



Diseño y construcción de una silla de ruedas inteligente con reconocimiento de voz para contribuir en la autonomía móvil de una persona tetrapléjica

Taboada Flores, Pablo Hernán y Veintimilla Villarroel, Joel Alexander

Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería Mecatrónica

Trabajo de titulación, previo a la obtención de título de Ingeniero en Mecatrónica

Ing. Constante Prócel, Patricia Nataly

1 de febrero de 2023

Latacunga

Reporte de verificación de contenido

Informe de originalidad

NOMBRE DEL CURSO

Tesis

NOMBRE DEL ALUMNO

PABLO HERNAN TABOADA FLORES

NOMBRE DEL ARCHIVO

TABOADA - VEINTIMILLA - PROYECTO MARA - SU TESIS

SE HA CREADO EL INFORME

19 ene 2023

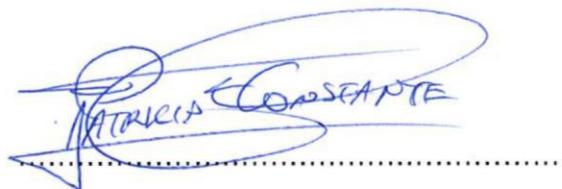
Resumen

Fragmentos marcados	20	3 %
Fragmentos citados o entrecorillados	6	0,6 %

Coincidencias de la Web

docsity.com	5	0,9 %
espe.edu.ec	1	0,3 %
books.google.com	2	0,3 %
www.gob.ec	1	0,3 %
studocu.com	2	0,2 %
lamolina.edu.pe	2	0,2 %
ibm.com	1	0,2 %
sunrisemedical.es	2	0,1 %
docplayer.es	2	0,1 %
raw.githubusercontent.com	1	0,1 %
eltelegrafo.com.ec	1	0,1 %
eluniverso.com	1	0,1 %
planetadelibros.com	1	0,1 %
brainly.lat	1	0,1 %
foroactivo.com	1	0,1 %
nmslaw.com.ec	1	0,1 %
researchgate.net	1	0,1 %

Firma:



Ing. Constante Prócel, Patricia Nataly

C.C: 0503354029



Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería Mecatrónica

Certificación

Certifico que el trabajo de titulación, "**Diseño y construcción de una silla de ruedas inteligente con reconocimiento de voz para contribuir en la autonomía móvil de una persona tetrapléjica**" fue realizado por los señores **Taboada Flores, Pablo Hernán y Veintimilla Villarroel, Joel Alexander** el mismo que cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, además fue revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de prevención y/o verificación de similitud de contenidos; razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que se lo sustente públicamente.

Latacunga, 30 de enero 2023

Firma:

Ing. Constante Prócel, Patricia Nataly

C.C: 0503354029



Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

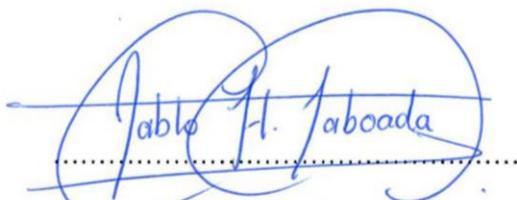
Carrera de Ingeniería Mecatrónica

Responsabilidad de autoría

Nosotros, **Taboada Flores, Pablo Hernán**, y **Veintimilla Villarroel, Joel Alexander**, con cédulas de ciudadanía nº1805142955 y 1804390837, declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **Diseño y construcción de una silla de ruedas inteligente con reconocimiento de voz para contribuir en la autonomía móvil de una persona tetrapléjica** es de nuestra autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Latacunga, 30 de enero 2023

Firma:



Taboada Flores, Pablo Hernán

C.C: 180514295-5



Veintimilla Villarroel, Joel Alexander

C.C: 180439083-7



Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería Mecatrónica

Autorización de publicación

Nosotros, **Taboada Flores, Pablo Hernán**, y **Veintimilla Villarroel, Joel Alexander**, con cédulas de ciudadanía n°1805142955 y 1804390837, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **Diseño y construcción de una silla de ruedas inteligente con reconocimiento de voz para contribuir en la autonomía móvil de una persona tetrapléjica** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra responsabilidad.

Latacunga, 30 de enero 2023

Firma:

Taboada Flores, Pablo Hernán

C.C: 180514295-5

Veintimilla Villarroel, Joel Alexander

C.C: 180439083-7

Dedicatoria

A Dios por enseñarme cada día que la vida es maravillosa, a mis padres por haberme brindado todas las oportunidades académicas para formarme como una persona de bien y a todas las personas con discapacidad, que con sus manos amables me enseñaron que mientras haya vida, hay esperanza, por lo cual, este es proyecto de titulación es mi grano de arena para contribuir en la autonomía móvil y calidad de vida de José Luis Gavilanes.

Pablo Hernán Taboada Flores

Dedicatoria

A las personas con limitaciones físicas y de movilidad autónoma, especialmente personas con tetraplejia, que fueron el motivo de inspiración para el desarrollo de esta investigación.

A mi madre, que con su apoyo incondicional y sus enseñanzas me permitieron alcanzar cada meta cumplida.

A mis hermanos, Steven y Taiz, por permitirme ser su ejemplo lo que me motiva a siempre dar mi mejor esfuerzo.

A mi abuelita Mariana, mi segunda madre, por su infinito cariño y apoyo.

Joel Alexander Veintimilla Villarroel

Agradecimiento

El presente trabajo de titulación tiene un magno agradecimiento a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE sede Latacunga, a la carrera de Ingeniería Mecatrónica, a su distinguida comunidad de Docentes, que con mucho entusiasmo impartieron sus conocimientos para mi formación profesional.

A la Ing. Patricia Constante, Tutora del proyecto, que con sus conocimientos compartidos del área de Energía y Mecánica fueron fundamentales para la culminación de este proyecto.

Al fisioterapeuta Mg. Carlos López, por la experticia médica que fue un pilar clave para comprender las limitaciones físicas de las personas con tetraplejia y a su vez guiarnos en la invención de este proyecto.

A José Luis Gavilanes y su familia, quienes han prestado su tiempo, colaboración y ayuda durante todo el proceso de diseño y desarrollo del proyecto.

Se agradece de manera muy especial a la Srta. Elizabeth Taboada por sus aportes en la construcción del Dataset que es una parte importante para el reconocimiento de voz.

Al Patronato Municipal de Latacunga por abrirnos sus puertas y prestarnos sus instalaciones para el desarrollo de los ensayos de validación de este prototipo.

Finalmente, a todas las personas que cooperaron de forma desinteresada en mi formación profesional, les agradezco de todo corazón.

Pablo Hernán Taboada Flores

Agradecimiento

A mi familia, por el apoyo incondicional en mi formación académica y personal; por estar siempre presente y depositar total confianza en mi sea cual sea la situación, los amo más que a nadie.

A la Ing. Patricia Constante, por el apoyo desde los cimientos del proyecto de investigación, por su guía y los conocimientos brindados durante toda mi etapa universitaria.

Al fisioterapeuta Mg. Carlos López que, con su amplio conocimiento en el tratamiento de la discapacidad física, nos ha guiado en el desarrollo de un proyecto que permita aportar a la movilidad de José Luis; además de su amabilidad y cálida acogida en cada visita.

A José Luis y su noble familia, quienes nos han brindado la apertura y el tiempo para evaluar el desempeño del proyecto siempre que se ha requerido.

A mis amigos, especialmente a Monse y Orlando, de quienes he aprendido tantas cosas, y he recibido apoyo profesional, académico y personal invaluable.

A la familia Taboada Flores, por abrirme las puertas de su hogar durante largos y arduos meses de trabajo para el desarrollo de este proyecto.

Finalmente, al alma mater y todo el personal docente el cual ha permitido nutrirme de los conocimientos necesarios para aportar innovación y tecnología al servicio de la comunidad.

Joel Alexander Veintimilla Villarroel

ÍNDICE DE CONTENIDOS

Carátula	1
Reporte de verificación de contenido.....	2
Certificación	3
Responsabilidad de autoría	4
Autorización de publicación	5
Dedicatoria	6
Dedicatoria	7
Agradecimiento.....	8
Agradecimiento.....	9
Índice de contenidos	10
Índice de figuras	18
Índice de tablas.....	22
Resumen.....	24
Abstract	25
Capítulo I: Aspectos generales.....	26
Planteamiento del problema.....	26
Antecedentes.....	27
Justificación e importancia	30
Objetivos del proyecto.....	33
<i>Objetivo general.....</i>	33

<i>Objetivos específicos</i>	33
Hipótesis	34
Variables	34
<i>Variables Independientes</i>	34
<i>Variables Dependientes</i>	34
Capítulo II: Fundamentación teórica.....	35
Discapacidad	35
<i>Grados de discapacidad</i>	35
<i>Tipos de discapacidad</i>	37
<i>Discapacidad física</i>	37
Tetraplejia	39
Tipos de sillas de ruedas	40
<i>Silla de ruedas manual</i>	40
<i>Silla de ruedas eléctricas</i>	40
Robótica.....	41
<i>Robótica móvil</i>	42
<i>Control cinemático</i>	43
Sistema de reconocimiento de voz	44
Transformada de Fourier	45
Escala MEL	45
Los Coeficientes Cepstrales de Frecuencias de Mel (MFCC).....	45

Voz a texto	45
<i>VOSK Open Source</i>	46
Inteligencia Artificial	46
Redes neuronales.....	47
<i>Redes Neuronales Convolucionales</i>	48
Operaciones para la construcción de una red neuronal convolucional.....	48
TensorFlow	50
<i>TensorFlow Lite</i>	50
Capítulo III: Diseño Mecánico	51
Parámetros dimensionales	51
<i>Antropometría</i>	51
<i>Medidas antropométricas</i>	51
<i>Medidas del paciente</i>	53
<i>Longitud total</i>	56
<i>Ancho total</i>	56
<i>Altura total</i>	56
<i>Longitud ocupada completa</i>	57
<i>Anchura ocupada</i>	57
<i>Altura ocupada</i>	57
<i>Dimensionamiento de la estructura física de la silla de ruedas</i>	58
Posicionamiento de la base de la silla para evitar el volcamiento.....	60

