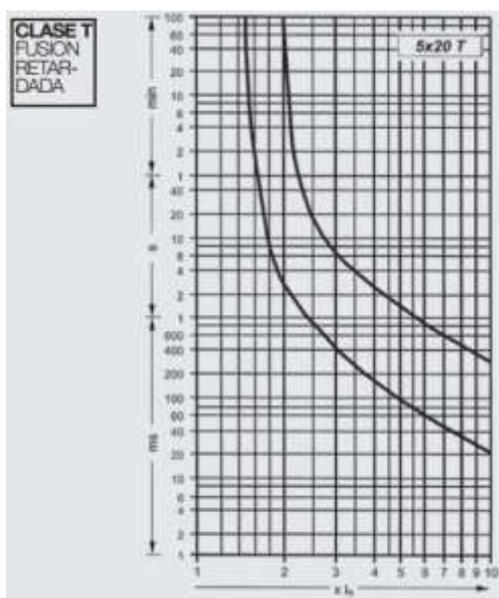


Figura 4.20. Respuesta del fusible clase T.

Fuente: df electric, (s.f).

4.9. DISTRIBUCIÓN DE SENSORES EN ESTRUCTURA DE SILLA

En el siguiente esquema se muestra la distribución de los sensores ultrasónicos, como también de los sensores infrarrojos, tomando en cuenta, que estos, fueron localizados estratégicamente y de acuerdo a las necesidades de la aplicación, haciendo que los sensores infrarrojos de la parte de atrás y el sensor ubicado en la cabeza sean los más prioritarios, tal como se observa en la siguiente figura:

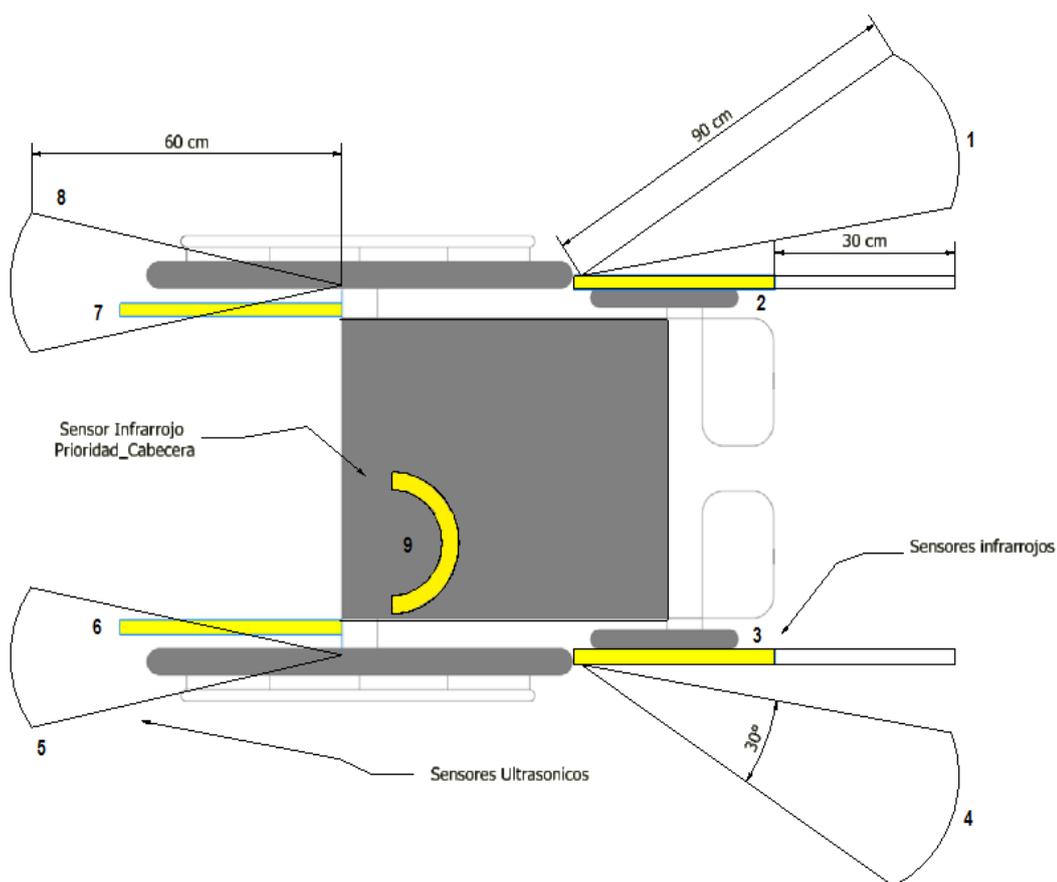


Figura 4.21. Distribución de sensores.

Cada sensor se lo ha colocado después de realizar las respectivas pruebas, reconociendo de esta manera, el lugar más idóneo para su ubicación.

Los detalles y valores de distancia de cada sensor se lo describen en la siguiente tabla:

Tabla 4.8. Descripción de sensores.

Número	Tipo	Descripción
1	Ultrasónico	Sensor en el área frontal izquierda, con 90 cm de rango y un ángulo de 30°.
2	Infrarrojo	Sensor en el área frontal izquierdo, con una señal lineal y un rango de detección de 30 cm.
3	Infrarrojo	Sensor en el área frontal derecho, con una señal lineal y un rango de detección de 30 cm.
4	Ultrasónico	Sensor en el área frontal derecha, con 90 cm de rango y un ángulo de 30°.
5	Ultrasónico	Sensor en el área posterior derecha, con 50 cm de rango y un ángulo de 30°.
6	Infrarrojo	Sensor en el área posterior derecho, con prioridad alta y direccionado al piso, con el objetivo de detección de gradas; su rango de detección es de 40 cm.
7	Infrarrojo	Sensor en el área posterior izquierdo, con prioridad alta y direccionado al piso, con el objetivo de detección de gradas; su rango de detección es de 40 cm.
8	Ultrasónico	Sensor en el área posterior izquierda, con 50 cm de rango y un ángulo de 30°.
9	Infrarrojo	Sensor de cabecera, con prioridad alta y destinado al paro de emergencia con un mínimo movimiento de la cabeza.

La tabla 4.7 detalla brevemente las características de los sensores, siendo los más prioritarios tres sensores infrarrojos que son: sensor cabecera y los dos sensores de la parte posterior.

Se los ha denominado así, ya que éstos cubren las áreas más vulnerables y menos visibles. Los sensores de la parte trasera, están pensados para la detección de gradas, y envían una señal cuando no detecta superficie alguna, es decir, cuenta con lógica inversa, que a más de garantizar el funcionamiento del sensor, informa peligro eminente en los próximos 40 cm. El sensor de cabecera cuenta también con lógica inversa y necesita la detección de un área pequeña del rostro del paciente para poder arrancar el sistema y, si el paciente lo cree conveniente, un mínimo movimiento de la cabeza, cortará la señal, enviando así, una interrupción al controlador y deteniendo inmediatamente la silla de ruedas.

CAPÍTULO 5

5. PRUEBAS Y RESULTADOS

5.1. PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO

Una prueba funcional está basada en la ejecución, revisión y retroalimentación de las funcionalidades previamente impuestas para el sistema. Para obtener resultados útiles y reales, se procedió a realizar dos tipos de pruebas de funcionamiento: mejoramiento y confiabilidad, las mismas que buscan evaluar cada una de las opciones con las que cuenta el sistema. Dicho de otro modo son pruebas específicas, concretas y exhaustivas para probar y validar que el sistema hace lo que debe y sobre todo, lo que se ha especificado.

5.1.1. PRUEBAS PARA MEJORAMIENTO DEL SISTEMA

Estas pruebas fueron realizadas con el fin de evaluar el sistema en la práctica diaria y encontrar sus falencias para ser corregidas y así mejorar el sistema. Dichas pruebas se realizaron en el Coliseo “El Nacional” ubicado en la ciudad de Cotacachi, lugar elegido debido a su amplitud y disposición de movilidad, pudiendo de esta manera interactuar más fácilmente con la silla de ruedas para detectar sus errores.

5.1.1.1. Método

Para esta prueba se emitió los comandos de voz de forma continua dejando actuar el movimiento por un determinado tiempo verificando así las fallas que presenta el sistema.

5.1.1.2. Mejoras

- Cambio de posición de sensores infrarrojos delanteros, puesto que inicialmente estaban ubicados en la parte delantera de la estructura de la

silla sin haberse percatado de la presencia de los apoya pies de la misma, por tanto no brindaban seguridad al detectar con rapidez los obstáculos que se le presentaban. (Fig. 5.1)



Figura 5.1. Sensores infrarrojos delanteros.

- Cambio de posición del sensor infrarrojo de la parte trasera e inclusión de un sensor infrarrojo extra, debido a la falta de seguridad a la hora de detección de gradas o algún desnivel; se decidió situar su posición uno junto a cada llanta y más sobresalidos de la estructura para detectar con mayor fluidez y evitar riesgos traseros. (Fig. 5.2)



Figura 5.2. Sensores infrarrojos traseros.

- Debido al funcionamiento de los motores anteriormente realizado, la cabeza del trinche sujetador del eje del motor se desgastó, provocando que este gire libremente; como solución para ello se acopló un nuevo

trinche mayormente reforzado de bicicleta, el cual brinda al sistema estabilidad y mayor seguridad. (Fig. 5.3)



Figura 5.3. Trinche sujetador del eje del motor.

- En el sensor de paro de emergencia, se adaptó una nueva estructura de apoyo, puesto que la primera, al inicio parecía ser suficientemente rígida para mantener al sensor en la posición determinada, pero cuando se procedieron a realizar las pruebas, esta estructura por el movimiento propio de la silla se iba debilitando y moviéndose, alterando la posición del sensor inicial, afectando así al sistema. (Fig. 5.4)



Figura 5.4. Sensor de paro de emergencia del sistema.

- Ajuste de tiempos para los movimientos precedidos por el comando pulso, es decir ajuste de tiempos para que los movimientos sean exactos, cortos, precisos y no bruscos.
- Al realizar las pruebas, el mayor inconveniente que se encontró, fue el que producían los sensores ultrasónicos, estos no daban lectura alguna y entorpecían todo el sistema haciéndolo bastante lento, la solución fue delimitar su campo de lectura, en otras palabras, se añadió un tiempo en el cual deben esperar una respuesta de algún objeto encontrado, caso contrario deben enviar una distancia mayor que el rango determinado para que la silla se detenga.
- Después de las respectivas pruebas, se decidió priorizar los sensores, es decir, tienen mayor importancia y por tanto prioridad los dos sensores infrarrojos traseros puesto que ellos son los que permiten detectar gradas e impedir que el paciente sufra una caída y el sensor infrarrojo de paro de emergencia ya que es el que paralizará totalmente el sistema en caso de algún contratiempo.

5.1.2. PRUEBAS DE CONFIABILIDAD DEL SISTEMA

Para obtener resultados veraces y eficaces estas pruebas se realizaron en dos lugares distintos, el primero, el coliseo “El Nacional” ubicado en la ciudad de Cotacachi, un lugar amplio, cerrado y en el cual no afecta mayormente la incidencia de ruido y condiciones ambientales externas; el segundo lugar, el parque del barrio El Ejido de la ciudad anteriormente mencionada en el cual existe la afección de ruidos propios de un lugar al aire libre y sometido a condiciones ambientales externas. Cabe aclarar que las pruebas en el parque fueron realizadas en horarios en donde no tenemos mayor incidencia del sol, es decir, en donde este no está en su máximo esplendor para así evitar calor y luminosidad excesiva, ya que los sensores y el reconocimiento sufren daños dando valores erróneos. La finalidad de esta prueba es determinar la efectividad y confiabilidad del sistema sometido a uso continuo.

5.1.2.1. Método

Se procedió a emitir 10 veces cada uno de los comandos de voz dejando actuar el movimiento por un tiempo prudente y de forma continua y se repitió este procedimiento 3 veces en cada lugar anteriormente mencionado. Al finalizar la prueba se obtuvieron estadísticas basadas en los aciertos y errores del sistema de reconocimiento de la orden emitida con su respectivo movimiento, pudiendo obtener de esta manera un porcentaje de confiabilidad del sistema.

Se realizaron también, pruebas para determinar la autonomía de la batería con distintos pesos del paciente, y, además se incluye pruebas de la distancia a la cual los sensores responden frente a la detección de algún obstáculo.

5.1.2.2. Estadísticas

Las pruebas realizadas se indican en la siguiente tabla.

Tabla 5.1. Prueba de funcionamiento N° 1.

LUGAR: Coliseo "El Nacional" - Cotacachi

N° DE PRUEBA: 1

COMANDO DE VOZ	INTENTOS										TOTAL
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
ACTIVAR	x	√	√	√	√	√	√	√	√	√	1
RUMBO	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	0
ADELANTE	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	0
ATRÁS	√	√	√	√	√	√	√	x	√	√	1
DERECHA	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	0
IZQUIERDA	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	0
PAR	√	√	x	√	√	√	√	√	√	√	1
PULSO	√	x	√	√	√	√	√	√	√	√	1
ADE	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	0
TRAS	√	√	x	√	√	√	√	√	√	√	1
DER	x	x	√	√	√	√	√	√	√	√	2
QUIER	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	0
BATERÍA	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	0
TOTAL ERRORES											7
TOTAL PORCENTUAL											5,38%

Tabla 5.2. Prueba de funcionamiento N° 2.