<i>Volcamiento longitudinal con respecto a las ruedas posteriores.</i>	61
<i>Volcamiento longitudinal con respecto a las ruedas frontales.</i>	62
Cálculos diseño mecánico	64
<i>Reacciones generadas sobre la base de la silla.</i>	64
<i>Reacciones generadas sobre las ruedas</i>	65
<i>Fuerzas generadas por las ruedas hacia la estructura</i>	67
Análisis mecánico al soporte para pies	68
<i>Cálculo del esfuerzo de flexión con respecto al punto 1</i>	71
Selección del material del bastidor	73
Análisis de elementos finitos del bastidor	74
Análisis de elementos finitos de la estructura del reposapiés.	76
Cálculo de la Fuerza de empuje	78
<i>Cálculo de fuerza requerida para una superficie plana</i>	79
Condición estática.....	80
Condición móvil.	81
<i>Cálculo de fuerza requerida para una superficie inclinada ascendente</i>	82
Condición estática.....	82
Condición móvil.	83
<i>Cálculo de fuerza requerida para una superficie inclinada descendente</i>	84
Condición estática.....	85
Condición móvil.	86

Capítulo IV: Diseño Electrónico	88
Cálculo de la potencia del motor	89
Selección de componentes	91
<i>Circuito de control</i>	92
Tarjeta principal.....	92
Microcontrolador.....	93
<i>Circuito de potencia</i>	95
Motorreductor.....	95
Drivers.....	97
Baterías.....	98
<i>Selección de periféricos</i>	99
Micrófono.....	100
Parlantes.....	101
Acondicionamiento de sensores.....	102
<i>Encoders</i>	102
Encoder incremental	103
<i>Sensor ultrasónico</i>	104
Sensor HC-SR04.....	104
<i>Cálculo de la distancia.</i>	105
<i>Acondicionamiento</i>	106
Esquema del circuito eléctrico	109

Capítulo V: Diseño del controlador	112
Modelamiento matemático de una plataforma móvil	112
Modelo geométrico.....	112
Modelo cinemático	114
Diseño del controlador.....	116
<i>Controlador de seguimiento</i>	<i>117</i>
<i>Control de regulación.....</i>	<i>118</i>
Controlador de bajo nivel	118
<i>PID discreto.....</i>	<i>119</i>
Aproximación al término integral.....	120
Aproximación al término derivativo.....	121
<i>Implementación del PID discreto.....</i>	<i>124</i>
Sintonización en lazo cerrado.....	124
Sintonización en lazo abierto.....	124
<i>Función de transferencia.....</i>	<i>124</i>
Estabilidad del controlador	129
<i>Estabilidad del controlador de regulación</i>	<i>129</i>
<i>Estabilidad del controlador de seguimiento de camino.....</i>	<i>132</i>
Capítulo VI: Reconocimiento de voz.....	134
Detección de la palabra clave (Wake Word Detection)	134
Recolección del Dataset de voz	135

<i>Estructura del Dataset</i>	136
<i>El Dataset</i>	139
Coeficientes cepstrales de frecuencias MEL	142
<i>Pre - énfasis</i>	143
<i>Ventaneo</i>	143
<i>Filtrado Hamming</i>	144
<i>Transformada rápida de Fourier y espectro de potencia</i>	146
<i>Banco de filtros MEL</i>	147
<i>Logaritmo de la señal</i>	149
<i>Transformada del coseno</i>	150
Arquitectura de la red neuronal	151
Umbral de Probabilidad	155
Conversión de voz a texto – VOSK	156
Capítulo VII: Pruebas y Resultados	159
Sistema de control	159
<i>Controlador de bajo nivel</i>	159
Regulación.....	160
Seguimiento.....	162
<i>Controlador de medio nivel</i>	164
Regulación de posición en el primer cuadrante.	164
Regulación de posición en el segundo cuadrante	166

Regulación de posición en el tercer cuadrante.....	167
Regulación de posición en el cuarto cuadrante.....	168
Giro a la derecha.	170
Giro a la izquierda.	171
<i>Controlador de alto nivel.....</i>	<i>173</i>
Comando hacia adelante.	173
Comando hacia atrás.	175
Trayectoria senoidal.....	176
Trayectoria Infinito.	177
Sistema de reconocimiento de la palabra clave.....	178
<i>Matriz de Confusión.....</i>	<i>179</i>
<i>Ensayo de reconocimiento de la palabra clave</i>	<i>180</i>
<i>Ensayo del reconocimiento de comandos de voz.....</i>	<i>182</i>
Resultados del usuario	183
Capítulo VIII: Conclusiones y Recomendaciones.....	186
Conclusiones.....	186
Recomendaciones.....	188
Punto de Vista sobre el Equipo Robótico.....	188
Trabajos Futuros	190
Bibliografía	191
Anexos.....	202

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	<i>Tipos de sillas de ruedas en función de la autonomía y discapacidad</i>	32
Figura 2	<i>Niveles de afectación por lesión medular</i>	39
Figura 3	<i>Silla de ruedas manual marca Newrise, modelo XSG103</i>	40
Figura 4	<i>Silla de ruedas eléctrica TITANAXS-18CS</i>	41
Figura 5	<i>Robot móvil MiR 1350</i>	42
Figura 6	<i>Esquema de parámetros de un robot móvil diferencial</i>	44
Figura 7	<i>Estructura de una red neuronal</i>	47
Figura 8	<i>Medidas antropométricas generales</i>	53
Figura 9	<i>Dimensiones externas de la silla de ruedas</i>	56
Figura 10	<i>Tamaño ocupado completo de la silla de ruedas</i>	57
Figura 15	<i>Análisis de volcamiento longitudinal con respecto a las ruedas posteriores</i>	61
Figura 16	<i>Análisis de volcamiento longitudinal con respecto a las ruedas frontales</i>	62
Figura 17	<i>Zona segura anti-volcamiento</i>	63
Figura 18	<i>Reacciones generadas sobre el soporte de la silla</i>	64
Figura 19	<i>Reacciones generadas sobre las 4 ruedas</i>	65
Figura 20	<i>Reacción generada por la separación que tienen las ruedas posteriores</i>	67
Figura 21	<i>Diagrama del cuerpo libre del reposapiés, vista isométrica</i>	68
Figura 22	<i>Diagrama del cuerpo libre del reposapiés, vista lateral</i>	70
Figura 23	<i>Diagrama de fuerza cortante del reposapiés</i>	70
Figura 24	<i>Diagrama de momento flector del reposapiés</i>	71
Figura 25	<i>Esfuerzo combinado en el punto C</i>	71
Figura 26	<i>Tubo estructural redondo</i>	73
Figura 27	<i>Simulación del AEF de las tensiones de Von Mises sobre el bastidor</i>	74
Figura 28	<i>Simulación del AEF de la deformación máxima del bastidor</i>	75
Figura 29	<i>Simulación del AEF del factor de seguridad del bastidor</i>	75

Figura 30 Simulación del AEF de las tensiones de Von Mises en el reposapiés.	76
Figura 31 Simulación del AEF de la deformación máxima en el reposapiés.	77
Figura 32 Simulación del AEF del factor de seguridad en el reposapiés.	78
Figura 33 Diagrama de cuerpo libre del robot en un plano horizontal.	79
Figura 34 Diagrama de cuerpo libre del robot en un plano inclinado ascendente.	82
Figura 35 Diagrama de cuerpo libre del robot en un plano inclinado descendente	84
Figura 36 Arquitectura del circuito de control y de potencia.	89
Figura 37 Partes principales de un encoder	102
Figura 38 Encoder Incremental	103
Figura 39 Sentido de giro del encoder.	104
Figura 40 Señales del sensor ultrasónico HC-SR04.	105
Figura 41 Circuito divisor de voltaje para pin Echo.	107
Figura 42 Circuito de acondicionamiento de los sensores ultrasónicos	108
Figura 43 Placa de acondicionamiento de sensores ultrasónicos.	109
Figura 44 Placa de control del robot.	110
Figura 45 CAD del tablero electrónico.	111
Figura 46 Representación gráfica del modelo geométrico del robot móvil diferencial	113
Figura 47 Método de integración trapezoidal.	120
Figura 48 Curva de reacción del motor derecho e izquierdo.	125
Figura 49 Importación de datos para estimación de función de transferencia.	125
Figura 50 Estimación de la función de transferencia del motor derecho e izquierdo.	126
Figura 52 Esquema del lazo de control de regulación de posición	130
Figura 53 Esquema del lazo de control de seguimiento de camino	132
Figura 54 Etapas del reconocimiento de voz de una palabra clave.	135
Figura 55 Interfaz gráfico de adquisición de archivos de audio.	137
Figura 56 Interfaz gráfico de entrenamiento y modelo de inteligencia artificial.	138

Figura 57 <i>Categorías del Dataset</i>	140
Figura 58 <i>Acrónimo de MARA</i>	141
Figura 59 <i>Subconjuntos del Dataset</i>	141
Figura 60 <i>Extracción de los coeficientes MFCCs</i>	142
Figura 61 <i>Archivo de audio correspondiente a la categoría MARA</i>	143
Figura 62 <i>Señal de 2000 muestras correspondiente a la ventana Hamming</i>	145
Figura 63 <i>Señal de 2000 muestras correspondiente a una ventana de la señal original</i>	145
Figura 64 <i>Señal de 2000 muestras suavizada con la ventana Hamming</i>	145
Figura 65 <i>Espectro de potencia de una ventana de audio entre 0.4 y 0.65 segundos</i>	147
Figura 66 <i>Espectrograma de potencia de la señal de audio</i>	147
Figura 67 <i>Banco de filtros triangulares</i>	148
Figura 68 <i>Espectrograma filtrado</i>	149
Figura 69 <i>Logaritmo del espectrograma filtrado</i>	150
Figura 70 <i>Coeficientes MFCCs</i>	151
Figura 71 <i>Estructura de los datos de entrada de la red Neuronal</i>	152
Figura 72 <i>Estructura del algoritmo de inteligencia artificial</i>	153
Figura 73 <i>Estructura del algoritmo de detección de palabras claves en TensorFlow</i>	154
Figura 74 <i>Algoritmo para la selección de la categoría</i>	155
Figura 75 <i>Algoritmo de conversión de voz a texto con VOSK</i>	156
Figura 76 <i>Set Point - Velocidad de motor derecho (Regulación)</i>	160
Figura 77 <i>Acciones y error de control para regulación del motor derecho</i>	161
Figura 78 <i>Set Point - Velocidad de motor derecho (Regulación)</i>	161
Figura 79 <i>Acciones de control y error para regulación del motor izquierdo</i>	162
Figura 80 <i>Set Point - Velocidad de motor derecho (Seguimiento)</i>	162
Figura 81 <i>Acciones y error de control para seguimiento de controlador de motor derecho</i>	163
Figura 82 <i>Set Point - Velocidad de motor izquierdo (Seguimiento)</i>	163

Figura 83	<i>Acciones y error de control para seguimiento de controlador de motor izquierdo ...</i>	164
Figura 84	<i>Trayectoria de regulación de posición y error de control (1er cuadrante)</i>	165
Figura 85	<i>Acciones de control para tarea de regulación (1er cuadrante).....</i>	165
Figura 86	<i>Trayectoria de regulación de posición y error de control (2do cuadrante).....</i>	166
Figura 87	<i>Acciones de control para tarea de regulación (2do cuadrante).....</i>	167
Figura 88	<i>Trayectoria de regulación de posición y error de control (3er cuadrante)</i>	168
Figura 89	<i>Acciones de control para tarea de regulación (3er cuadrante).....</i>	168
Figura 90	<i>Trayectoria de regulación de posición y error de control (4to cuadrante).....</i>	169
Figura 91	<i>Acciones de control para tarea de regulación (4to cuadrante).....</i>	170
Figura 92	<i>Trayectoria de regulación de orientación y error de control (giro a la derecha).....</i>	171
Figura 93	<i>Regulación de orientación y acciones de control (giro a la derecha)</i>	171
Figura 94	<i>Trayectoria de regulación de orientación y error de control (giro a la izquierda)</i>	172
Figura 95	<i>Regulación de orientación y acciones de control (giro a la izquierda).....</i>	173
Figura 96	<i>Trayectoria y errores de control (hacia el frente)</i>	174
Figura 97	<i>Acciones de control de seguimiento de camino (hacia el frente)</i>	174
Figura 98	<i>Trayectoria y errores de control (hacia atrás)</i>	175
Figura 99	<i>Acciones de control de seguimiento de camino (hacia atrás)</i>	176
Figura 100	<i>Trayectoria deseada - Trayectoria realizada (Senoidal).....</i>	176
Figura 101	<i>Trayectoria deseada - Trayectoria realizada (Infinito).....</i>	177
Figura 102	<i>Desarrollo de las funciones de acierto en el entrenamiento y validación.</i>	178
Figura 103	<i>Desarrollo de las funciones de pérdida en el entrenamiento y validación.</i>	179
Figura 104	<i>Matriz de confusión con el conjunto de datos de prueba.</i>	179
Figura 105	<i>Matriz de confusión con el conjunto de datos de validación.....</i>	180
Figura 106	<i>Rango de presión sonora al momento de establecer los comandos de voz.....</i>	181
Figura 107	<i>Rango de presión sonora del robot en condiciones normales.....</i>	181

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 <i>Escala genérica de gravedad de discapacidad</i>	36
Tabla 2 <i>Medidas antropométricas de José Luis Gavilanes y la silla de ruedas.</i>	54
Tabla 3 <i>Valores típicos y máximos de sillas de ruedas en base a la normativa ISO 7176-5.</i>	58
Tabla 4 <i>Comparación dimensional de la normativa ISO 7176-5 y el prototipo.</i>	59
Tabla 5 <i>Lista de componentes y masas.</i>	59
Tabla 6 <i>Parámetros del acero estructural ASTM A-36.</i>	74
Tabla 7 <i>Resumen del cálculo de la fuerza de empuje</i>	87
Tabla 8 <i>Selección de la tarjeta principal.</i>	92
Tabla 9 <i>Selección del microcontrolador</i>	94
Tabla 10 <i>Selección del motorreductor</i>	95
Tabla 11 <i>Selección de drivers.</i>	97
Tabla 12 <i>Selección de baterías</i>	98
Tabla 13 <i>Selección de micrófono</i>	100
Tabla 14 <i>Selección de parlantes.</i>	101
Tabla 15 <i>Tabla de sintonización de Ziegler-Nichols</i>	127
Tabla 16 <i>Constantes de PID para motores</i>	128
Tabla 17 <i>Sintonización fina de constantes PID de los motores.</i>	129
Tabla 18 <i>Frecuencias de muestreo típicas de audio.</i>	136
Tabla 19 <i>Descripción de los comandos análogos.</i>	157
Tabla 20 <i>Descripción de los comandos del sistema operativo.</i>	158
Tabla 21 <i>Descripción de los comandos informativos.</i>	158
Tabla 22 <i>Sintonización fina de constantes PID de los motores.</i>	160
Tabla 23 <i>Velocidades referencia para prueba de regulación</i>	160
Tabla 24 <i>Parámetros para prueba de regulación de posición (1er cuadrante)</i>	164
Tabla 25 <i>Parámetros para prueba de regulación de posición (2do cuadrante)</i>	166

Tabla 26 <i>Parámetros para prueba de regulación de posición (3er cuadrante)</i>	167
Tabla 27 <i>Parámetros para prueba de regulación de posición (3er cuadrante)</i>	169
Tabla 28 <i>Parámetros para prueba de regulación de orientación (giro a la derecha)</i>	170
Tabla 29 <i>Parámetros para prueba de regulación de orientación (giro a la izquierda)</i>	172
Tabla 30 <i>Pruebas del reconocimiento de la palabra clave de la categoría Detente</i>	182
Tabla 31 <i>Resultados obtenidos en el reconocimiento de comandos de voz.</i>	182
Tabla 32 <i>Resumen de la encuesta realizada.</i>	184

Resumen

Este trabajo consiste en el diseño y construcción de una silla de ruedas inteligente controlada por comandos de voz, la cual permite mejorar la autonomía móvil de una persona tetrapléjica. Se considera medidas antropométricas del usuario y las medidas externas en base a la normativa ISO 7176-5 para definir el tamaño ideal del equipo y generar cálculos mecánicos con un factor de seguridad superior a 2; se establece zonas seguras contra el volcamiento y se calcula la fuerza de empuje para la selección de motores. Se diseña una ley de control en base al modelo cinemático de un robot móvil diferencial. El controlador de alto nivel, que da seguimiento a caminos y el controlador de medio nivel, que regular la posición del robot, se apoya la implementación de un controlador de bajo nivel en cada rueda que permite seguir las velocidades determinadas por los algoritmos de control cinemático. Además, se analiza la estabilidad de los controladores mediante el criterio de Lyapunov. El sistema de reconocimiento de voz aprovecha las facultades de habla de las personas con tetraplejia y dispone de dos niveles: (1) el reconocimiento de palabras claves que consiste en obtener los coeficientes cepstrales de frecuencias Mel de los audios y clasificarlos por medio de una red neuronal convolucional CNN en categorías que permiten habilitar comandos y a detener el movimiento de la silla; y (2) la conversión de lenguaje hablado a texto permite identificar comandos de voz útiles para enviar al controlador robótico, generar movimiento e interactuar con el usuario.

Palabras Clave: silla de ruedas inteligente, robot móvil diferencial, controlador cinemático, inteligencia artificial, reconocimiento de voz.

Abstract

This work consists of the design and construction of an intelligent wheelchair controlled by voice commands, which allows improving the mobile autonomy of a quadriplegic person.

Anthropometric measurements of the user and external measurements based on the ISO 7176-5 standard are considered to define the ideal size of the equipment and generate mechanical calculations with a safety factor greater than 2; safe zones against overturning are established and the thrust force is calculated for the selection of motors. A control law is designed based on the kinematic model of a differential mobile robot. The high level controller, which tracks paths and the medium level controller, which regulates the position of the robot, are supported by the implementation of a low level controller on each wheel that allows it to follow the velocities determined by the kinematic control algorithms. In addition, the stability of the controllers is analyzed using the Lyapunov criterion. The speech recognition system takes advantage of the speech faculties of people with tetraplegia and has two levels: (1) keyword recognition that consists of obtaining the Mel frequency cepstral coefficients of the audios and classifying them by means of a CNN convolutional neural network into categories that allow enabling commands and to stop the movement of the chair; and (2) the conversion of spoken language to text allows identifying useful voice commands to send to the robotic controller, generate movement and interact with the user.

Key words: intelligent wheelchair, differential mobile robot, kinematic controller, artificial intelligence, voice recognition.

Capítulo I

Aspectos generales

Planteamiento del problema

La tetraplejía o cuadriplejía, es un tipo de parálisis causada principalmente por una lesión, fractura o enfermedad que provoca daño en las habilidades motrices de manera parcial o total, principalmente en las extremidades inferiores y superiores, a diferencia de la paraplejía en la que los brazos no pierden la motricidad. Este tipo de discapacidad genera pérdida de sensibilidad y su alcance depende de afectación a nivel de la médula espinal. Estudios muestran que los accidentes automovilísticos corresponden al 60% de casos de lesiones que provocan tetraplejía. (Sunrise Medical, 2018)

Un paciente que padece tetraplejía, cuyas extremidades motrices no responden a estímulos debido al daño del sistema nervioso central, está condicionada a moverse con una silla de ruedas apoyada de una persona que controle dicha silla, lo que genera una autonomía nula en el individuo, ya que sus movimientos son totalmente dependientes de otra persona. Actividades diarias como levantarse de la cama, alimentarse, moverse de un sitio a otro, leer un libro o manipular una computadora son prácticamente imposibles de forma autónoma para una persona con tetraplejía.

Entre los varios casos de lesión en el sistema nervioso central a nivel nacional, se encuentra José Luis Gavilanes Cordones, un paciente del Patronato Municipal Amparo Social de Latacunga que sufrió un accidente de tráfico que le provocó una lesión en las vértebras cervicales C3 y C4, cuyo diagnóstico médico estableció tetraplejía espástica por lesión medular a nivel cervical, calificada como discapacidad del 83%, es decir, una parálisis completa a nivel del cuello donde se interrumpe la comunicación nerviosa desde el encéfalo hacia el sistema periférico, perdiendo la sensibilidad, la movilidad en brazos y piernas de forma irreversible.

Durante 7 años el paciente ha recibido terapia física en el Patronato Municipal Amparo Social de Latacunga, sin embargo, su estatus lo obliga a ser totalmente dependiente de sus familiares para su movilidad, aseo, necesidades físicas, etc. En la actualidad, existen sillas de ruedas manuales, cuyo problema radica en la dependencia que tiene el usuario de otra persona para poder movilizarse; y sillas de ruedas eléctricas, enfocadas en personas parapléjicas, que se benefician del movimiento de sus extremidades superiores para controlar la silla mediante un joystick, opción no factible a una persona cuadripléjica, además del elevado costo de estos equipos médicos comerciales.