LUGAR: Coliseo "El Nacional" - Cotacachi

N° DE PRUEBA: 2

COMANDO DE VOZ	INTENTOS										TOTAL
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
ACTIVAR	√	√	√	√	√	√	√	√	√	x	1
RUMBO	√	√	√	√	x	√	√	√	√	√	1
ADELANTE	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	0
ATRÁS	√	√	√	x	x	√	√	√	√	√	2
DERECHA	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	0
IZQUIERDA	x	√	√	√	√	√	√	√	√	√	1
PAR	√	√	√	√	√	√	√	√	√	x	1
PULSO	√	√	√	√	√	√	x	√	√	√	1
ADE	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	0
TRAS	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	0
DER	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	0
QUIER	√	x	√	√	√	√	√	√	√	√	1
BATERÍA	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	0
TOTAL ERRORES											8
TOTAL PORCENTUAL											6,15%

Tabla 5.3. Prueba de funcionamiento N° 3.

LUGAR: Coliseo "El Nacional" - Cotacachi

N° DE PRUEBA: 3

COMANDO DE VOZ	INTENTOS										TOTAL
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
ACTIVAR	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	0
RUMBO	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	0
ADELANTE	√	√	√	x	√	√	√	√	√	√	1
ATRÁS	√	√	√	√	√	√	x	√	√	√	1
DERECHA	√	√	√	√	√	√	√	x	√	√	1
IZQUIERDA	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	0
PAR	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	0
PULSO	√	√	√	√	x	√	√	x	√	√	2
ADE	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	0
TRAS	√	√	√	√	x	√	√	√	√	√	1
DER	√	√	√	√	√	√	√	√	x	√	1
QUIER	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	0
BATERÍA	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	0
TOTAL ERRORES											7
TOTAL PORCENTUAL											5,38%

Tabla 5.4. Prueba de funcionamiento N° 4.

LUGAR: Parque del barrio “El Ejido” - Cotacachi

N° DE PRUEBA: 4

HORA: 16:00

COMANDO DE VOZ	INTENTOS										TOTAL
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
ACTIVAR	√	√	√	√	x	√	√	√	√	x	2
RUMBO	√	√	√	√	√	√	√	√	x	√	1
ADELANTE	√	√	x	√	√	x	x	√	√	√	3
ATRÁS	√	√	√	√	x	√	√	x	√	√	2
DERECHA	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	0
IZQUIERDA	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	0
PAR	x	x	√	√	√	√	√	x	√	√	3
PULSO	√	√	√	√	√	√	√	√	√	x	1
ADE	√	√	√	√	√	√	√	√	x	√	1
TRAS	√	√	√	√	x	√	√	√	√	√	1
DER	x	x	x	√	√	√	√	√	√	√	3
QUIER	√	x	√	x	√	√	√	√	√	x	3
BATERÍA	√	√	√	√	√	√	√	√	x	√	1
TOTAL ERRORES											21
TOTAL PORCENTUAL											16,15%

Tabla 5.5. Prueba de funcionamiento N° 5.

LUGAR: Parque del barrio “El Ejido” - Cotacachi

N° DE PRUEBA: 5

HORA: 16:30

COMANDO DE VOZ	INTENTOS										TOTAL
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
ACTIVAR	√	√	√	√	√	√	√	√	√	x	1
RUMBO	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	0
ADELANTE	x	√	√	√	x	√	√	√	√	√	2
ATRÁS	√	√	x	x	√	√	√	√	√	√	2
DERECHA	√	√	√	√	√	√	√	√	x	√	1
IZQUIERDA	√	x	x	√	√	√	√	√	√	x	3
PAR	√	√	√	√	√	√	√	x	√	√	1
PULSO	√	√	√	√	√	√	√	x	x	√	2
ADE	√	√	x	√	√	x	√	√	√	√	2
TRAS	x	x	√	√	√	√	√	x	√	√	3
DER	√	√	x	x	√	√	√	√	√	√	2
QUIER	√	√	√	√	√	x	√	√	x	√	2
BATERÍA	√	√	√	√	√	x	√	√	√	√	1
TOTAL ERRORES											22
TOTAL PORCENTUAL											16,92%

Tabla 5.6. Prueba de funcionamiento N° 6.

LUGAR: Parque del barrio “El Ejido” - Cotacachi

N° DE PRUEBA: 6

HORA: 17:00

COMANDO DE VOZ	INTENTOS										TOTAL
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
ACTIVAR	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	0
RUMBO	√	√	x	√	√	√	√	√	√	√	1
ADELANTE	√	√	√	√	√	√	√	√	x	√	1
ATRÁS	√	√	√	√	√	x	x	√	√	√	2
DERECHA	x	√	√	√	√	√	√	√	√	√	1
IZQUIERDA	√	√	x	√	√	x	√	√	√	√	2
PAR	√	√	√	√	√	√	√	√	x	√	1
PULSO	√	√	√	√	√	x	x	√	√	√	2
ADE	√	√	√	√	√	√	√	x	√	√	1
TRAS	x	x	√	√	√	√	√	√	√	√	2
DER	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	0
QUIER	√	√	x	√	x	√	√	√	√	√	2
BATERÍA	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	0
TOTAL ERRORES											15
TOTAL PORCENTUAL											11,53%

Al tomar en cuenta los resultados de todas las pruebas realizadas, se llega a determinar que el sistema tiene una tasa de error del 5,63% en lugares cerrados y del 14,86% en lugares abiertos, por tanto, la confiabilidad del sistema es de 94,37% y de 85,14%, en ambientes cerrados y en ambientes expuestos al aire libre con las condiciones anteriormente mencionadas (no mayor incidencia de luz y calor solar), respectivamente.

La siguiente tabla muestra las pruebas de duración de la batería, teniendo en cuenta que la prueba se realizó en condiciones normales de trabajo del sistema. Las horas detalladas son horas útiles, es decir, dentro del rango especificado, la silla de ruedas va a funcionar correctamente, presentando un menor desempeño a partir de las 3 horas de uso, pero aún aceptable, pasado dichas horas, el sistema presentará problemas, sobre todo en cuanto a potencia de motores se trata.

Tabla 5.7. Autonomía de la batería.

Prueba para autonomía de la batería (5,8 Km/h)			
Peso silla (Kg)	Peso Paciente (kg)	Hora inicio	Duración total (h)
39,9	61	7:00 AM	5
39,9	39	7:00 AM	5,50

A continuación se muestra los resultados de las distancias a la que los sensores determinan el obstáculo y paralizan la silla:

Tabla 5.8. Distancia de reacción de sensores.

Prueba de reacción de sensores			
# intento	Distancia de frenado (cm)		
	Frontal	Trasero	Gradas
1	7	10	20
2	9	11	15
3	10	9	16
4	8	8	16
5	8	8	18
6	9	9	20
7	8	12	20
8	5	12	19
9	6	12	19
10	6	15	19
11	7	13	18
12	8	13	19
13	8	13	18
14	9	14	20
15	9	13	16
16	10	15	18
17	7	12	18
18	7	11	18
19	8	12	19
20	7	13	18
TOTAL	156	235	364
PROMEDIO	7,8	11,75	18,2

CONCLUSIONES

Al finalizar el trabajo se concluye lo siguiente:

- La efectividad de los sensores al reaccionar frente a un obstáculo es bastante aceptable y con una velocidad instantánea, teniendo como estadísticas que los sensores frontales detienen la silla a una distancia promedio de 7,8 cm, mientras que los traseros la detendrán a 11,75 cm y los sensores que detectan gradas, reaccionarán a una distancia promedio de 18,2 cm; para ello fue necesario delimitar el tiempo de espera de respuesta de los sensores ultrasónicos mediante programación del software, para que estos no esperen indefinidamente la señal de rebote con algún objeto pues si esto sucede cualquier sistema que los contenga se vuelve absolutamente lento e inestable.
- Se garantiza el adecuado funcionamiento del sistema durante tres horas a partir de terminar la carga completa de las baterías, teniendo un desempeño aun aceptable de 5 y 5,50 horas para pesos de 61 kg y 39 kg respectivamente, después de este periodo el sistema presentará errores de reconocimiento de voz y de movimiento.
- Al ser personalizable el reconocimiento de voz, los comandos deben ser emitidos con la misma fonética con la que fueron grabados al entrenar el módulo, siendo así, el sistema presenta una tasa de error de reconocimiento, del 5,63% en lugares cerrados y del 14,86% en lugares abiertos, por tanto, la confiabilidad del sistema es de 94,37% y de 85,14%, en ambientes cerrados y en ambientes expuestos al aire libre donde no exista mayor incidencia del sol, es decir, cuando este no se encuentre en su máximo esplendor para así evitar calor y luminosidad excesiva, respectivamente, además, el reconocimiento de voz actúa correctamente en lugares con un nivel de ruido de hasta 50 dB, en este rango se encuentran los sonidos generalmente existentes en una casa, teniendo en cuenta que una conversación en voz baja está a 40 dB;

pasado ligeramente este límite el reconocimiento de voz puede generar malas interpretaciones e incluso será necesario repetir el comando hasta que sea reconocido; si se excedió el valor especificado en un rango apreciable, el sistema de reconocimiento no funcionará. (Ver Anexo Y)

- La estructura de la silla no fue alterada en gran medida, logrando de esta manera obtener un modelo práctico y fácil de trasladar a cualquier lugar, pues, se repliega y aún conserva las partes desmontables como cualquier silla de ruedas normal; pero al tratar de llevar esto a cabo, el mayor inconveniente fue el radio de la llanta, este mide 24 in y al ser tan grande debilita el torque del motor.
- El sistema está diseñado para que se movilice en lugares amplios y con un nivel aceptable de libertad, en los cuales sea posible realizar los movimientos de forma fluida.

RECOMENDACIONES

- Para el correcto funcionamiento del sistema se recomienda utilizar y aplicar el manual de usuario y de mantenimiento del equipo; si en algún caso se encuentran problemas que no han sido mencionados en dichos manuales, comunicarse con los autores del proyecto o especialistas en esta rama.
- Para que el sistema de reconocimiento de voz funcione adecuadamente, es recomendable cambiar de micrófono a uno de mejor calidad, el mismo que brinde mayores filtros de ruido.
- Para futuras investigaciones y mejoramientos del sistema se debería implementar movimientos más cortos y precisos, para que de esta manera la silla pueda interactuar en lugares con mayor restricción de movilidad, siendo necesario para ello, el cambio de motores por unos que presenten más número de polos, además de incluir un freno independiente para cada una de las llantas.
- En mejoras futuras, habría que disminuir el radio de la llanta, para así, aprovechar el torque del motor, logrando que la silla soporte a personas con mayor peso corporal.
- Es recomendable realizar un estudio sobre las llantas locas delanteras para encontrar un mejor sistema que brinde mayor estabilidad y fijación en los movimientos de la silla de ruedas.