Por tal motivo, este proyecto se enfoca en atender la pérdida de movilidad de una persona con tetraplejia, mediante el desarrollo de una silla de ruedas inteligente que permita aumentar la autonomía móvil y responda a comandos de voz como interfaz de control al aprovechar sus capacidades de lenguaje.

Antecedentes

Se estima que son miles de millones de casos en la población mundial los que padecen algún grado de discapacidad, la cifra aproximadamente bordea el 15% de la población total, y se proyecta que este número crezca considerando el evidente envejecimiento de las personas y la prevalencia de dolencias permanentes. (OMS, 2021)

A nivel nacional se registran alrededor de 415.500 personas que padecen discapacidad, de los cuales, el mayor porcentaje padecen discapacidad física, con un valor del 46,78%. (El Telégrafo, 2017)

En este contexto, la tecnología ha enfocado varios de sus avances en brindar apoyo y facilidad a este grupo mediante varios campos entre los que se destaca la robótica asistencial, que se dedica a proporcionar soporte a las personas en actividades diarias con el principal

objetivo de mejorar capacidades motoras, cognitivas, reducción de ansiedad, acompañamiento y ayuda en tareas rutinarias. (La Salle, 2023)

Las primeras investigaciones en el campo de la robótica para rehabilitación o discapacidad se remontan a 1988, cuando se desarrolló el primer prototipo funcional que consistía en una mano robótica para asistir en la comunicación de personas con discapacidad visual y auditiva. Este proyecto sentó las bases como un concepto revolucionario de la robótica (Jaeger, 2006). En la actualidad los robots permiten sintetizar y facilitar actividades que resultan complejas para personas con reducción de capacidades visuales, motoras o cognitivas.

Desde entonces hasta la actualidad varios estudios e investigaciones buscan desarrollar la robótica asistencial para mejorar la calidad de vida de las personas con discapacidad:

La investigación realizada por (Martínez et al., 2018) en la universidad de Baja California, desarrolla tecnología que beneficia a pacientes con parálisis de tipo motriz que no disponen de control de movimientos en extremidades superior e inferiores, mediante la creación de un algoritmo de reconocimiento de voz basado en la transformada de Fourier discreta para el control de motores de una silla de ruedas eléctrica, mediante el procesamiento digital de señales en LabVIEW.

A nivel nacional, el trabajo de (Ortiz, 2017) de la Escuela Politécnica de Chimborazo tiene el propósito de controlar una silla de ruedas mediante ondas cerebrales, permitiendo movilizarse automáticamente a usuarios con algún tipo de discapacidad con ayuda del dispositivo Emotiv Epoc, sensor que recepta señales electroencefalográficas, tomando en cuenta que las capacidades cognitivas del usuario deben estar intactas. El trabajo detalla el desarrollo de un controlador basado en cinemática y dinámica de la silla para control de regulación y seguimiento de trayectoria.

A nivel institucional se han desarrollado proyectos relacionados con la contribución de la tecnología al grupo de personas con capacidades especiales:

(Lasluisa, 2015) desarrolló una silla de ruedas controlada por ondas cerebrales enfocada en usuarios que padezcan tetraplejia, proyecto basado en expresividad, cognición y modo giroscopio. Las señales se adquieren por el sensor comercial Emotiv EPOC, que se conecta inalámbricamente a una computadora portátil. Los desplazamientos se programan mediante el software LabVIEW y la tarjeta Arduino.

En el trabajo de (Aguinaga & Gómez, 2019) se implementa un prototipo de parlante inteligente que permite al usuario controlar su entorno por medio de comandos de voz: accionamiento de interruptores, focos, puertas, etc., contribuyendo a mejorar la autonomía que produce la incapacidad de movimiento.

Finalmente, la investigación de (Macas & Recalde, 2021), detalla la aplicación de algoritmos de control moderno a un robot móvil diferencial, cuyo modelo de control cinemático sirve de referencia para la propuesta del presente proyecto de titulación. Dicho trabajo explica la implementación del modelo dinámico del robot, el cual permite optimizar el desempeño del controlador; además de la aplicación de varios tipos de controladores.

En mención a lo citado anteriormente, se puede evidenciar la existencia de trabajos de investigación enfocados en el desarrollo tecnológico con respecto a dispositivos médicos para beneficiar a personas que padezcan algún tipo de discapacidad física o motora, mejorar su calidad de vida y proporcionar mecanismos que les permitan integrarse en la sociedad.

A nivel comercial existen dispositivos como la silla de ruedas con inteligencia artificial Wheelie 7, que permite movilizar a los usuarios mediante el reconocimiento en tiempo real de expresiones faciales en el rostro. El equipo, creado por Hoobox Robotics junto con Intel, permite escoger entre al menos diez expresiones faciales para controlarlo y en la fase de

pruebas ayudó a más de setenta pacientes en Estados Unidos, sobre todo con casos de esclerosis múltiple, cuadriplejia o discapacidad relacionada a la edad. (SaluDigital, 2018)

Justificación e importancia

La tetraplejia es un tipo de parálisis provocada por una enfermedad degenerativa o daño en el sistema nervioso central que genera pérdida parcial o total de la capacidad motora en las extremidades superiores, inferiores y en el torso. En la actualidad no existe tratamiento particular que permita recuperar la movilidad perdida, lo que limita severamente la capacidad de los individuos afectados de vivir de forma autónoma, reduciendo su inclusión en la sociedad, debido a la muy alta dependencia de cuidadores y familiares. Varios estudios y desarrollos tecnológicos dirigen sus esfuerzos a crear dispositivos que permitan mejorar la calidad de vida de pacientes que hayan sufrido lesiones en la médula espinal, permitiendo generar movilidad en extremidades superiores e inferiores mediante prótesis, exoesqueletos, o desarrollando prototipos que permitan generar inclusión de este grupo a la sociedad.

Por ejemplo, los robots asistenciales comprenden un amplio campo de la robótica que responde a especializar robots en el apoyo a limitaciones físicas de las personas: robots que permiten trasladar personas con discapacidades motrices, robots que cumplen funciones de alimentación asistida, etc. El principal objetivo de estos robots es dar autonomía, independencia y mejorar la calidad de vida. (Fundación Juan XXIII, 2017)

A nivel internacional la ONU se compromete con la importancia de los grupos de personas vulnerables en la sociedad mediante “La Estrategia de las Naciones Unidas para la Inclusión de la Discapacidad”, programa integral que proporciona la base de un progreso sostenible y transformador, con el principal objetivo de generar igualdad e impulsar la inclusión de las personas con capacidades especiales, al igual que la integración de todos sus derechos. (ONU, 2019)

A nivel nacional existen principios constitucionales y entidades que respaldan el desarrollo tecnológico y las investigaciones en beneficio de las personas pertenecientes al grupo de atención prioritaria:

Dentro de los principios fundamentales de la Constitución de la República del Ecuador se contempla oportunidades equitativas, inclusión, detección, rehabilitación médica y social de las personas que padecen algún tipo de limitación, a fin de mejorar la calidad de vida física y emocional.

El Consejo Nacional para la Igualdad de Discapacidades es el ente rector en asuntos pertinentes a las discapacidades en el Ecuador, y entre sus políticas impulsa investigaciones y estudios relacionados con la discapacidad: cuidado, atención e inclusión de las personas con discapacidad en todos los ámbitos de la sociedad. (CONADIS, 2017)

El Plan de Creación de Oportunidades, propuesto por el Gobierno actual, en su objetivo 5 literal 2, rechaza todo tipo de discriminación social, promueve una vida libre de violencia a mujeres, niños, discapacitados y grupos vulnerables, generando inclusión a la sociedad y fomentando oportunidades equitativas. (Secretaría Nacional de Planificación, 2021)

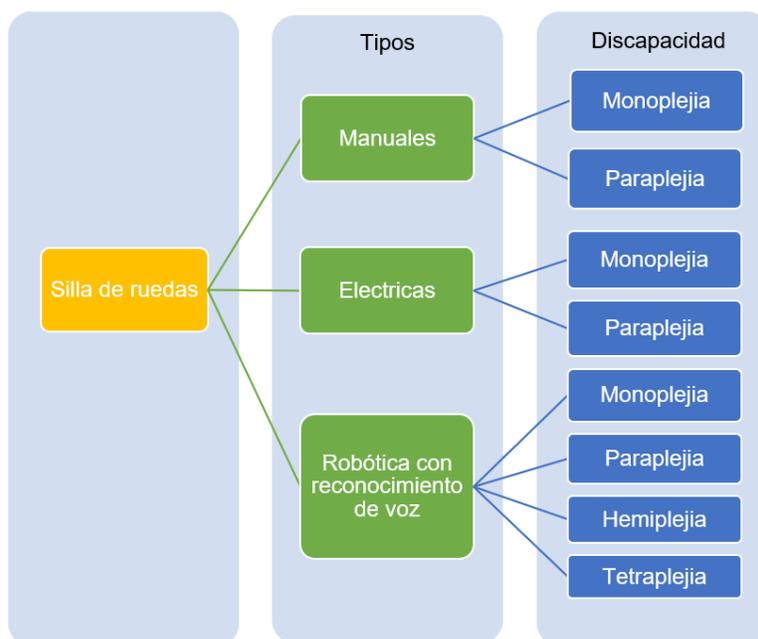
La importancia de una silla de ruedas radica en subsanar en cierto grado la falta de movilidad provocada por enfermedades o eventos traumáticos, y dotar de autonomía a las personas para que realicen sus actividades diarias disminuyendo la dependencia de asistentes y familiares.

De acuerdo con el tipo de discapacidad y la autonomía, se puede acceder a determinado tipo de silla de ruedas, como se observa en la Figura 1, por ejemplo, para el caso de una silla robótica por medio de reconocimiento de voz podría acceder todo tipo de persona que tenga discapacidad y que conserve sus facultades del habla intactas, mientras que con las

sillas de ruedas manuales y eléctricas simples, no pueden dar autonomía a personas con tetraplejía puesto que necesitan tener las facultades motoras en brazos y manos intactas.