BIBLIOGRAFÍA

ARTÍCULOS CIENTÍFICOS:

- Amarilla, J. (1995). *Baterías de iones de Litio*. 34(5-6). Madrid: Instituto de Ciencia de materiales de Madrid, Sociedad española de Cerámica y Vidrio. Recuperado de <http://boletines.secv.es/upload/199534463.pdf>
- Angulo, J., Angulo, I. y Etxebarria, M. (2010). *Aplicaciones del módulo reconocimiento de voz "VRbot" con microcontroladores PIC*. Recuperado de http://www.redeweb.com/_txt/666/62.pdf
- Arévalo, M. y Pino, M. (s.f). *Control por voz de un robot explorador tipo oruga*. 19. Quito: Escuela Politécnica Nacional. Recuperado de <http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/9808/1/2005AJIEE-10.pdf>
- Armstrong, W., Borg, J., Krizack, M., Lindsley, A., Mines, K., Pearlman, J.,...Sheldon, A. (2008). *Pautas para el suministro de silla de ruedas manuales en entornos de menores recursos*. Suiza. Recuperado de http://www.who.int/disabilities/publications/technology/wheelchairguidelines_sp_finalforweb.pdf
- Calle, L., Guaraca, P. y Guzhñay, A. (s.f). *Motores Brushless DC*. Cuenca: Universidad Politécnica Salesiana. Recuperado de <https://es.scribd.com/doc/100367501/Motor-Brushless#scribd>
- Ferdeghini, F., Brengi, D. y Lupi, D. (s.f). *Sistema de detección combinado para sensores ultrasónicos*. Buenos Aires: Centro de investigación y Desarrollo en Electrónica e informática, Instituto Nacional de Tecnología Industrial. Recuperado de <http://www.inti.gob.ar/electronicaeinformatica/instrumentacion/utic/proyectos/sumar/download/combi.pdf>
- Ferdeghini, F., Comastri, A., Gwire, S. y Lupi, D. (s.f). *Sensores ultrasónicos: respuesta a distintas formas de onda de emisión*. Buenos Aires: Centro de investigación y Desarrollo en Electrónica e informática, Instituto Nacional de Tecnología Industrial. Recuperado de <http://www.inti.gob.ar/electronicaeinformatica/instrumentacion/utic/publicaciones/aadeca98/ondas.pdf>
- González, R. y Martell, O. (2010). *Sensor Infrarrojo*. México: Universidad Nacional Autónoma de México. Recuperado de <http://pacific.fip.unam.mx/cursos/sensor%20infrarrojo/INFRA.pdf>
- Juanpere, R. (s.f). *Técnicas de control para motores Brushless*. España: Motion control department. Recuperado de <http://www.ingeniamc.com/Es/-Control-techniques-for-brushless-motors.pdf>

Juanpere, R. y Vila, M. (s.f). *Alineación inicial de un motor PMSM con encoder incremental mediante sensores de efecto Hall*. España: Motion control department. Recuperado de <https://es.scribd.com/doc/96727108/Encoder-Efecto-Hall#scribd>

Navarro, D., Rios, L. y Parra, H. (2004). *Sensores de ultrasonido usados en robótica móvil para la medición de distancias*. (25). Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira. Recuperado de <http://revistas.utp.edu.co/index.php/revistaciencia/article/view/7183/4207>

Vargas, D., Perlaza, D. y Delgado, A. (s.f). *Diseño e implementación de un robot móvil controlado con chip adn en fpga*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia. Recuperado de http://www.iberchip.net/iberchip2005/articles/9/9--daperlazag-robot_ib05.pdf

Villafáfila, R., Peña, D., & Cros, L. (s.f). *Baterías para aplicaciones estacionarias*. Barcelona: Centro de Innovación Tecnológica en convertidores estáticos y accionamientos. Recuperado de <https://es.scribd.com/doc/240986269/17058317-Baterias-Estacionarias>

ARTÍCULOS ONLINE:

Adjustable infrared sensor switch manual. (s.f). Recuperado el 12 de febrero de 2014 desde *mcu*: http://dl.btc.pl/kamami_wa/e18-d80nk-ds.pdf

ARDUINO MEGA 2560. (s.f). Extraído el 12 de enero de 2014 desde <http://arduino.cc/>

Circuitos Electrónicos de Radio Control. (19 de febrero de 2008). Recuperado el 15 de Abril de 2014 desde *E - Radiocontrol*: http://www.e-radiocontrol.com.ar/?Motores_Brushless

Como funciona una pila. (19 de febrero de 2009). Extraído el 23 de marzo de 2014 desde *POWERSHOP*: <http://www.powershop.com.ar/news/view/9.html>

Comparación de sistemas de sensores. (s.f). Extraído el 23 de noviembre de 2014 desde *Services Group*: <http://www.s3-sg.com/es/camaras-infrarrojas-comparaci%C3%B3n-de-sistemas-de-sensores.html>

Echeverría, E. (s.f). *Ruidos Molestos*. Extraído el 13 de enero de 2015 desde *Revista Frío y Calor N° 106*: <http://www.frioycalor.cl/106/tema7.html>

Fotos impresionantes. (s.f). Extraído el 6 de marzo de 2014 desde flickr: <http://www.flickr.com/photos/rjl20/136210773>

Historia de Arduino y su nacimiento. (05 de junio de 2012). Recuperado el 24 de marzo de 2015 desde *BOTSiencie*: <https://botscience.wordpress.com/2012/06/05/historia-de-arduino-y-su-nacimiento/> (Arduino)

- Infrared Distance Sensor Type E18-D80NK.* (s.f). Extraído el 18 de Abril de 2014 desde Wikispaces: <http://arduino-info.wikispaces.com/InfraredDistanceSensor>
- Inversion de giro de un motor trifásico.* (27 de Septiembre de 2011). Extraído el 8 de Febrero de 2014 desde Over: <http://cbitis195c8.blogspot.com/2011/09/inversion-de-giro-de-un-motor-trifasico.html>
- Keeping, S. (19 de junio de 2013). *Control de los motores BLDC sin sensores a través de la fuerza contraelectromotriz.* Recuperado el 18 de Abril de 2014 desde Digi-key: <http://www.digikey.com/es/articles/techzone/2013/jun/controlling-sensorless-blcd-motors-via-back-emf>
- Motores Brushless o BLDC.* (s.f). Extraído el 15 de Marzo de 2014 desde Neoteo: <http://www.neoteo.com/motores-brushless-blcd/>
- Relé de estado sólido.* (s.f).Extraído el 18 de Julio de 2014 desde All Datasheet: <http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/95504/ETC/JZX-18FF/AAC3Z1QD.html>
- Sensor de distancia por ultrasonido US-020.* (s.f). Extraído el 15 de julio de 2014 desde BOTSciencie: http://botscience.net/store/index.php?route=product/product&product_id=87
- Tabla de grosores AWG.* (s.f). Extraído el 11 de enero de 2014 desde <http://www.lcardaba.com/articles/awg.htm>
- Todo sobre sensores de ultrasonidos y Arduino.* (8 de Abril de 2013). Extraído el 14 de Abril de 2014 desde Opiron electronics: <http://www.opiron.com/portfolio/sensores-de-ultrasonidos-arduino-opiron>
- Tratamiento digital de señales.* (s.f). Extraído el 15 de enero de 2014 desde UNED: http://portal.uned.es/portal/page?_pageid=93,27302119&_dad=portal&_schema=PORTAL&idAsignatura=71013101

LIBROS:

- Angulo, J. (2008). *DsPic Diseño práctico de aplicaciones.* McGraw Hill.
- Brushless DC motor controller.* (s.f). ON Semiconductor. Recuperado de http://www.onsemi.com/pub_link/Collateral/MC33035-D.PDF
- Guía rápida del módulo de reconocimiento de voz VRBot.* (s.f). España: Microsystems engineering. Recuperado de <https://es.scribd.com/doc/213589342/EasyVR-Guia-Rapida>
- Hua, H., Wang, Y. y Yan, D. (2002). *A low-cost dynamic range-finding device based on amplitude-modulated continuous ultrasonic wave.*

- Kao, G. y Probert, P. (2000). *Feature extraction from a Broadband Sonar sensor for Mapping structured environments efficiently.*
- Marioli, D., Narduzzi, C., Offeli, C., Petri, D., Sardini, E. y Taroni, A. (1992). *Digital time-of-flight measurement for ultrasonics sensors.*
- Sabatini, A. (1995). *A digital signal-processing technique for compensating ultrasonic sensors.*
- Torrente, O. (s.f). *Arduino: Curso práctico de información.* España: RC libros.

TESIS:

- Abreu, M. (1990). *Análisis de señales ultrasónicas para la definición de entornos en el campo de la robótica.* (Tesis de pregrado). Universidad Complutense de Madrid, España. Recuperado de <http://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=8627>
- Alencastro, M. y De la Cruz, T. (2011). *Dispositivo de reconocimiento de voz en personas con discapacidad en el habla.* (Tesis de pregrado). Escuela politécnica del Ejército, Latacunga. Recuperado de <http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/3668/1/T-ESPEL-0830.pdf>
- Barrera, D. y Maldonado, M. (2013). *Diseño e implementación de un sistema de transmisión variable continua (CVT), como nueva técnica para la locomoción de una silla de ruedas.* (Tesis de pregrado). Escuela Politécnica del Ejército, Latacunga. Recuperado de <http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/6401/1/T-ESPEL-MEC-0008.pdf>
- Cortez, H. y Maya, D. (2008). *Desarrollo e implementación de un sistema móvil de conducción para niños con insuficiencia motriz cerebral del centro San Juan de Jerusalén.* (Tesis de pregrado). Escuela Politécnica del Ejército, Latacunga. Recuperado de <http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/462/1/T-ESPE-019525.pdf>
- Cotte, J. y Moreno, A. (2010). *Diseño de control robusto de velocidad de motores brushless para robótica aérea.* (Tesis de pregrado). Universidad Nacional de Colombia, Colombia. Recuperado de <http://www.bdigital.unal.edu.co/1896/>
- Escobar, C., Martínez, J. y Téllez, G. (2005). *Control de un motor brushless DC con frenado regenerativo.* (Tesis de pregrado). Pontificia Universidad Javeriana, Colombia. Recuperado de <http://www.javeriana.edu.co/biblos/tesis/ingenieria/tesis89.pdf>
- García, J. (2011). *Desarrollo de un controlador para motores DC brushless basado en CompactRIO y LabVIEW de National Instruments para el estudio de nuevos*

- algoritmos decontrol.* (Tesis de pregrado). Universidad Carlos III de Madrid, España. Recuperado de http://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/13615/PFC_JuanMiguel_Garcia_Haro.pdf?sequence=1
- García, K. y Sánchez, G. (2007). *Administración de conocimiento para personalizar una silla de ruedas que evite que personas con paraplejia total en miembros inferiores se hagan daño.* (Tesis de pregrado). Centro de investigación y estudios avanzados del IPN. Recuperado de <http://delta.cs.cinvestav.mx/~matias/ReporteFinal1.pdf>
- Gosálbez, J., Salazar, A., Miralles, R., Bosch, I. y Vergara, L. (2009). *Mejora de la detección y caracterización de materiales con un sistema automático de ultrasonidos.* (Tesis de pregrado). Universidad Politécnica de Valencia, España. Recuperado de http://ursi.usc.es/articulos_modernos/articulos_gandia_2005/articulos/PS3/646.pdf
- Langarica, D. (2010). *Control de un Motor Brushless para Aplicación a Vehículos Eléctricos.* (Tesis de maestría). Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, México. Recuperado de http://www.cenidet.edu.mx/subaca/web-elec/tesis_mc/243MC_dlc.pdf
- Manzano, H. y Tapia, C. (2013). *Evaluación de la plataforma Arduino e implementación de un sistema de control de posición horizontal.* (Tesis de pregrado). Universidad Politécnica Salesiana sede Guayaquil, Ecuador. Recuperado de <http://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/5522/1/UPS-GT000511.pdf>
- Panta, J. (2012). *Control domótico por voz.* (Tesis de pregrado). Universidad Politécnica de Valencia, España. Recuperado de <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/17631/Memoria.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Ulloa, H. y Rodriguez, T. (2012). *Análisis y estudio de los sensores aplicados a la mecatrónica para prácticas en el laboratorio de electrónica control y automatismo utilizando el módulo de entrenamiento ni-gnet-015.* (Tesis de pregrado). Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, Guayaquil. Recuperado de <http://repositorio.ucsg.edu.ec/bitstream/123456789/240/1/T-UCSG-PRE-TEC-IECA-2.pdf>
- Zeballos, A. (2011). *Diseño e implementación de un sistema domótico de seguridad inalámbrica para un laboratorio de telecomunicaciones.* (Tesis de pregrado). Pontificia universidad católica del Perú, Lima. Recuperado de http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/123456789/908/ZEBALLOS_CHONG_ALDO_SISTEMA_DOMOTICO_LABORATORIO.pdf?sequence=1

ANEXOS

ANEXO A. MANUAL DEL USUARIO.

1. Precauciones

- Evitar que la silla de ruedas tenga caídas y/o golpes fuertes.
- Al trasportarla de un lugar a otro, evitar movimientos bruscos y buscar la posición adecuada para ser transportada.
- No manipular los sensores.
- No tocar las placas electrónicas del sistema.
- No dejar la silla en ambientes expuestos a condiciones climáticas como lluvia, polvo o elevadas temperaturas.
- No utilizar la silla de ruedas si los neumáticos se encuentran con bajo nivel de aire.
- No exceder de 105 libras de peso corporal.
- No exponer a ambientes ruidosos.
- No exponer en lugares donde exista altas corrientes de viento (brisa ligera cuya velocidad del viento no sobrepase los 15 Km/h).
- Manifestar los comandos de voz con la mayor fluidez posible y con el mismo tono de voz con el que fueron grabados.

2. Introducción

La silla de ruedas controlada por comandos de voz fue diseñada para brindar ayuda y una mejor calidad de vida a personas cuadripléjicas; dicha silla efectúa un movimiento específico al recibir una orden del usuario; se debe tener en cuenta que la silla está diseñada para desenvolverse en lugares amplios y mayormente despejados, con una superficie totalmente plana y procurando en su mayoría sea lisa.

3. Especificaciones técnicas

El sistema consta de dos baterías externas recargables de 36VDc cada una, que mediante circuitos reductores de voltaje se obtiene los voltajes necesarios para alimentar todo el sistema:

- Alimentación de motores 36VDc

- Alimentación placa principal 5VDc
- Alimentación Plataforma ARDUINO 12VDc
- Alimentación sensores 5VDc

4. Ejecución de movimientos

Para la locomoción de la silla es necesario que el usuario conozca los siguientes comandos de voz:

- Comando de inicio: **Activar**
Este comando activa todo el proceso, es necesario emitirlo una única vez al encender el sistema.
- Comando de acceso para movimiento continuo: **Rumbo**
La palabra de acceso debe ser emitida antes de manifestar el primer comando para un movimiento continuo.
- Comandos de movilidad para movimiento continuo: **Adelante, izquierda, derecha, atrás.**
Estos comandos realizan los movimientos respectivos de acuerdo a su nombre con movimiento continuo.
- Comando de acceso para movimiento por pulsos: **Pulso**
Esta palabra debe ser dictada como clave para empezar a realizar algún movimiento corto, seguida de un comando de movilidad por pulsos.
- Comandos de movilidad por pulsos: **ade, tras, quier, der.**
Estas instrucciones obedecen al comando pulso, con ellas se consigue un movimiento corto y preciso.
- Comando de detención del sistema: **Par**
Este comando tiene prioridad ante cualquier otro comando, es decir que se lo puede manifestar en cualquier momento para que la silla se detenga.

Ejemplos de ejecución de comandos:



Ejemplos de prioridad del comando paro:



5. Encendido, apagado y reseteo del sistema

Para encender el sistema, es necesario girar suavemente el switch de llave de encendido/ apagado ubicado en el manubrio de la silla de ruedas.



Al encender el sistema y sin haber aun pronunciado comando alguno, la silla emitirá un sonido diciendo “**detectado**”, esto le informará que el módulo de reconocimiento de voz fue reconocido por el sistema.

Si el dispositivo no emite este sonido, proceda a resetear el sistema, para esto, gire nuevamente el switch a la posición de apagado, espere unos segundos y vuelva a regresarlo a la posición de encendido.

Al emitir el comando “**Activar**”, el sistema responderá diciendo “**Sistema Activado**”, lo que significa que el módulo de reconocimiento de voz está listo para recibir comandos.

En caso de no escuchar este aviso, proceda a decir nuevamente el comando “**Activar**” procurando decirlo con la misma fonética con la que fue entrenado el módulo, repita esta acción las veces que sean necesarias hasta que la silla emita el sonido.

Una vez listo el módulo para recibir instrucciones, este emitirá un pequeño “**bip**” después de cada comando recibido para informarle que la orden ha sido receptada; si no emite este sonido, vuelva a pronunciar el comando.

En caso de que durante el proceso el sistema deje de recibir comandos, proceda a resetear el mismo.

Para apagar el sistema, únicamente cambie de posición el switch de encendido/apagado.

6. Apoya pies

Para colocar al paciente en la silla de ruedas, es necesario hacer a un lado los apoya pies, para esto, vista la silla de frente, en el apoya pies de su derecha, tome la almohada de apoyo del muslo y gírela suavemente hacia la derecha, posteriormente, proceda a girar el apoya pie en sentido de las manecillas del reloj, todo esto, vista la silla de frente.



Para el apoya pies de su izquierda, repita el mismo proceso, a diferencia de que debe mover el apoya muslo hacia su izquierda y el apoyador de pie en contra de las manecillas del reloj.



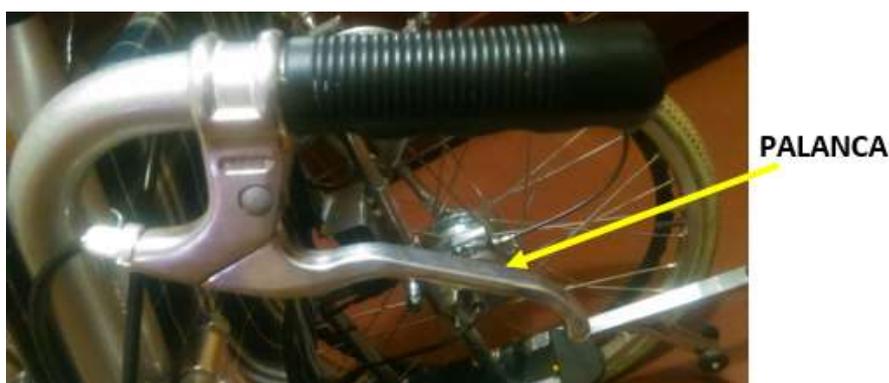
Una vez ubicado el paciente en la silla, repita los procesos anteriores, moviendo primeramente el apoya pies, para luego hacerlo con el apoya muslo, regresándolos así a su posición inicial.

Para regular la elevación de las piernas, hale hacia usted la pequeña palanca ubicada en la estructura del apoyador de piernas y hale o empuje el apoyo pierna, según la posición requerida.



7. Espaldar

Es posible reclinar el espaldar hasta cierto nivel para mayor comodidad del usuario, para esto, contraiga la palanca ubicada en el manubrio de la silla y coloque el espaldar en la posición deseada.



8. Sensores Frontales

Poner los sensores frontales en su adecuada posición, para esto, tome el mango contenedor del sensor, gire suavemente hacia la derecha del paciente y hale cuidadosamente hasta que sienta el límite de extensión, una vez realizado esto, gire nuevamente hacia la izquierda del paciente para que el mango del sensor quede asegurado.

MANGO CONTENEDOR DEL SENSOR



Para encoger nuevamente los sensores, una vez que haya terminado de usar el sistema, repita las acciones anteriormente descritas pero en lugar de halar, ahora empuje.



EXTENSIÓN FINAL DEL SENSOR

9. Sensor de paro de emergencia

Antes de empezar a utilizar el sistema, ubicar el sensor de paro de emergencia en la posición adecuada, adaptándolo al paciente, es decir asegurándose que éste apunte al pómulo del mismo y que con un bastante corto giro de la cabeza hacia la izquierda del paciente cambie de estado, en otras palabras, que apague su pequeño foco y el sistema emita un sonido con una frecuencia seguida; al hacer este pequeño movimiento, el sistema se detendrá entendiéndolo así como paro de emergencia.



SENSOR DE PARO DE EMERGENCIA

10. Micrófono

Colocar la base del micrófono alrededor del cuello del usuario, asegurándose que este quede a nivel de la boca para que el reconocimiento de voz no se vea afectado.



11. Baterías

Se puede verificar el estado de las baterías presionando el pulsador que se encuentra en la parte frontal de la misma, al hacerlo, se encenderán unas celdas de luces, la luz verde indica el nivel de carga y la roja la descarga.

Tenga en cuenta que las baterías se deben recargar después de haber el sistema funcionado durante tres horas, para de esta manera garantizar el correcto funcionamiento del mismo.



En caso de necesitar cargar las baterías, es necesario conectarlas a la red eléctrica de 110VAc a través del cargador incluido, al cargar las baterías, asegurarse que el sistema se encuentre apagado.



El cargador de las baterías muestra tres estados diferentes:

- Luz azul: cuando el cargador está conectado al suministro eléctrico pero no a la batería.
- Luz roja: cuando el nivel de la batería está bajo; por lo tanto se encuentra en proceso de carga.
- Luz verde: cuando el nivel de carga de la batería esta completado. Desconecte.



ANEXO B. MANUAL DE MANTENIMIENTO.

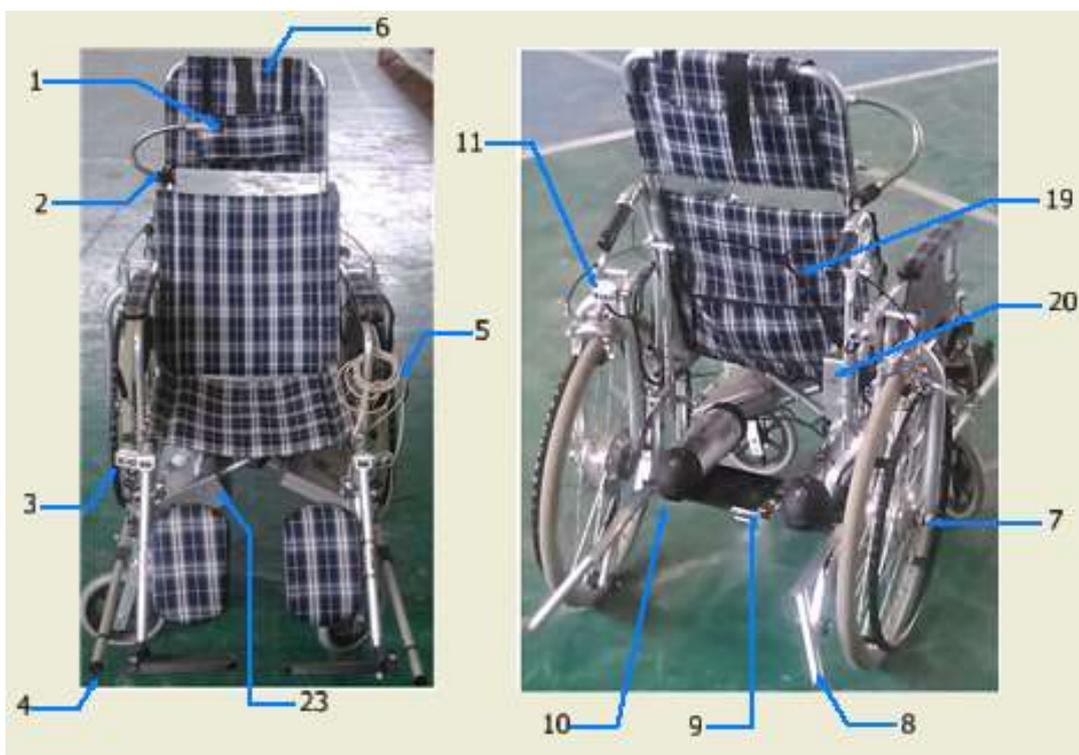
1. Precauciones

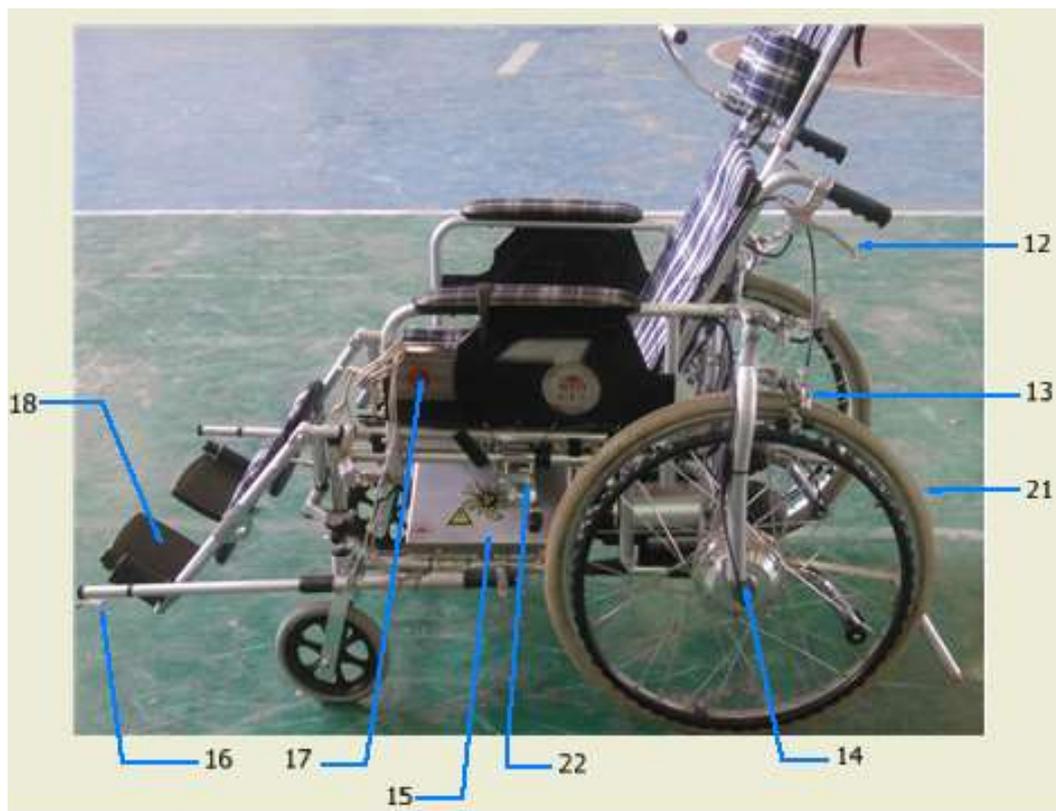
- Si se requiere desarmar la silla, hacerlo cuidadosamente y poniendo mucha atención al orden de las piezas a desarmar.
- Si es necesario estar en contacto con las placas electrónicas, no tomar estas con la mano directamente, porque la estática del cuerpo humano puede provocarles daños irreparables.
- Desconectar cuidadosamente.
- Al realizar la limpieza externa, tener cuidado con el cableado y sensores.

2. Introducción

Es muy importante que la silla de ruedas tenga mantenimiento y monitoreo constante de su buen funcionamiento, para así evitar daños irreparables.

El mantenimiento que requiere no es complicado ni tampoco lleva mucho tiempo, es accesible a todos y fácil de llevarlo a cabo.