Figura 1

Tipos de sillas de ruedas en función de la autonomía y discapacidad



El desarrollo de este proyecto mecatrónico involucra varias etapas divididas en el diseño mecánico de la estructura, el diseño electrónico del circuito de control y el circuito de potencia, el diseño del controlador que permite generar movimientos automáticos y la implementación de inteligencia artificial en la etapa de reconocimiento de voz para dotar a la silla de cierto grado de interacción con el paciente. Por lo mencionado anteriormente, el proyecto busca dar solución al problema de la carencia de movilidad de personas tetrapléjicas, ayudando a mejorar su calidad de vida, aumentando su nivel de autonomía al reducir la dependencia de un asistente y generando una inclusión en la sociedad como una persona con movilidad independiente.

Por lo tanto, la implementación de una silla de ruedas inteligente, controlada mediante comando de voz, permite mejorar la autonomía móvil de un individuo con tetraplejia al brindarle la facilidad de movilización autónoma, aprovechando las capacidades cognitivas y de lenguaje intactas del paciente. El desarrollo del proyecto permitirá aportar significativamente en el desenvolvimiento propio del usuario en ambientes estructurados y no estructurados, apoyado de una interfaz de voz que permita interactuar con el equipo, generando movilidad autónoma y controlada.

Objetivos del proyecto

Objetivo general

Diseñar y construir una silla de ruedas inteligente para contribuir en la autonomía móvil de una persona tetrapléjica mediante reconocimiento de voz.

Objetivos específicos

- Investigar el estado actual de la robótica asistencial y el reconocimiento de voz enfocado en discapacidad física mediante documentos, libros y publicaciones que permitan determinar los parámetros de diseño.
- Diseñar el sistema mecánico de la silla de ruedas, considerando el criterio del diseño ergonómico que se adapte a las características físicas de una persona tetrapléjica.
- Diseñar y seleccionar los sistemas electrónicos de control y potencia que generen los movimientos del robot a partir de las instrucciones establecidas por el controlador.
- Diseñar el controlador basado en el modelo cinemático de la silla de ruedas para proporcionar condiciones de movimiento autónomas y estables.
- Desarrollar el sistema de reconocimiento de voz que permita el control e interacción del paciente con la silla de ruedas.

- Realizar pruebas experimentales con la silla de ruedas inteligente para validar la autonomía móvil de la persona con tetraplejia.

Hipótesis

¿El diseño y construcción de una silla de ruedas inteligente con reconocimiento de voz contribuirá en la autonomía móvil de una persona tetrapléjica?

Variables

Variables Independientes

Silla de ruedas inteligente con reconocimiento de voz.

Variables Dependientes

Contribución en la autonomía móvil de una persona tetrapléjica.

Capítulo II

Fundamentación teórica

Discapacidad

La discapacidad es un padecimiento que provoca que las personas tengan una condición más dificultosa para la realización de actividades e interacción. Este grupo de personas, sin importar raza, cultura o género poseen derecho a una vida equitativa e igualitaria de oportunidades; y desde el paradigma de los derechos humanos se considera a las personas como individuos que necesitan de servicios externos para poder gozar de una situación. Sin embargo, la realidad de estas personas generalmente se caracteriza por extrema pobreza, tasa elevada de desempleo, acceso limitado a servicios como luz, agua potable, telefonía, salud, vivienda, transporte, entre otros; en general su posición social y cultural es marginal y aislada. (OPS, 2006)

En el Artículo 1 del Reglamento a la Ley Orgánica de Discapacidades define como persona con discapacidad a “aquella que, como consecuencia de una o más deficiencias física, mentales, intelectuales o sensoriales, con independencia de la causa que la hubiera originado, ve restringida permanentemente su capacidad biológica, psicológica y asociativa para ejercer una más actividades esenciales de la vida diaria, en una proporción equivalente al treinta por ciento (30%) de discapacidad, debidamente calificada por la autoridad sanitaria nacional”. (Reglamento de La Ley Orgánica de Discapacidades, 2017)

Grados de discapacidad

De acuerdo con la escala CIF (Clasificación Internacional del Funcionamiento, de la Discapacidad y de la Salud), se clasifica los grados de discapacidad con respecto a la afección física, desarrollo de las actividades diarias, apoyo de tercero, entre otros. La **Tabla 1** muestra la escala de gravedad de discapacidad.

Tabla 1*Escala genérica de gravedad de discapacidad*

Discapacidad	Definición	Porcentaje
Ninguna	No presenta dificultades en realizar las actividades diarias y supera efectivamente las barreras del entorno.	0 a 4%
Leve	En este nivel se evidencia que la persona tiene problemas leves en realizar actividades ordinarias, pero las puede realizar sin ayuda de otras personas.	5 a 24%
Moderada	Presenta signos, secuelas o deficiencias permanentes que le dificultan realizar algunas actividades diarias, supera con dificultad las barreras del entorno.	25 a 49%
Grave	Presenta signos, secuelas o deficiencias permanentes que imposibilitan las actividades diarias y llega a necesitar apoyo para el desarrollo de labores básicas.	50 a 74%
Muy grave	Presenta signos, secuelas o deficiencias permanentes que afectan gravemente las actividades diarias y requieren el apoyo para el desarrollo de labores básicas.	75 a 95%
Completa	Presenta signos, secuelas o deficiencias permanentes que afectan totalmente al desarrollo de las actividades diarias y requieren el apoyo para el desarrollo de labores básicas, sin superar las barreras del entorno	96 a 100%

Nota. Detalle de la escala de discapacidad categorizada por niveles y porcentajes. Tomado de (MSP, 2018)

Tipos de discapacidad

El Ministerio de Salud Pública (MSP, 2018) explica siete tipos de discapacidad:

- **Discapacidad auditiva:** Percepción auditiva limitada e irrecuperable debido a la pérdida parcial o total de los oídos.
- **Discapacidad de lenguaje:** Pérdida irrecuperable de la habilidad del habla lo que afecta al nivel de comprensión y expresión de la persona. No está relacionado obligatoriamente con la discapacidad intelectual.
- **Discapacidad física:** Limitaciones de postura, de movilidad del sistema motriz, reducción de fuerza y dificultad para ejecutar actividades diarias.
- **Discapacidad intelectual:** Esta discapacidad está caracterizada por afecciones significativas de la facultad mental, como adaptabilidad, habilidad social y práctica. Este tipo de discapacidad se origina previo a los 18 años.
- **Discapacidad visual:** Limitación en la capacidad visual, el afectado experimenta dificultad para identificar colores, profundidad y movilizar los ojos.
- **Discapacidad psicosocial:** Alteración de la cognición, comportamiento y regulación emocional del individuo debido a anomalías biológicas y mentales.
- **Discapacidad múltiple:** Presencia de varias discapacidades (visual, auditiva, física, etc.) que afectan severamente a la salud del individuo.

Discapacidad física

Los pacientes que sufren discapacidad física presentan dificultad para hacer uso parcial o completo del sistema motriz debido a lesiones, traumas o enfermedades irrecuperables. Esta discapacidad también hace referencia a movimientos descoordinados, descontrolados y a trastornos de equilibrio. (Predif, 2023)

Existen un gran número de circunstancias y condiciones que conllevan a discapacidad física, entre ellas está la lesión medular. Dicha lesión se produce por la desconexión de las vías nerviosas que comunican el cerebro con el resto del organismo por medio de la médula espinal, producto de una fractura o lesión que afecta a la columna vertebral.

De la información publicada en (Predif, 2023) y (Castillero, 2017) se concluye que la tetraplejía se puede clasificar bajo diversos criterios:

- Según el grado de afección vertebral:
 - Monoplejía: Parálisis de una única extremidad.
 - Hemiplejía: Lesión en el sistema nervioso que produce la parálisis de la parte opuesta a la dañada. Se produce por accidentes cerebrovasculares o traumatismos craneoencefálicos.
 - Paraplejía: Lesión en el sistema nervioso que produce la parálisis en las extremidades inferiores.
 - Tetraplejía: Lesión en el sistema nervioso que produce la parálisis en las extremidades superiores e inferiores.
- Según su extensión:
 - Completa: Toda la sección transversal de la médula se encuentra afectada
 - Incompleta: Parte de la sección transversal de la médula se encuentra afectada.
- Según los síntomas:
 - Espástica: los músculos presentan rigidez, generando dificultad para moverse.
 - Flácida: la musculatura se torna blanda, sin presentar resistencia a la movilidad.

Tetraplejía

La tetraplejía corresponde a una disfunción irrecuperable de la movilidad de las cuatro extremidades, es decir, pérdida del control voluntario de la musculatura o de los sentidos sensoriales de forma permanente. Generalmente es causado por una fractura en alguna de las vértebras cervicales desde la C1 a la C8. (García et al., 2004)

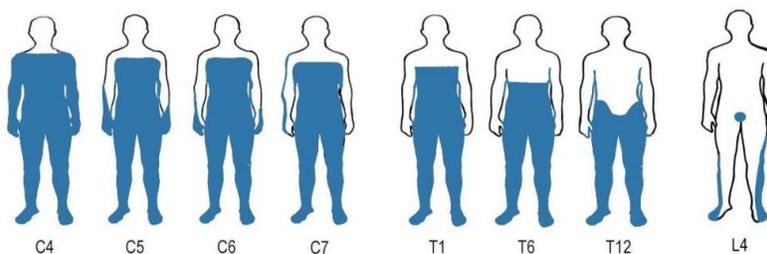
(Tododisca, 2022) establece las partes de cuerpo afectadas por una lesión en las vértebras cervicales y torácicas:

- Lesión por encima de la vértebra C4, requiere un respirador mecánico para vivir.
- Lesión en la vértebra C5, solo tienen movimiento de los hombros.
- Lesión en la vértebra C6, solo tienen movimiento del puño.
- Lesión en la vértebra C7, solo tiene relativa movilidad en brazos.
- Lesión en la vértebra T1, solo tienen movilidad en brazos.
- Lesión en la vértebra T6, solo tienen movilidad a nivel del pecho.
- Lesión en la vértebra T12, solo tienen movilidad por encima de la cintura.
- Lesión en la vértebra L4, disminución parcial de sentidos.

La Figura 2 detalla gráficamente la afectación física en función de la lesión cervical.