1. Paro de emergencia.
2. Base de sensor.
3. Sensor ultrasónico frontal.
4. Sensor infrarrojo derecho.
5. Cables de grabación.
6. Apoyacabeza.
7. Motor 2.
8. Sensor de gradas.
9. Base batería.
10. Baterías.
11. Sensor ultrasónico trasero.
12. Manija para reclinar la silla.
13. Frenos.
14. Motor 1.
15. Caja de protección de placa de control.
16. Sensor infrarrojo izquierdo.
17. Parlante.
18. Reposapiés.
19. Capuchón de cables para frenos.
20. Base de servomotor.
21. Llanta.
22. Freno manual.

23. Caja de protección placa de potencia.

3. Mantenimiento de la batería

Es indispensable monitorear diariamente el estado de carga de la batería y colocarla a cargar cuando sea necesario.

Se debe poner atención al tiempo de carga, si la carga está completa desconectar de la red eléctrica, para no acortar el tiempo de vida de la batería.

En caso de ser necesario extraer las baterías de su lugar por alguna situación, desconecte el cable de alimentación de cada una de ellas, introduzca la llave de seguridad y cambie su posición manteniéndola así, para de esta manera, quitar la sujeción de la misma, y proceda a retirarla.



Para ubicarla nuevamente en su sitio, únicamente colóquela con cuidado poniéndola en la forma correcta para que se adecue a la base, luego conecte el cable de alimentación.

4. Mantenimiento de los neumáticos

Revisar el aire de los neumáticos una vez por semana, y si es necesario inflarlos, hacerlo con cuidado y percatarse de que no queden muy inflados.

Realizar el cambio de llanta cuando sea necesario, es decir cuando estas ya estén lisas, no se puede aproximar el tiempo puesto que el desgaste de la llanta depende del uso de la silla de ruedas.

5. Lubricación del cable de freno

Realizar la lubricación del cable de freno una vez cada dos meses, para así garantizar que el mismo este suave y que el servomotor no sobredimensione su trabajo.

6. Limpieza de sensores

Es necesario realizar una limpieza exterior de los sensores, es decir quitarles el polvo, porque este puede estar interfiriendo el momento de enviar las señales.

7. Limpieza de la estructura

Realizar dos veces al mes una limpieza de la estructura, para así evitar que se deteriore fácilmente.

8. Motor

Verificar semanalmente que los ejes de los motores se encuentren en la posición correcta en sus sujetadores.

9. Tabla de Mantenimiento preventivo

MANTENIMIENTO PREVENTIVO			
ITEM	ACTIVIDAD REQUERIDA	POSIBLES RESULTADOS	OPCIONES DE SOLUCIÓN
ELÉCTRICO			
Switch de encendido	Revisar el correcto funcionamiento, realizando varias pruebas de encendido.	Sistema no enciende	Revisar switch de encendido de baterías.
			Revisar cables desoldados.
		Chispa al encender	Cambio de switch.
Micrófono	Comprobar el correcto estado del micrófono.	Sistema no reconoce comandos de voz.	Revisar switch de activación del micrófono.
	Realizar pruebas, emitiendo comandos y ver su eficiencia.		Verificar estado del cable.
			Observar si el plug se encuentra conectado correctamente.
			Cambio de pila del micrófono.
Sensores	Limpiar y revisar los puntos de suelda.	Alarma de sensores prioridad encendida.	Sensores de gradas muy separados del piso.
			Paro de emergencia mal posicionado.
			Revisar cableado de sensores.
			Revisar led de activación de sensores infrarrojos.
			Cambio de sensores deteriorados.
	Revisar la correcta posición de los sensores, ajustarlos, para luego probar su funcionamiento.	Silla se detiene sin obstáculo alguno.	Sensores mal posicionados.
			Limpiar sensores.
			Revisar cableado y soldaduras de sensores.
			Cambio de sensores deteriorados.
			Sensores mal posicionados.
	Silla no detecta obstáculos.	Revisar led de sensores infrarrojos.	
		Revisar cableado y soldaduras de sensores.	
		Cambio de sensores deteriorados.	
Placas electrónicas	Realizar limpieza de las placas, verificar el ajuste de bornas y el correcto estado del cableado interno.	Placa de potencia no enciende.	Verificar la alimentación de energía.
			Verificar el estado de fusible principal.
			Comprobar el correcto ajuste de cables.
		Placa de control no recibe alimentación.	Comprobar estado de fusibles de alimentación.
			Revisar elementos reguladores de voltaje.
		Alarma de fallo del sistema activado.	Verificar el correcto ajuste de cables.
			Revisar el correcto posicionamiento de arduinos y módulo de reconocimiento.
	Limpiar de placas electrónicas.		
Parlante	Comprobar el correcto funcionamiento.	Emite sonidos borrosos/No emite sonido alguno.	Revisar cableado y soldaduras.
			Cambio de parlante.
BATERÍAS			
Prueba de carga.	Verificar el tiempo de carga de la batería en comparación al valor del tiempo inicial.	Batería no carga.	Verificar funcionamiento del cargador.
		Batería carga muy rápido/lento.	Comprobar estado del plug de alimentación.
Conexiones	Revisar el cableado de conexión hacia las placas.	Cables en mal estado.	Cubrir con cinta aislante o cambiar cables defectuosos.
Prueba de descarga	Revisar niveles de batería luego de una rutina de trabajo para posteriormente comprobar con valores iniciales.	Baterías se descargan muy rápido.	Cambio de batería.

RUEDAS			
Ruedas	Revisar estado y lubricar.	Labrado de llantas neumáticas en mal estado.	Cambio de llantas.
		Llantas delanteras desgastadas.	
		Ruedas locas con dificultad al girar.	Lubricación en partes móviles.
Presión	Revisar presión de aire en llantas neumáticas.	Fuga de aire en llantas.	Parchar tubo.
		Llantas con poca presión de aire.	Inflar hasta el estado adecuado.
Tuercas	Ajuste.	Tuercas flojas.	Ajustar.
		Tornillos sin tuercas.	Completar tuercas perdidas.
MOTORES			
Bobinado	Revisión del estado de cada bobina.	Bobinas con señales físicas de rozamiento.	Cambio de rodamientos.
		Alambre de cobre sin barniz.	Tornillos de carcasa mal ajustados.
Rodamientos	Revisar y cambiar en el caso de requerirlo.	Rodamiento reseco.	Engrasar internamente los rulimanes.
		Giro de rodamiento sin ejercer fricción.	Cambio de rodamiento.
Transmisión	Revisar el estado y engrasar piñones.	Piñones resacos.	Engrasar sistema de transmisión.
		Dientes de piñones incompletos.	Comunicarse con un especialista.
Cableado	Revisar estado de empalmes.	Empalmes desoldados.	Soldar nuevamente o colocar mayor aporte de estaño.
ESTRUCTURA			
Condición física	Diagnosticar fallas por desgaste en estructura.	Soldaduras en mal estado.	Soldar en lugares necesarios.
		Partes defectuosas.	Reparar o reemplazar si es posible.
Lubricación	Lubricar partes móviles.	Partes móviles resacas.	Lubricar.
Tuercas	Ajuste.	Tuercas flojas.	Ajustar.
		Tuercas aisladas.	Cambiar tornillos y tuercas.
		Tornillos sin tuercas.	Completar tuercas incompletas.
FRENOS			
Servomotor	Revisar su correcto funcionamiento.	Motor no se activa.	Revisar alimentación.
			Revisar estado de cable de alimentación.
		No tiene fuerza.	Revisar alimentación.
			Cambio de servomotor.
Motor con sonido extraño.	Cambio de servomotor.		
Polea	Revisar su estado y ajustar el tornillo correspondiente.	Tornillo de polea flojo.	Ajustar tornillo.
		Polea en mal estado.	Cambio de polea.
Cables	Lubricar fundas y cambiar cables.	Fundas de cables en mal estado.	Cambio por fundas nuevas.
		Hebras de cable rotos.	Cambio de cables.
		Excesiva fricción entre cable y funda.	Lubricación de cables.
Zapatatas	Cambio y ajuste de tuercas.	Zapatatas flojas.	Ajustar tuerca de sujeción.
		Zapatatas desgastadas.	Cambio de zapata.
Lubricación	Lubricar partes móviles.	Partes móviles resacas.	Lubricar.

10. Check List de Mantenimiento preventivo.

CHECK LIST DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO						
ITEM	ACTIVIDAD REQUERIDA	Frecuencia (meses)			Estado	Observaciones
		3	6	8	x/√	
ELÉCTRICO						
Switch de encendido	Revisar el correcto funcionamiento, realizando varias pruebas de encendido.	√				
Micrófono	Comprobar el correcto estado del microfono.	√				
	Realizar pruebas, emitiendo comandos y ver su eficiencia.					
Sensores	Limpia y revisar los puntos de suelda.		√			
	Revisar la correcta posición de los sensores, ajustarlos, para luego pobrar su funcionamiento.					
Placas electrónicas	Realizar limpieza de la placas, verificar el ajuste de bornas y el correcto estado del cableado interno.		√			
Parlante	Comprobar el correcto funcionamiento.		√			
BATERÍAS						
Prueba de carga	Verificar el tiempo de carga de la batería en comparación al valor del tiempo inicial.		√			
Conexiones	Revisar el cableado de conexión hacia las placas.	√				
Prueba de descarga	Revisar niveles de batería luego de una rutina de trabajo para posteriormente comprobar con valores iniciales.		√			
RUEDAS						
Ruedas	Revisar estado y lubricar.		√			
Presion	Revisar presión de aire en llantas neumáticas.	√				
Tuercas	Ajuste.		√			
MOTORES						
Bobinado	Revisión del estado de cada bobina.			√		
Rodamientos	Revisar y cambiar en el caso de requerirlo.			√		
Transmisión	Revisar el estado y engrasar piñones.		√			
Cableado	Revisar estado de empalmes.			√		
ESTRUCTURA						
Condición física	Diagnosticar fallas por desgaste en estructura.		√			
Lubricación	Lubricar partes móviles.		√			
Tuercas	Ajuste.		√			
FRENOS						
Servomotor	Revisar su correcto funcionamiento.		√			
Polea	Revisar su estado y ajustar el tornillo correspondiente.	√				
Cables	Lubricar fundas y cambiar cables.	√				
Zapatas	Cambio y ajuste de tuercas.	√				
Lubricación	Lubricar partes móviles.		√			

Firma
 Responsable 3 meses

Firma
 Responsable 6 meses

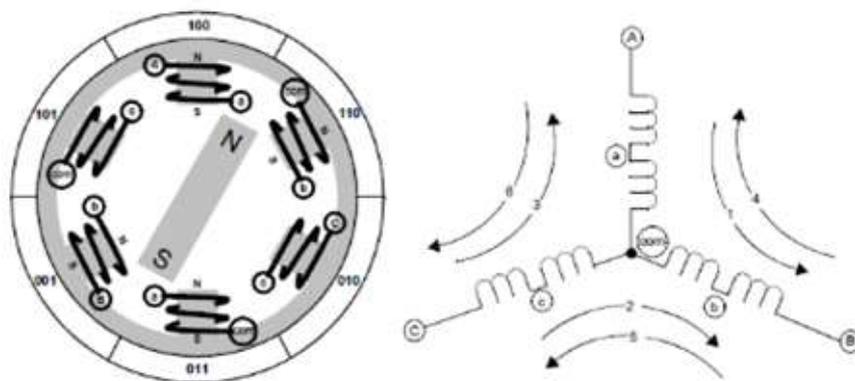
Firma
 Responsable 8 meses

ANEXO C. TABLA COMPARATIVA DE COSTOS DE SILLAS DE RUEDAS EN ECUADOR

Sillas de ruedas convencionales.	
Características	Precio \$
Silla de reda en acero cromado.	150
100% plegable	
Asiento de hule reforzado	
Apoyabrazos acolchonados.	
Soporte de descanso para pie y brazo	
Silla de ruedas en acero cromado.	220
Espaldar acolchonado.	
Apoyabrazos y reposapiés desmontables.	
Absolutamente plegable.	
Llantas desmontables.	
Peso máximo 120 Kg.	
Marco de acero cromado.	199
Apoyabrazos y reposapiés desmontables.	
Espaldar sólido.	
Rueda posterior sólida.	
Absolutamente plegable.	
Asiento en hule reforzado.	
Diámetro con doble aro.	
Silla de ruedas con urinario.	210
Asiento desmontable y acolchonado.	
Urinario de plástico con tapa y agarradera.	
Espaldar y asiento en lona reforzado impermeable.	
Peso máximo 120 Kg.	
Silla con estructura de aluminio	350
Absolutamente plegable.	
Apoyabrazos y reposapiés desmontable y acolchonado.	
Apoyacabeza acolchonado.	
Asiento en tela acolchonada, fácil de desmontar.	
Rueda neumática, suave ante grietas en pisos.	
Peso máximo de 120 Kg.	

Silla de ruedas eléctrica y portable	2500
Mando por joystick	
Varios modos de velocidad, pito.	
Se puede cambiar a modo manual.	
Frenos precisos, y seguridad anti vuelco.	
Silla de ruedas eléctrica	3500
Cuenta con dos baterías de 24 V.	
Autonomía de 4 horas.	
Muy fuerte y estable.	
Manejo por joystick	
Difícil para su transporte debido a su peso.	

ANEXO D. SECUENCIA DE ACTIVACIÓN DE LOS DEVANADOS DEL MOTOR EN FUNCIÓN DE LAS ENTRADAS DE LOS SENSORES DE EFECTO HALL.



Fuente: García, (2011).

**ANEXO E. ACTIVACIÓN DE LOS DRIVERS DEL MOTOR
SEGÚN EL ORDEN DE LOS SENSORES HALL, GIRO
HORARIO.**

Pin	RE2	RE1	RE0	RC5	RC4	RC3	RC2	RC1	RC0
Phase	Sensor C	Sensor B	Sensor A	C High Drive	C Low Drive	B High Drive	B Low Drive	A High Drive	A Low Drive
6	0	0	1	0	1	0	0	1	0
4	0	1	0	0	0	1	0	0	1
5	0	1	1	0	1	1	0	0	0
2	1	0	0	1	0	0	1	0	0
1	1	0	1	0	0	0	1	1	0
3	1	1	0	1	0	0	0	0	1

Fuente: García, (2011).

**ANEXO F. ACTIVACIÓN DE LOS DRIVERS DEL MOTOR
SEGÚN EL ORDEN DE LOS SENSORES HALL, GIRO ANTI
HORARIO.**

Pin	RE2	RE1	RE0	RC5	RC4	RC3	RC2	RC1	RC0
Phase	Sensor C	Sensor B	Sensor A	C High Drive	C Low Drive	B High Drive	B Low Drive	A High Drive	A Low Drive
/6	0	0	1	1	0	0	0	0	1
/4	0	1	0	0	0	0	1	1	0
/5	0	1	1	1	0	0	1	0	0
/2	1	0	0	0	1	1	0	0	0
/1	1	0	1	0	0	1	0	0	1
/3	1	1	0	0	1	0	0	1	0

Fuente: García, (2011).

ANEXO G. ESPECIFICACIÓN DE DRIVERS PARA MOTORES BRUSHLESS.

SI No	Manufacturer Name	Manufacturer Part Number	Description
1	Allegro MicroSystems	A3938SLDTR-T	Sensor based commutation; Three-Phase Power MOSFET Controller
2	Allegro MicroSystems	A3904ECGTR	Sensorless based commutation; Low Voltage Voice Coil Motor Driver
3	Allegro MicroSystems	A4960KJPTR-T	Automotive, Sensorless BLDC Controller
4	Allegro MicroSystems	A4931METTR-T	BLDC motor driver; 3-Phase DC Motor Predriver
5	Atmel Corporation	ATA6843-PLQW	System basis chip for three-phase brushless DC motor controllers
6	Fairchild Semiconductor	FCM8201QY	3-Phase Sinusoidal Brushless DC Motor Controller; Sinusoidal / Trapezoidal
7	Freescale Semiconductor	MC34929EP	Brushless DC Motor Driver IC
8	International Rectifier	OM9375SP	200V Hi-Rel Three-Phase Brushless DC Motor Controller
9	International Rectifier	OM9369SF	500V Hi-Rel Three-Phase Brushless DC Motor Controller
10	Melexis Semiconductors	MLX81200	Sensorless BLDC motor controller for automotive application
11	Microchip Technology	MTD6501C-HC1	3-phase full-wave driver for brushless sensorless DC motor
12	Microchip Technology	MTD6505T-E/NA	Sinusoidal Sensorless 3-Phase Brushless DC Fan Motor Driver
13	NJR Corporation	NJU7356RB1	Single-phase DC Brushless Motor Driver IC - for FAN motor
14	NJR Corporation	NJM2624A	BRUSH LESS DC MOTOR 3-phase PRE-DRIVER - for General Motor
15	NJR Corporation	NJW4302FA1	THREE-PHASE DC BRUSHLESS MOTOR CONTROL IC - for General Motor
16	Onsemiconductor	MC33033	Brushless DC Motor Controller, 3-Phase
17	Onsemiconductor	MC33035	Brushless DC Motor Controller
18	Onsemiconductor	LB1976	3-Phase Brushless Motor Driver
19	Onsemiconductor	LV8805SV	Three-phase Brushless DC Motor Sensor-less Driver IC
20	Onsemiconductor	LV8860V	PWM Single-phase Full-wave Brushless Motor Driver IC
21	Onsemiconductor	LV8105W	3-Phase Brushless Motor Pre-Driver IC
22	Onsemiconductor	LB11867FV	Variable Speed Single-phase Full-Wave Brushless DC Pre-Driver
23	Onsemiconductor	LB11696V	Direct PWM Drive Brushless Motor Predriver IC
24	Sanken Electric Co., Ltd	SPI-6631M	Three phase brushless DC motor driver with 3 A output current
25	Sanken Electric Co., Ltd	SCM1101M	High Voltage 3-Phase Brushless Motor Driver IC
26	STMicroelectronics	L6230	PowerSPIN: DMOS driver for three-phase brushless DC motor
27	STMicroelectronics	L6235Q	PowerSPIN: DMOS driver for three-phase brushless dc motor
28	Texas Instruments	DRV8312DDW	6.5A Three Phase Brushless DC Motor Driver with Inrush Protection
29	Texas Instruments	DRV8302DCA	3-Phase Brushless Motor Pre-Driver with Dual Current Sense Amps and Buck Converter
30	Toshiba America Electronic Components	TB6586FG	3-Phase Full-Wave Brushless Motor Controller; 1 pulse/electrical angle is 360°
31	Toshiba America Electronic Components	TB6588FG	3-Phase Full-Wave PWM Driver for Sensorless BLDC Motors

ANEXO H. TIPOS DE BATERÍAS Y SUS CARACTERÍSTICAS.

	Ni-Cd	Ni-MH	Plomo-ácido	ión-Litio		
				ión-Li Cobalto	ión-Li Manganeso	ión-Li Fosfato
Tensión nominal por celda	1,25V	1,25V	2V	3,6V	3,6V	3,3V
Resistencia interna [mΩ]	100-200 por módulo 6V	200-300 por módulo 6V	Inferior a 100 por módulo 12V	100-130 por celda 150-300 por módulo	25-75 por celda	25-50 por celda
Densidad energética	45-80 Wh/kg	60-120 Wh/kg	30-50 Wh/kg	150-190 Wh/kg	100-135 Wh/kg	90-120 Wh/kg
Corriente recomendada	1C	0,5C o inferior	0,2C	1C o menos	10C o menos	10C o menos
Corriente máxima permitida	20C	5C	5C	Inferior a 3C	Inferior a 30C	Inferior a 30C
Número de ciclos de carga/descarga (hasta el 80% de la capacidad inicial)	>1000	300-500	200-300	300-500	300-500	>1000 bajo condiciones controladas
Tiempo de carga	1h	2-4h	8-16h	1,5-3h	1h o menos	
Auto-descarga mensual	20%	30%	5%	Inferior al 10%		
Tolerancia a la sobrecarga	Moderada	Baja	Alta	Baja		
Temperatura de operación	de -40° a 60°C	De -20° a 60°C	de -20° a 60°C	de -20° a 60°C		
Estabilidad térmica	Sí	Sí	Sí	Hasta 150°C	Hasta 250°C	Hasta 250°C
Periodicidad del mantenimiento	Cada 2 meses máximo	Cada 3 meses máximo	Cada 3-6 meses para abiertas y casi nulo para VRLA	No necesario		
Impacto medioambiental	Muy alto	Bajo toxicidad Reciclable	Alto Reciclable	Poco tóxicas		
Seguridad	Recomendado fusible	Recomendado fusible	Recomendado fusible	Circuito de seguridad obligatorio		
Uso comercial desde	1950	1990	1970	1991	1996	2006

Fuente: Villafáfila, Peña y Cros, (s.f).

ANEXO I. CARACTERÍSTICAS DE LOS DISTINTOS MODELOS DE LA PLATAFORMA ARDUINO.

Name	Processor	Operating Voltage/Input Voltage	CPU Speed	Analog In/Out	Digital IO/PWM	EEPROM [KB]	SRAM [KB]	Flash [KB]	USB	UART
Uno	ATmega328	5 V/7-12 V	16 Mhz	6/0	14/6	1	2	32	Regular	1
Due	AT91SAM3X8E	3.3 V/7-12 V	84 Mhz	12/2	54/12	-	96	512	2 Micro	4
Leonardo	ATmega32u4	5 V/7-12 V	16 Mhz	12/0	20/7	1	2.5	32	Micro	1
Mega 2560	ATmega2560	5 V/7-12 V	16 Mhz	16/0	54/15	4	8	256	Regular	4
Mega ADK	ATmega2560	5 V/7-12 V	16 Mhz	16/0	54/15	4	8	256	Regular	4
Micro	ATmega32u4	5 V/7-12 V	16 Mhz	12/0	20/7	1	2.5	32	Micro	1
Mini	ATmega328	5 V/7-9 V	16 Mhz	8/0	14/6	1	2	32	-	-
Nano	ATmega168	5 V/7-9 V	16 Mhz	8/0	14/6	0.512	1	16	Mini-B	1
	ATmega328		1			2	32			
Ethernet	ATmega328	5 V/7-12 V	16 Mhz	6/0	14/4	1	2	32	Regular	-

Esplora	ATmega32u4	5 V/7-12 V	16 Mhz	-	-	1	2.5	32	Micro	-
ArduinoBT	ATmega328	5 V/2.5-12 V	16 Mhz	6/0	14/6	1	2	32	-	1
Fio	ATmega328P	3.3 V/3.7-7 V	8 Mhz	8/0	14/6	1	2	32	Mini	1
Pro (168)	ATmega168	3.3 V/3.35-12 V	8 Mhz	6/0	14/6	0.512	1	16	-	1
Pro (328)	ATmega328	5 V/5-12 V	16 Mhz	6/0	14/6	1	2	32	-	1
Pro Mini	ATmega168	3.3 V/3.35-12 V	8 Mhz 16Mhz	6/0	14/6	0.512	1	16	-	1
LilyPad	ATmega168V	2.7-5.5 V	8 Mhz	6/0	14/6	0.512	1	16	-	-
LilyPad	ATmega328V	V/2.7-5.5 V	8 Mhz	6/0	14/6	0.512	1	16	-	-
LilyPad USB	ATmega32u4	3.3 V/3.8-5V	8 Mhz	4/0	9/4	1	2.5	32	Micro	-
LilyPad Simple	ATmega328	2.7-5.5 V/2.7-5.5 V	8 Mhz	4/0	9/4	1	2	32	-	-
LilyPad SimpleSnap	ATmega328	2.7-5.5 V/2.7-5.5 V	8 Mhz	4/0	9/4	1	2	32	-	-

Fuente: ARDUINO, (s.f).

**ANEXO J. MANUAL DE INSTRUCCIONES DEL MÓDULO DE
RECONOCIMIENTO DE VOZ.**

**ANEXO K. MANUAL DE INSTRUCCIONES DEL SOFTWARE
EASY COMMANDER.**

**ANEXO L. MANUAL DE INSTRUCCIONES DEL SOFTWARE
QUICK SYNTHESIS.**

**ANEXO M. ESPECIFICACIONES DE LA PLATAFORMA
ARDUINO MEGA 2560.**

ANEXO N. HOJA DE DATOS DEL INTEGRADO MC33035.

ANEXO O. HOJA DE DATOS DEL TRANSISTOR 2SJ401.

ANEXO P. HOJA DE DATOS DEL TRANSISTOR BUZ10.

ANEXO Q. ESPECIFICACIONES DEL SERVOMOTOR VSD-11AYMB.