Figura 2

Niveles de afectación por lesión medular



Nota. Tomado de (Tododisca, 2022)

Tipos de sillas de ruedas

Silla de ruedas manual

La Figura 3 muestra una silla de ruedas de tipo manual, la cual permite girar las ruedas posteriores de forma manual para generar un desplazamiento rotacional o longitudinal. El diseño de estos equipos permite mantener su estructura física o ceder de forma plegable. Generalmente estas sillas se fabrican en materiales ligeros para darle ligereza. (Castanier & Mendía, 2018)

Figura 3

Silla de ruedas manual marca Newrise, modelo XSG103



Nota. Tomado de (MEDECU, 2023)

Silla de ruedas eléctricas

Estas sillas presentan actuadores que ayudan al desplazamiento rotacional o longitudinal, se alimentan por baterías y la etapa de control se realiza con un joystick que permite modificar la velocidad, posición de respaldo, etc., como se muestra en la Figura 4. Estas sillas aceptan características propias de cada paciente. (Castanier & Mendía, 2018)

Figura 4

Silla de ruedas eléctrica TITANAXS-18CS



Nota. Tomado de (Globo Medics, 2023)

Robótica

Un robot es un sistema complejo, dotado de capacidad para adquirir información del entorno, procesar dicha información y actuar, tomando decisiones preprogramadas o, inclusive, de forma automática, concediendo cierto grado de inteligencia. En sus orígenes se enfocaban en la industria, se utilizaban principalmente para actividades repetitivas y que impliquen pocas operaciones lógicas. Hoy en día, gracias al desarrollo de la tecnología, se han ido fabricando robots cada vez más complejos, que incorporan sensores, procesadores, actuadores y algoritmos de control tan sofisticados que permiten crear sistemas dotados de inteligencia artificial. (Vives, 2021)

La expansión de la robótica le ha llevado a aplicarse en diferentes ámbitos: a) industrial: utilizados en fábricas de automoción, manufactura y líneas de producción; son el tipo de máquinas usadas en trabajos pesados, ambientes difíciles, que se caracterizan por la rapidez y precisión; b) social: robots que interactúan y se comunican con seres humanos, siguiendo patrones, comportamientos, normas sociales (Moriello, 2008) y usan tecnologías como reconocimiento facial, reconocimiento de voz o procesamiento de lenguaje; c) servicio: robots

que operan semi o automáticamente para ejecutar actividades útiles para los seres humanos, tales como robots de inspección, vigilancia, para detección de minas antipersona. (Aracil et al., 2008)

El campo de la robótica en medicina es amplio, desde robots utilizados para cirugías, que se caracterizan por incorporar alta precisión, lo que ayuda a cirujanos en operaciones, hasta robots automáticos asisten a personas con dependencias o prótesis de última tecnología. (Esneca, 2018)

Robótica móvil

La robótica móvil es una rama de la ingeniería que permite ampliar las aplicaciones de la robótica añadiendo algoritmos de navegación autónoma. Actualmente se utilizan en el seguimiento de trayectoria que permiten al robot cumplir su objetivo, evitan obstáculos utilizando algoritmos de control de alto nivel que consideran grandes factores y sistemas complejos. La Figura 5 muestra un tipo de robot móvil industrial.

Figura 5

Robot móvil MiR 1350



Nota. Tomado de (MiR, 2023)

(Aranda et al., 2002) define a un robot móvil como un sistema electromecánico con facultad de trasladarse con diferentes grados de autonomía dentro de un espacio utilizando

sensores para actuar en base a un algoritmo predefinido. Estos dispositivos tienen la tarea de regular su posición o dar seguimiento a trayectorias requeridas.

Control cinemático

Los dispositivos autoguiados que se utilizan en procesos industriales automáticos y otras aplicaciones, incorporan sistemas de control que les permiten dar seguimiento a referencias estáticas o móviles. Para un robot móvil diferencial,

El modelo cinemático representa la velocidad del robot en el plano cartesiano en función de las velocidades de cada rueda contemplado de la misma forma valores de la geometría del dispositivo, lo que permite caracterizar el comportamiento del robot en base a entradas de velocidad. (Hernández et al., 2017)

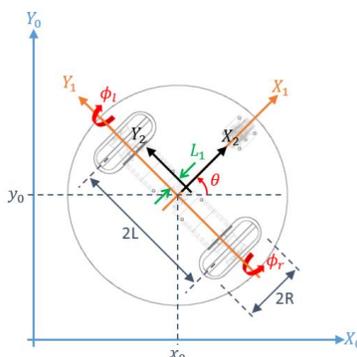
El lazo de control cinemático se expande en un control de posición y en la aplicación de la cinemática inversa de las ruedas. Dicho análisis permite determinar las posiciones de referencia que cada robot está facultado para seguir con un error de control enclavado en cero. (Gracia, 2008).

Según (Hernández et al., 2017) el sistema de coordenadas en la cinemática directa consiste en obtener el vector de velocidad del vehículo a partir de las velocidades de rueda sensorizada, mientras que el modelo cinemático inverso permite describir el movimiento de un vehículo autónomo, buscando los valores de sus actuadores en base a la trayectoria deseada.

En la Figura 6 se caracteriza el modelo geométrico de un robot móvil de tracción diferencial.

Figura 6

Esquema de parámetros de un robot móvil diferencial



Nota. Sistema de coordenadas que permiten describir el desplazamiento y orientación del robot. Tomado de (Hernández et al., 2017)

Sistema de reconocimiento de voz

El habla tiene como objetivo principal transmitir un mensaje a través de una secuencia de unidades sonoras. Esta secuencia tiene que obedecer a las restricciones impuestas por la lengua, por lo tanto, el habla y la lengua no pueden desvincularse, ya que la señal del habla no sólo contiene el mensaje deseado, sino también las características de la lengua y del hablante. Además, el estado emocional del hablante también se transmite a través del habla. Los sistemas actuales de reconocimiento de voz, el idioma, la emoción y el habla se basan en características derivadas del análisis espectral en tiempo corto. Pero las características espectrales se ven afectadas por las características del canal y el ruido. Esto motivó a los investigadores a explorar el uso de características adicionales, que pueden proporcionar pruebas complementarias a los sistemas basados en el espectro. Los sistemas de verificación automática del hablante son útiles para aplicaciones como la autenticación de transacciones, el control de acceso a los sistemas, la supervisión del uso del teléfono y el análisis forense de las coincidencias de voz. (Leena, 2018)

Transformada de Fourier

La transformada de Fourier, es una herramienta matemática desarrollada por Joseph Fourier y es un algoritmo que permite descomponer una señal continua en el dominio temporal y convertirla al dominio frecuencial, en donde la combinación de diferentes tipos de frecuencias permite formar el sonido, lenguaje hablado y lo que los oídos humanos perciben, es decir, la transformada de Fourier (FT) generalmente es usada para extraer todas las frecuencias y magnitudes presentes en una señal temporal. (Singh, 2021)

Escala MEL

En 1937 Stevens, Volkman y Newman, desarrollaron la escala psicoacústica MEL que sirve para representar la forma de la percepción humana del sonido en base a la igualdad de distancias entre tonos, en donde, se expone a los oyentes a dos fuentes de sonido distantes entre sí y los humanos determinan la distancia entre estas fuentes sin tener contacto visual, por lo cual, la percepción humana no es lineal, las distancias en la escala MEL aumenta con la frecuencia de la señal temporal. (Singh, 2021)

Los Coeficientes Cepstrales de Frecuencias de Mel (MFCC)

Estos coeficientes permiten la extracción de los parámetros de la señal de voz, puesto que la variación conocida como anchos de banda de las frecuencias críticas del oído humano. La forma de representación a través de los filtros aplicados por la técnica MFCC están separados linealmente a frecuencias menores de 1000 Hz y a partir de frecuencias mayores de 1000 Hz está separado logarítmicamente, con el fin de capturar las características fonéticas más importantes del habla humano, a través de la escala de Mel. (D. Salcedo & Teixeira, 2006)

Voz a texto

El reconocimiento de voz es la tarea en la que una máquina u ordenador transforma el lenguaje hablado en texto. Un buen ejemplo es la función de escritura por voz de Google Docs, que convierte la voz en texto mientras se habla. En particular, la conversión de voz a texto es

mediante el uso de algoritmos de redes neuronales recurrentes (RNN), ya que pueden capturar las dependencias temporales en los datos del habla que son importantes en la tarea de convertirlos en texto. (Arumugam & Shanmugamani, 2018)

VOSK Open Source

VOSK Open Source fue desarrollado por Alpha Cephei y es un kit de herramientas que permite la conversión de voz a texto y tiene disponibilidad en más de 20 idiomas con un estado de funcionamiento completamente fuera de línea (Offline), a diferencia de los actuales asistentes de voz que necesitan conexión a internet para funcionar. (Alpha Cephei, 2023)

Para que VOSK pueda iniciar el funcionamiento es necesario la instalación del modelo de reconocimiento de voz que puede ser descargado desde su página oficial de Alpha Cephei, en donde existen modelos robustos de varios gigabytes y ligeros entre 50 a 300 megabytes que son compatibles con Raspberry Pi, Android y iOS. (Alpha Cephei, 2023)

Inteligencia Artificial

La Inteligencia Artificial (IA) se adapta por medio de algoritmos de aprendizaje secuencial que le permite adquirir una habilidad para clasificar o predecir. Al combinarse con la retro propagación, el algoritmo puede ajustarse mediante el entrenamiento para alcanzar un modelo óptimo. Por ejemplo, los asistentes virtuales como Alexa, Google, Siri, entre otros, aprovechan al máximo los datos, pero esto también significa una desventaja en estos algoritmos, puesto que si no existe una adecuada base de datos el algoritmo no será eficiente, es decir, que cualquier tipo de dato erróneo o inexactitud provocará un deficiente modelo de predicción o clasificación. (Adamssen, 2020)

La inteligencia artificial se puede definir como la ciencia que permite construir algoritmos inteligentes para que realicen las actividades que normalmente lo harían los seres humanos. La

inteligencia artificial supervisada se caracteriza por tener la capacidad de aprender de un gran conjunto de datos estructurados y tomar decisiones eficientes. (Rouhiainen, 2018)

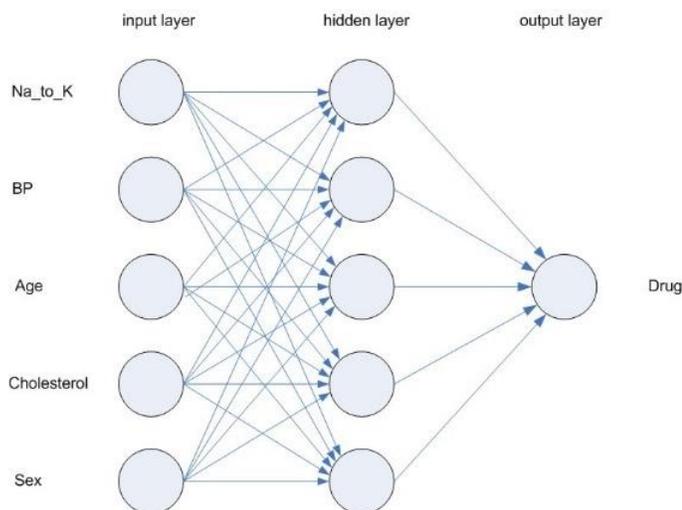
Redes neuronales

Dentro del desarrollo científico de la inteligencia artificial, una de las áreas más populares y utilizadas para el desarrollo de algoritmos de predicción son las redes neuronales artificiales. Estas redes buscan imitar la estructura esquemática del sistema nervioso para emular la manera de aprender del cerebro humano que consiste en adquirir su conocimiento de acuerdo con la experiencia generada por las vivencias personales. (Flores & Fernández, 2008)

La información numérica que ingresa a las capas de entrada se propaga realizando operaciones matemáticas no lineales desde el inicio y continúan sucesivamente a través de las capas ocultas hasta llegar a las capas finales, en donde se envía como resultado final el valor predicho, como se observa en la Figura 7.

Figura 7

Estructura de una red neuronal



Nota. Tomado de (IBM, 2021)

Las redes neuronales dentro del aprendizaje supervisado entrenan en base a registros de información, generando predicciones con respecto a cada información de entrada y retro propagándose con las ponderaciones cuando el valor predicho no es el correcto. El proceso es iterativo y permite a la red mejorar las ponderaciones hasta cumplir con la tolerancia de aceptación del modelo de inteligencia artificial. A medida que progresa el entrenamiento, la red es más precisa en la replicación de resultados conocidos. Una vez la red haya sido entrenada y tiene un buen nivel de acierto, se puede aplicar para generar predicciones de situaciones que se desconoce el resultado, generando una predicción acertada. (IBM, 2021)

Redes Neuronales Convolucionales

Las redes neuronales convolucionales son usadas generalmente para el procesamiento de imágenes con visión artificial. Las operaciones de convolución utilizan una máscara que atraviesa toda la imagen (de izquierda a derecha y de arriba hacia abajo), generando así los píxeles de salida en base a la combinación lineal de los píxeles de entrada, de esta forma reduce el tamaño y la carga computacional en cuestiones de número de conexiones y parámetros entrenables. (C. Pérez & Miguel, 2019)

Operaciones para la construcción de una red neuronal convolucional. De forma general, para la construcción de una red neuronal Convolucional CNN de clasificación se debe disponer de las siguientes operaciones:

- Relleno o Padding: al realizar una operación de tipo convolucional generalmente esta disminuye el tamaño de la imagen original, por lo tanto, la operación Padding permite agregar píxeles con valor cero después de una operación convolucional para obtener el mismo valor dimensional con respecto a la imagen original. (Torres, 2020)
- Agrupación máxima o Max – Pooling: es la operación que permite agrupar el contenido de píxeles de una imagen en segmentos de igual tamaño para extraer el valor máximo o

más representativo en cada segmento de interés para asignarlo a la salida y así reducir la cantidad de datos. (Torres, 2020)

- Capa completamente conectada o Densa: es la combinación de una o varias neuronas que se encuentran conectadas completamente, es decir, las neuronas pertenecientes a las capas internas están conectadas a cada una de las neuronas de las capas anteriores y así sucesivamente. (Reinoso et al., 2022)
- Normalización por lotes o Batch Normalization: consiste en un procesamiento de la información para establecer una escala común y sin distorsión, esto se logra mediante la normalización de la información de salida de la red neuronal, en donde se mantiene con valores cercanos a 0 y la desviación estándar es cercana a 1. (Keras, s. f.)
- Filtro o Kernel: es un filtro matricial denominado como “detector de propiedades” y generalmente es usado en las redes neuronales convolucionales, ya que permite extraer características importantes de una imagen al enfocar, desenfocar, detectar bordes, entre otras, durante el proceso de convolución. (Lubinus et al., 2021)
- Aplanado o Flatten: esta operación aparece al final de las capas convolucionales y consiste en aplanar los valores numéricos de los mapas de características para concatenarlos en un solo vector de datos para que puedan ingresar en las capas densas de una red neuronal. (Atienza, 2018)
- Convolución: esta operación involucra un filtro matricial o kernel que tiene un tamaño menor que la imagen original para poder desplazarse de forma horizontal y vertical hasta realizar un barrido total a medida que realiza varias operaciones que generan un mapa de características con ciertos patrones. (Lubinus et al., 2021)
- Función de activación rectificadora lineal (RELU): es una función que admite valores reales en un rango de cero hasta el infinito, es decir, cuando la entrada tenga un valor menor a cero, la salida será cero, pero cuando la entrada es superior a cero la salida es

proporcional a la variable de entrada, siendo esta una de las más usadas en el Deep Learning puesto que permite la combinación de funciones lineales. (Torres, 2020)

- Softmax: esta función de activación es altamente utilizada en algoritmos de clasificación y sirve para convertir los datos procesados de las salidas de una red neuronal en probabilidades de forma binaria con un rango de 0 a 1 y es aplicada a múltiples categorías. (Díaz & Aroche, 2020)

TensorFlow

La empresa de Google creó el framework de Tensorflow para crear, desarrollar y entrenar aplicaciones con inteligencia artificial, modelos de aprendizaje automático y programación mediante Python. Actualmente es uno de los más populares y fue donado a la comunidad opensource. (Miralles, 2022)

TensorFlow Lite

Los desarrolladores de Google incorporaron el framework de TensorFlow Lite que permite una compatibilidad de alto rendimiento entre el modelo de IA con los dispositivos iOS, Android, Linux y microcontroladores por medio de lenguajes de programación como Java, Swift, C, C++ y Python. (TensorFlow, 2021)

Además, se enfoca en generar la mayor potencialidad al optimizar el modelo de aprendizaje automático al evitar la latencia de envío y recepción de datos entre servidor y el dispositivo ya que garantiza la privacidad sin que la información salga del dispositivo (sistema offline) y entre otras cualidades permite la reducción del tamaño del modelo de IA con inferencia de alta eficiencia que disminuye el consumo energético. (TensorFlow, 2021)

Capítulo III

Diseño Mecánico

Parámetros dimensionales

Actualmente no existen documentos normativos ecuatorianos para el diseño de sillas de ruedas que sean equivalentes a la norma ISO 7176-5, la cual establece un enfoque de preselección del tamaño en función de las dimensiones totales, la masa y la superficie de giro estándar. Por lo tanto, a nivel nacional se hace referencia directa a esta norma que proporciona definiciones técnicas, dimensiones típicas y masas importantes de sillas de ruedas manuales y eléctricas que se orienta hacia usuarios, arquitectos, diseñadores, fabricantes, médicos y laboratorios de pruebas. (ISO, 2008)

Antropometría

La antropometría se enfoca en el estudio de las dimensiones y características físicas con énfasis en posiciones espaciotemporales estáticas o dinámicas, para representar las variables de peso, talla, pliegues, diámetros, perímetros, estado nutricional, entre otras, que determinan la composición corporal de un individuo o grupo de personas en base parámetros de sexo, etnia, raza, edad y alimentación. Generalmente las medidas antropométricas se analizan mediante conceptos estadísticos de percentiles que permiten expresar la información en un intervalo general de 0-100%, donde el 0 corresponde al valor inferior de una muestra y el 100% corresponde al valor superior de la muestra. (Gómez et al., 2018)

Medidas antropométricas

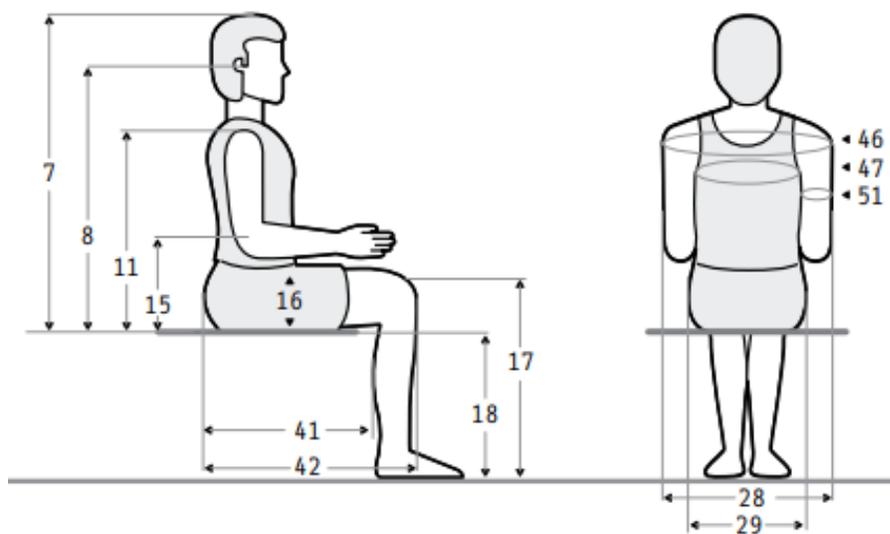
Para el diseño ergonómico se debe establecer de forma preliminar un estudio antropométrico, como se indica en la Figura 8, para garantizar que el diseño de un producto este basado bajo las directrices dimensionales, es decir, en este proyecto se busca dar un enfoque ergonómico hacia una persona en específico y se toma como referencia las siguientes dimensiones antropométricas:

- Altura sentado erguido: corresponde a la distancia medida de forma vertical desde la zona superior de la cabeza hasta la base del asiento cuando el usuario se encuentra sentado.
- Altura de los ojos: corresponde a la distancia medida de forma vertical con referencia hacia el eje horizontal que pasa por el centro de la pupila hasta la base del asiento.
- Altura acromial: corresponde a la distancia medida de forma vertical con referencia al cuello y acromion hasta la base del asiento.
- Altura radial: corresponde a la distancia medida de forma vertical con referencia al codo cuando este se encuentra con un ángulo de 90° entre el eje medio del tronco y el antebrazo hasta la base del asiento.
- Altura del muslo: corresponde a la distancia medida de forma vertical con referencia a la zona más elevada del área inguinal hasta la base del asiento.
- Altura de la rodilla: corresponde a la distancia medida de forma vertical con referencia a la zona más alta de la rodilla hasta la base del reposapiés.
- Altura de la fosa poplíteica: corresponde a la distancia medida de forma vertical con referencia a la parte posterior de la articulación de la rodilla hasta la base del reposapiés, cuando este se encuentra con un ángulo de 90° .
- Anchura codo a codo: corresponde a la distancia medida de forma horizontal con referencia a los bordes más lejanos de los codos, cuando el brazo y el antebrazo forman un ángulo de 90° .
- Anchura de las caderas: corresponde a la distancia medida de forma horizontal con referencia a los bordes más lejanos de los costados de los muslos.