SailServo

Vigor VSD-11AYMB

50kg.cm @ 7.2v 4.5sec/turn Run 0.5A

Test Rig

www.youtube.com/watch?v=x-auOHbFBwU

Test Equipment

Transmitter/Receiver:- Spectrum Dx5e/AR500 Rudder Ch4 Hi Mode Output 1.03 / 1.77ms =0.74ms 3.5/9v 5A

- Measured drum rotation and travel at no load
- Short** Distance cord cannot be pulled back to the zero position due to load -deg/mm
- Long** Distance cord travel increases at fully out position due to load +deg/mm
- Time to pull in 100mm cord. Sec/100mm
- Speed % reduction due to load. Max speed @ no load = 100%. Min speed @ near stall = 0%

- Full travel achieved
- Upto 4mm reduced travel
- 5 - 10mm reduced travel
- 11 - 25mm reduced travel

94.3 mm Drum Circumference
30 mm Drum Diameter

- SWL Safe Working Load = Above 90% speed
- SWL Safe Working Load = 75/90%
- POL Permissible Over Load = 50/75%
- UWL Unsafe Working Load = Below 50%

Pulse Angle	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0	2.1	2.2
1.1 - 1.9ms								1370 = 360mm							
1.0 - 2.0ms								1820 = 480mm							
0.9 - 2.1ms								2080 = 540mm							
0.8 - 2.2ms								2420 = 630mm							

		6v Bench Supply									Running				Hold					
Kg	Load	Short	Tums	Travel	Long	Total	Time	sec/	%	V	CA	Watt	%	V	CA	Watt				
.cm		deg	deg	mm	deg	Travel		100mm												
0.0	0.0			1280		348				348	3.7	1.1	100	5.84	0.33	1.9	17	6.00	0.03	0.2
0.8	0.5		0	1280		348				348	4.0	1.1	97	5.78	0.45	2.6	23	6.00	0.03	0.2
1.5	1.0		0	1280		348				348	4.2	1.2	95	5.73	0.58	3.3	30	6.00	0.03	0.2
2.3	1.5		0	1280		348				348	4.3	1.2	94	5.67	0.68	3.9	34	6.00	0.03	0.2
3.0	2.0		0	1280		348				348	4.4	1.3	93	5.62	0.79	4.4	40	6.00	0.03	0.2
3.8	2.5		0	1280		348				348	4.6	1.3	91	5.56	0.91	5.1	45	5.80	0.35	2.0
4.5	3.0	-50	-13	1230		335	+20	5		340	4.8	1.4	88	5.52	1.00	5.5	49	5.80	0.40	2.3
5.3	3.5	-50	-13	1230		335	+20	5		340	4.9	1.4	87	5.44	1.12	6.1	54	5.80	0.40	2.3
6.0	4.0	-50	-13	1230		335	+20	5		340	5.3	1.6	83	5.34	1.25	6.7	60	5.80	0.50	2.9
6.8	4.5	-60	-16	1220		332	+20	5		338	5.7	1.7	78	5.31	1.40	7.4	66	5.75	0.50	2.9
7.5	5.0	-60	-16	1220		332	+20	5		338	6.3	1.9	72	5.17	1.68	8.7	78	5.75	0.60	3.5
8.3	5.5	-60	-16	1220		332	+20	5		338	6.9	2.0	66	5.10	1.70	8.7	78	5.60	0.70	3.9
9.0	6.0	-60	-16	1220		332	+20	5		338	7.7	2.3	58	5.04	1.83	9.2	82	5.60	0.75	4.2
9.8	6.5	-60	-16	1220		332	+20	5		338	8.8	2.6	47	4.96	2.00	9.9	89	5.60	0.80	4.5
10.5	7.0	-60	-16	1220		332	+20	5		338	10.6	3.1	29	4.90	2.18	10.7	96	5.60	0.85	4.8
11.3	7.5	-60	-16	1220		332	+20	5		338	13.4	4.0	0	4.80	2.33	11.2	100	5.60	0.90	5.0

		7.5v Bench Supply									Running				Hold					
Kg	Load	Short	Tums	Travel	Long	Total	Time	sec/	%	V	CA	Watt	%	V	CA	Watt				
.cm		deg	deg	mm	deg	Travel		100mm												
0.0	0.0			1280		348				348	3.1	0.9	100	7.33	0.40	2.9	18	7.48	0.03	0.2
1.5	1.0			1280		348				348	3.3	0.9	95	7.20	0.60	4.3	27	7.48	0.03	0.2
3.0	2.0			1280		348				348	3.5	1.0	90	7.10	0.84	6.0	37	7.28	0.37	2.7
4.5	3.0			1280		348				348	3.7	1.1	86	6.99	1.07	7.5	46	7.28	0.47	3.4
6.0	4.0			1280		348				348	4.1	1.2	76	6.86	1.32	9.1	56	7.21	0.63	4.5
7.5	5.0	-5	-1	1275		347				347	4.6	1.3	63	6.71	1.60	10.7	66	7.24	0.65	4.7
9.0	6.0	-5	-1	1275		347				347	5.4	1.6	44	6.56	1.92	12.6	78	7.15	0.74	5.3
10.5	7.0	-5	-1	1275		347				347	6.4	1.8	20	6.42	2.25	14.4	89	7.12	0.78	5.6
12.0	8.0	-10	-3	1270		345				345	7.2	2.1	0	6.24	2.60	16.2	100	7.01	0.93	6.5

**ANEXO R. DIAGRAMA ELECTRÓNICO DE LA PLACA
PRINCIPAL CONTROL.**

**ANEXO S. DIAGRAMA PCB DE LA PLACA PRINCIPAL
CONTROL (COMPONENTES).**

**ANEXO T. DIAGRAMA PCB DE LA PLACA PRINCIPAL
CONTROL.**

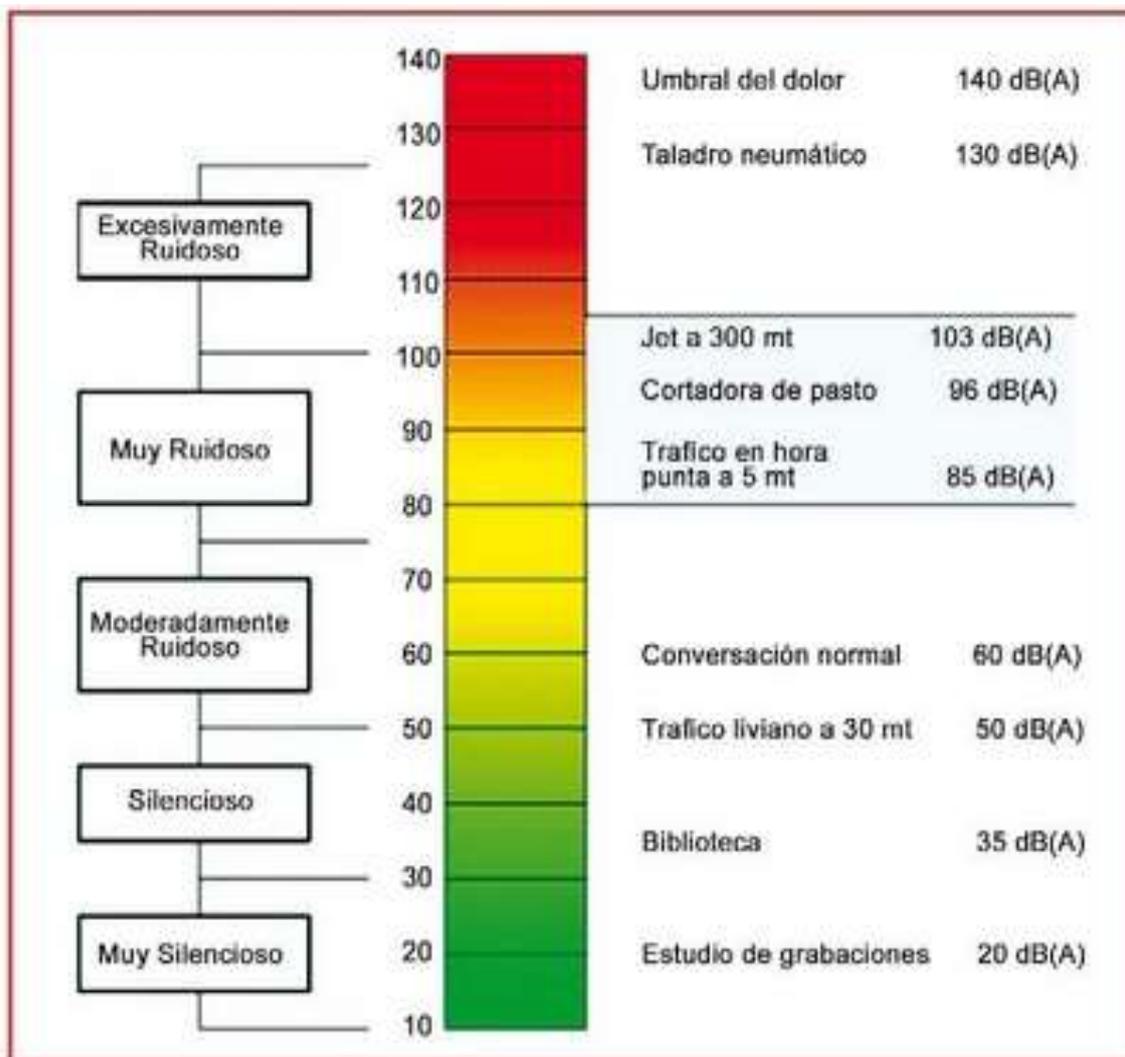
ANEXO U. DIAGRAMA ELÉCTRICO DE POTENCIA.

**ANEXO V. DIAGRAMA PCB DE LA POTENCIA
(COMPONENTES).**

ANEXO W. DIAGRAMA PCB DE POTENCIA.

**ANEXO X. DIAGRAMA ELÉCTRICO DE LA CONEXIÓN DE
MOTORES.**

ANEXO Y. NIVEL DE INTENSIDAD DEL SONIDO.



Fuente: Echeverría, (s.f).

ANEXO Z. NIVEL DE INTENSIDAD DEL VIENTO.

Número de Beaufort	Velocidad del viento (km/h)	Nudos (millas náuticas/h)	Denominación	Aspecto del mar	Efectos en tierra
0	0 a 1	< 1	Calma	Despejado	Calma, el humo asciende verticalmente
1	2 a 5	1 a 3	Ventolina	Pequeñas olas, pero sin espuma	El humo indica la dirección del viento
2	6 a 11	4 a 6	Flojito (Brisa muy débil)	Crestas de apariencia vítrea, sin romper	Se mueven las hojas de los árboles, empiezan a moverse los molinos
3	12 a 19	7 a 10	Flojo (Brisa Ligera)	Pequeñas olas, crestas rompientes.	Se agitan las hojas, ondulan las banderas
4	20 a 28	11 a 16	Bonancible (Brisa moderada)	Borreguillos numerosos, olas cada vez más largas	Se levanta polvo y papeles, se agitan las copas de los árboles
5	29 a 38	17 a 21	Fresquito (Brisa fresca)	Olas medianas y alargadas, borreguillos muy abundantes	Pequeños movimientos de los árboles, superficie de los lagos ondulada
6	39 a 49	22 a 27	Fresco (Brisa fuerte)	Comienzan a formarse olas grandes, crestas rompientes, espuma	Se mueven las ramas de los árboles, dificultad para mantener abierto el paraguas.
7	50 a 61	28 a 33	Frescachón (Viento fuerte)	Mar gruesa, con espuma arrastrada en dirección del viento	Se mueven los árboles grandes, dificultad para andar contra el viento
8	62 a 74	34 a 40	Temporal (Viento duro)	Grandes olas rompientes, franjas de espuma	Se quiebran las copas de los árboles, circulación de personas dificultosa
9	75 a 88	41 a 47	Temporal fuerte (Muy duro)	Olas muy grandes, rompientes. Visibilidad mermada	Daños en árboles, imposible andar contra el viento
10	89 a 102	48 a 55	Temporal duro (Temporal)	Olas muy gruesas con crestas empenachadas. Superficie del mar blanca.	Árboles arrancados, daños en la estructura de las construcciones
11	103 a 117	56 a 63	Temporal muy duro (Borrasca)	Olas excepcionalmente grandes, mar completamente blanca, visibilidad muy reducida	Estragos abundantes en construcciones, tejados y árboles
12	+ 118	+64	Temporal huracanado (Huracán)	Olas excepcionalmente grandes, mar blanca, visibilidad nula	Estragos abundantes en construcciones, tejados y árboles y lluvias.

Fuente: Meteorología, (s.f)

ANEXO AA. VISTAS DE LA SILLA DE RUEDAS.

ANEXO BB. BASE BATERÍA.

ANEXO CC. BASE SERVOMOTOR.

ANEXO DD. CÓDIGO DEL PROGRAMA.

```

//SUBROUTINAS FRENOS
void servo()
{
motion='0'; //desactiva todos los relés
digitalWrite(servo_freno, HIGH); //activa el freno
delay (500); //retardo
digitalWrite(servo_freno, LOW); //desactiva el freno
}

void servo2() //frenado al detectar algún sensor
{
motion='0'; //desactiva todos los relés
digitalWrite(servo_freno, HIGH); //activa el freno durante 600 ms
delay (600);
digitalWrite(servo_freno, LOW); //se desactiva por 100 ms y luego se vuelve a
delay (100); //activar para suavizar el frenado.
digitalWrite(servo_freno, HIGH);
delay (400);
digitalWrite(servo_freno, LOW);
}

//SUBROUTINA RELES
void desplazamiento()
{
switch (motion) {

case '0': //desactiva todos los relés
digitalWrite(rele1_m1, LOW);
digitalWrite(rele2_m1, LOW);
digitalWrite(rele1_m2, LOW);
digitalWrite(rele2_m2, LOW);
digitalWrite(cambio_vel_atras, LOW);
digitalWrite(cambio_vel_izquierda, LOW);
sen5='0';
break;

case '1': //activa dos relés para desplazar hacia adelante
digitalWrite(rele1_m1, HIGH);
digitalWrite(rele2_m1, LOW);
digitalWrite(rele1_m2, HIGH);
digitalWrite(rele2_m2, LOW);
digitalWrite(cambio_vel_atras, LOW);
digitalWrite(cambio_vel_izquierda, LOW);
break;

case '2': //invierte las líneas de alimentación
digitalWrite(cambio_vel_atras, HIGH); //para desplazar hacia atrás

```

```

digitalWrite(rele1_m1, LOW);
digitalWrite(rele2_m1, HIGH);
digitalWrite(rele1_m2, LOW);
digitalWrite(rele2_m2, HIGH);
digitalWrite(cambio_vel_izquierda, LOW);
sen3='2';
break;

case '3': //giro derecha
digitalWrite(rele1_m1, HIGH);
digitalWrite(rele2_m1, LOW);
digitalWrite(rele1_m2, LOW);
digitalWrite(rele2_m2, LOW);
digitalWrite(cambio_vel_atras, LOW);
digitalWrite(cambio_vel_izquierda, LOW);
break;

case '4': //giro izquierda 1
digitalWrite(cambio_vel_izquierda, HIGH);
digitalWrite(rele1_m1, LOW);
digitalWrite(rele2_m1, LOW);
digitalWrite(rele1_m2, HIGH);
digitalWrite(rele2_m2, LOW);
digitalWrite(cambio_vel_atras, LOW);
break;

case '5': //vuelta derecha
digitalWrite(rele1_m1, HIGH);
digitalWrite(rele2_m1, LOW);
digitalWrite(rele1_m2, LOW);
digitalWrite(rele2_m2, LOW);
digitalWrite(cambio_vel_atras, LOW);
digitalWrite(cambio_vel_izquierda, LOW);
break;

case '6': //vuelta izquierda
digitalWrite(cambio_vel_izquierda, LOW);
digitalWrite(rele1_m1, LOW);
digitalWrite(rele2_m1, LOW);
digitalWrite(rele1_m2, HIGH);
digitalWrite(rele2_m2, LOW);
digitalWrite(cambio_vel_atras, LOW);
break;

case '7': //giro izquierda DIRECTO
digitalWrite(cambio_vel_izquierda, LOW);
digitalWrite(rele1_m1, LOW);
digitalWrite(rele2_m1, LOW);
digitalWrite(rele1_m2, HIGH);
digitalWrite(rele2_m2, LOW);
digitalWrite(cambio_vel_atras, LOW);

```

```

default:
motion='0';

    }
}

void setup()
{
if (bridge.check())
{
cli();
bridge.loop(0, 1, 12, 13);
}
Serial.begin(9600);
port.begin(9600);
if (!easyvr.detect())
{
Serial.println("EasyVR not detected!"); //no detecta easy vr
chichar='2'; //genera una alerta
chicha(); //llama subrutina chichara
for (;;)
}

easyvr.setPinOutput(EasyVR::IO1, LOW);
Serial.println("EasyVR detected!");
easyvr.playSound(1, EasyVR::VOL_FULL); //indica la detección del reconocimiento
easyvr.setTimeout(5);
easyvr.setLanguage(4); //elegimos el lenguaje

group = GROUP_0; //inicia el grupo

//TIMER1 //envía señal para cambio de velocidad
TCCR1A=0;
TCCR1B=0;
OCR1A=3124; // carga del timer=200ms
TCCR1B |= (1<<WGM12); // activa el modo comparación
TCCR1B |= (1<<CS10); //elegimos el preescaler
TCCR1B |= (1<<CS12);
TIMSK1 |= (1<<OCIE1A); //activa la comparación

//TIMER3 //retardo desplazamiento para atrás
TCCR3A=0;
TCCR3B=0;
OCR3A=15625; //2 S
TCCR3B |= (1<<WGM32);
TCCR3B |= (1<<CS30);
TCCR3B |= (1<<CS32);
TIMSK3 |= (1<<OCIE3A);

//INTERRUPCION 2, EN EL PIN 21
attachInterrupt(2, sen_prioridad, RISING);

```

```

//INTERRUPCION 3, EN EL PIN 20
attachInterrupt(3, sen_ultrasonicos, RISING);
//INTERRUPCION 4, EN EL PIN 19
attachInterrupt(4, sen_infrarrojos, RISING);
}

void action();
void detener();

void loop()
{
  easyvr.setPinOutput(EasyVR::IO1, HIGH);
  Serial.print("Say a command in Group "); //listo para pronunciar un comando
  Serial.println(group);
  easyvr.recognizeCommand(group);
  do
  {
    detener();
    chicha();
  }
  while (!easyvr.hasFinished());
  easyvr.setPinOutput(EasyVR::IO1, LOW);
  idx = easyvr.getWord(); //retorna el comando reconocido
  if (idx >= 0)
  {
    return;
  }
  idx = easyvr.getCommand();
  if (idx >= 0)
  {
    uint8_t train = 0;
    char name[32];
    Serial.print("Command: "); //imprime el comando reconocido
    Serial.print(idx);
    if (easyvr.dumpCommand(group, idx, name, train))
    {
      Serial.print(" = ");
      Serial.println(name);
    }
    else
      Serial.println();
    easyvr.playSound(0, EasyVR::VOL_FULL); //tono de reconocimiento
    b1='0'; //resetea banderas
    b2='0';
    action(); //ejecuta la acción dependiendo
  }
  else
  {
    if (easyvr.isTimeout()) //termina el tiempo de espera
      Serial.println("Timed out, try again..."); //espera nuevamente la pronunciación
  }
}

```

```

int16_t err = easyvr.getError();           //del comando
if (err >= 0)
{
  Serial.print("Error ");
  Serial.println(err, HEX);
}
}
desplazamiento();
}

//INTERRUPCION 2
void sen_prioridad()                     //cambio de estado en sensores prioridad
{
  sen='2';
  chichar='3';
  Serial.print("sen_pri: ");
  Serial.print(sen);
}

//INTERRUPCION 3
void sen_ultrasonicos()                 //sensores ultrasónicos emiten una señal
{
  sen='2';
  Serial.print("sen_ultra: ");
  Serial.print(sen);
}

//INTERRUPCION 4
void sen_infrarrojos()                 //sensores infrarrojos cambiaron de estado
{
  sen='2';
  Serial.print("sen_infra: ");
  Serial.print(sen);
}

//TIMER 1
ISR(TIMER1_COMPA_vect)
{
  cambio_velocidad();                   //envía una señal para cambio de velocidad
}

//TIMER 3
ISR(TIMER3_COMPA_vect){
  if(sen3=='2')
  {
    conteo_atras++;
    if(conteo_atras==3)                 //delimita el tiempo de desplazamiento hacia
    {                                     //atrás
      motion='0';
      sen='1';
    }
  }
}

```

```

conteo_atras=0;
sen3='0';
}
}

if(sen5=='1')
{
conteo_pulso++;
if(conteo_pulso==2)
{
motion='0';
sen3='0';
sen='1';
sen2='1';
conteo_pulso=0;
}
}
}

//RECONOCIMIENTO //acciones de cada comando
void action()
{
switch (group)
{
case GROUP_0:
switch (idx)
{
case G0_ACTIVAR: //activa el sistema
easyvr.playSound(2, EasyVR::VOL_FULL); //señal de activación
group = GROUP_1; //cambio de grupo y comandos a reconocer
break;
}
break;

case GROUP_1:
switch (idx)
{
case G1_PAR: //detiene la silla
digitalWrite(rele1_m1, LOW);
digitalWrite(rele2_m1, LOW);
digitalWrite(rele1_m2, LOW);
digitalWrite(rele2_m2, LOW);
servo(); //activa el motor para el freno
chichar='0';
motion='0';
sen3='0';
sen2='0';
sen='0';
group = GROUP_1; //permanece en el grupo
break;
}
}
}

```

```

case G1_RUMBO:                                //comando previo al desplazamiento
chichar='0';
motion='0';
sen3='0';
sen2='0';
sen='0';
group = GROUP_2;                              //cambio de grupo y comandos a reconocer
break;

case G1_PULSO:                                //comando previo a desplazamiento forzado
chichar='0';
motion='0';
sen3='0';
sen2='0';
sen='0';
group = GROUP_3;                              //cambio de grupo y comandos a reconocer
break;
case G1_BATERIA:                             //emite estado de la bateria
chichar='1';
group = GROUP_1;
break;

case G1_PAR_SEN:                             //detiene motores por sensores
digitalWrite(rele1_m1, LOW);
digitalWrite(rele2_m1, LOW);
digitalWrite(rele1_m2, LOW);
digitalWrite(rele2_m2, LOW);
servo();
chichar='0';
motion='0';
sen3='0';
sen2='0';
sen='0';
group = GROUP_1;
break;

case G1_ALTO_INICIO:                         //detiene motores por sensores
digitalWrite(rele1_m1, LOW);
digitalWrite(rele2_m1, LOW);
digitalWrite(rele1_m2, LOW);
digitalWrite(rele2_m2, LOW);
servo2();
chichar='0';
motion='0';
sen3='0';
sen2='0';
sen='0';
group = GROUP_1;                              //cambio de grupo y comandos a reconocer
break;

}

```

```

break;
case GROUP_2:
switch (idx)
{
case G2_ADELANTE: //desplazamiento hacia adelante
conteo=0;
conteo2=0;
motion='1';
sen3='1';
sen2='1';
group = GROUP_4; //cambio de grupo y comandos a reconocer
break;
case G2_IZQUIERDA: //desplazamiento hacia la izquierda
conteo=0;
conteo2=0;
sen3='7';
motion='7';
sen2='1';
group = GROUP_4; //cambio de grupo y comandos a reconocer
break;
case G2_DERECHA: //desplazamiento a la derecha
conteo=0;
conteo2=0;
sen3='3';
motion='3';
sen2='1';
group = GROUP_4; //cambio de grupo y comandos a reconocer
break;
case G2_ATRAS: //desplazamiento hacia atrás
conteo=0;
conteo2=0;
motion='2';
sen2='1';
group = GROUP_1; //se mantiene en el grupo
break;
case G2_PAR: //detiene la silla por comando
motion='0';
servo();
chichar='0';
motion='0';
sen3='0';
sen2='0';
sen='0';
group = GROUP_1;
break;
}
break;

case GROUP_3:
switch (idx)
{

```

```

case G3_ADE:
conteo_pulso=0;
conteo=0;
conteo2=0;
motion='1';
sen3='6';
sen5='1';
group = GROUP_1;
break;
case G3_QUIER:
conteo_pulso=0;
conteo=0;
conteo2=0;
motion='6';
sen3='8';
sen5='1';
group = GROUP_1;
break;
case G3_DER:
conteo_pulso=0;
conteo=0;
conteo2=0;
motion='5';
sen3='5';
sen5='1';
group = GROUP_1;
break;
case G3_TRAS:
conteo_pulso=0;
conteo=0;
conteo2=0;
motion='2';
sen5='1';
group = GROUP_1;
break;
case G3_PAR:
conteo_pulso=0;
conteo=0;
conteo2=0;
motion='0';
chichar='0';
motion='0';
sen3='0';
sen2='0';
sen='0';
servo();
group = GROUP_1;
break;
case G3_RUMBO:
chichar='0';
motion='0';

```

//hacia adelante forzado

//cambio de grupo y comandos a reconocer

//hacia la izquierda forzado

//cambio de grupo y comandos a reconocer

//hacia la izquierda forzado

//cambio de grupo y comandos a reconocer

//hacia atrás forzado _ tiempo determinado

//cambio de grupo y comandos a reconocer

//detiene la silla

//cambio de grupo y comandos a reconocer

//comando previo al desplazamiento

```

chichar='0';
motion='0';
sen3='0';
sen2='0';
sen='0';
group = GROUP_2;                               //cambio de grupo y comandos a reconocer
break;
}
break;
case GROUP_4:
switch (idx)
{
case G4_IZQUIERDA:                             //desplazamiento a la izquierda
//servo();
conteo=0;
conteo2=0;
sen3='4';
motion='4';
sen2='1';
group = GROUP_4;                               //permanece en el grupo
break;
case G4_DERECHA:                               //desplazamiento a la derecha
conteo=0;
conteo2=0;
sen3='3';
motion='3';
sen2='1';
group = GROUP_4;                               //permanece en el grupo
break;
case G4_ADELANTE:                             //desplazamiento adelante
conteo=0;
conteo2=0;
motion='1';
sen3='1';
sen2='1';
group = GROUP_4;                               //permanece en el grupo
break;
case G4_PAR:                                  //detiene la silla por comando
motion='0';
servo();
sen3='0';
sen2='0';
sen='0';
group = GROUP_1;                               //cambio de grupo y comandos a reconocer
break;

case G4_PAR_SEN:                              //detiene la silla por sensores
digitalWrite(rele1_m1, LOW);
digitalWrite(rele2_m1, LOW);
digitalWrite(rele1_m2, LOW);
digitalWrite(rele2_m2, LOW);

```

```
servo();
chichar='0';
motion='0';
sen3='0';
sen2='0';
sen='0';
group = GROUP_1; break;

case G4_ALTO_INICIO:                                //detiene la silla por sensores
digitalWrite(rele1_m1, LOW);
digitalWrite(rele2_m1, LOW);
digitalWrite(rele1_m2, LOW);
digitalWrite(rele2_m2, LOW);
servo2();
chichar='0';
  motion='0';
sen3='0';
sen2='0';
sen='0';
group = GROUP_1;                                //cambio de grupo y comandos a reconocer
break;
}
break;
```