- Largura nalga - fosa poplítea: corresponde a la distancia medida de forma horizontal con referencia a la zona inferior de la nalga hasta la parte posterior de la rodilla.
- Longitud nalga-rodilla: corresponde a la distancia medida de forma horizontal con referencia a la zona de la nalga hasta la zona frontal de la rodilla.

Figura 8

Medidas antropométricas generales.



Nota. En posición sentada, población laboral sexo masculino 20-39 años. Tomado de (Avila et al., 2007)

Medidas del paciente

El paciente José Luis Gavilanes Cordones presenta una edad actual de 30 años, una masa corporal de 75 kg y una estatura de 172 cm, por lo cual, se muestra la lista de medidas antropométricas del paciente y se compara con las medidas que presenta el asiento y la estructura de la silla de ruedas cuando esta se encuentra ensamblada.

Tabla 2

Medidas antropométricas de José Luis Gavilanes y la silla de ruedas.

No.	Descripción	Paciente [cm]	Silla de ruedas	Aplicación
			[cm]	
7	Altura sentado erguido	85	No aplica	Ninguna
8	Altura de los ojos	77	76-80	Reposa cabeza
11	Altura acromial	57	52-60	Cinturón de seguridad
15	Altura radial	27	24-28	Reposabrazos
16	Altura del muslo	17	No aplica	Ninguna
17	Altura de la rodilla	55	No aplica	Ninguna
18	Altura de la fosa poplítea	42	37-43	Altura del asiento
28	Anchura codo a codo	50	60	Reposabrazos
29	Anchura de las caderas	32	37	Ancho del asiento
41	Largura nalga - fosa poplítea	48	48	Largo del asiento
42	Longitud nalga-rodilla	58	No aplica	Ninguna

Nota. Datos obtenidos de las medidas antropométricas y su aplicación en el desarrollo de la estructura de la silla de ruedas.

En base a los datos de las medidas antropométricas de la Tabla 2, se establece una comparativa entre las medidas del paciente y las medidas generales del diseño de la silla de ruedas inteligente, en donde se establece las siguientes consideraciones de medidas para el diseño:

- Medida de la altura de los ojos, permite establecer la posición del reposacabezas en donde se tiene un valor máximo de 80 cm cuando el espaldar se encuentra elevado y un valor mínimo de 75 cm cuando el espaldar se encuentra bajado.
- La medida de la altura acromial permite establecer la distancia y la colocación del cinturón de seguridad de 4 sujeciones, en donde las 2 sujeciones superiores se adaptan al nivel de los hombros.
- La altura radial permite establecer el nivel de altura de los codos con respecto al reposabrazos, en donde se tiene un valor máximo de 28 cm cuando el espaldar se encuentra erguido y de 24 cm cuando el espaldar se encuentra reclinado.
- La altura de la fosa poplítea permite establecer la altura de la base del asiento, al ser regulable se tiene un valor máximo de 43 cm cuando está elevado y de 37 cm cuando el asiento se encuentra bajado.
- La anchura de codo a codo del paciente permite establecer el valor mínimo que debe tener la separación de los reposabrazos.
- La anchura de las caderas del paciente permite establecer el valor mínimo que debe tener de anchura el asiento.
- La largura nalga - fosa poplítea permite establecer el valor máximo que debe tener el largo del asiento.

Longitud total

La longitud total es la distancia medida de forma horizontal entre las zonas más alejadas de la vista frontal y posterior de la silla de ruedas, cuando esta se encuentra ensamblada con los soportes para piernas, pies u otros dispositivos antivuelco, como se evidencia en la Figura 9 literal A. (ISO, 2008)

Ancho total

El ancho total es la distancia medida de forma horizontal entre las zonas alejadas con respecto a las vistas laterales de la silla de ruedas, cuando esta se encuentra ensamblada y con todos los accesorios, como se evidencia en la Figura 9 literal B. (ISO, 2008)

Altura total

La altura total es la distancia medida de forma vertical desde el plano de base o de referencia hasta la zona con el punto más alto de la silla de ruedas, cuando esta se encuentra ensamblada y con todos los accesorios, como se evidencia en la Figura 9 literal C. (ISO, 2008)

Figura 9

Dimensiones externas de la silla de ruedas



Nota. Largo de 1100 mm, ancho de 680 mm y alto de 1350 mm.

Longitud ocupada completa

La Longitud ocupada completa es la distancia medida de forma horizontal entre las zonas más alejadas de la vista frontal y posterior de la silla de ruedas, cuando esta se encuentra ensamblada y con el usuario, como se evidencia en la Figura 10 literal A. (ISO, 2008)

Anchura ocupada

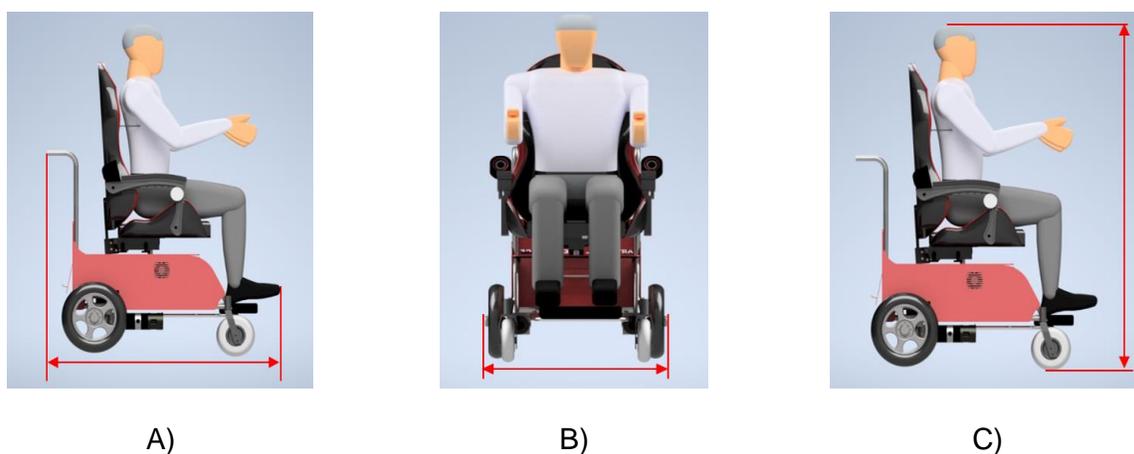
El ancho total es la distancia medida de forma horizontal entre las zonas laterales más alejadas con respecto a las vistas laterales de la silla de ruedas, cuando esta se encuentra ensamblada y con el usuario, como se evidencia en la Figura 10 literal B. (ISO, 2008)

Altura ocupada

La altura total es la distancia medida de forma vertical desde el plano de base o de referencia hasta la zona con el punto más alto de la silla de ruedas, cuando esta se encuentra ensamblada y con el usuario, como se evidencia en la Figura 10 literal C. (ISO, 2008)

Figura 10

Tamaño ocupado completo de la silla de ruedas.



Nota. Largo de 1150 mm, ancho de 680 mm y alto de 1460 mm.

En la Tabla 3, se indica las dimensiones típicas y máximas a considerar en el diseño de sillas de ruedas manuales y eléctricas, donde el valor típico corresponde al valor ideal de diseño para los fabricantes y el valor máximo es el límite dimensional con respecto a espacios arquitectónicos, de acuerdo con la normativa (ISO, 2008)

Tabla 3

Valores típicos y máximos de sillas de ruedas en base a la normativa ISO 7176-5.

Descripción	Clase A [mm]		Clase B [mm]		Clase C [mm]	
	Típico	Máximo	Típico	Máximo	Típico	Máximo
Longitud ocupada	1240	1300	1300	1300	1300	1300
Ancho ocupado	620	700	680	700	700	700
Altura ocupada	1500	1600	1530	1600	1590	1600

Nota. Concatenación dimensional en el diseño de silla de ruedas. Tomado de (ISO, 2008)

Dimensionamiento de la estructura física de la silla de ruedas

En la Tabla 4 se muestra la comparación de los valores máximo-recomendados en la normativa ISO 7176-5 para diseño de silla de ruedas, con respecto a las medidas finales del prototipo y se evidencia que las medias de la silla de ruedas son menores que los valores máximos permitidos, por lo tanto, el prototipo cumple con las medidas dimensionales con respecto a la normativa ISO 7176-5.

Tabla 4

Comparación dimensional de la normativa ISO 7176-5 y el prototipo.

Descripción	Valor máximo	Silla de ruedas	Observación
	[mm]	[mm]	
Longitud ocupada	1300	1150	Aceptable
Ancho ocupado	700	680	Aceptable
Altura ocupada	1600	1460	Aceptable

Nota. Dimensiones máximas de sillas de ruedas manuales y sillas de ruedas eléctricas.

Tomado en (ISO, 2008).

Tabla 5

Lista de componentes y masas.

Componente	Masa unitaria	Cantidad	Masa total
	[kg]		[kg]
Persona	75	1	75.00
Batería	11.7	2	23.40
Ventiladores	0.05	2	0.10
Cables	0.5	1	0.50
Estructura	11	1	11.00
Silla	15	1	15.00
Parlante	0.18	2	0.36
Circuitos	1	1	1.00
Llantas posteriores	1.7	2	3.40
Llantas frontales	1.5	2	3.00

Componente	Masa unitaria [kg]	Cantidad	Masa total [kg]
Motores, frenos y caja reductora	7.2	2	14.40
Encoder y acople	0.28	2	0.56
Micrófono	0.25	1	0.25
Carrocería de acrílico	4.5	1	4.50
Reposapiés	0.8	1	0.80
Luces direccionales	0.25	2	0.50
Jaladera	0.25	2	0.50
Paro de emergencia	0.03	1	0.03
Frenos manuales	0.25	2	0.50
Seguro de 5 puntas	3	1	3.00
\sum Masas			157.8

Nota. Descripción de los accesorios utilizados y sus respectivas masas.

Posicionamiento de la base de la silla para evitar el volcamiento

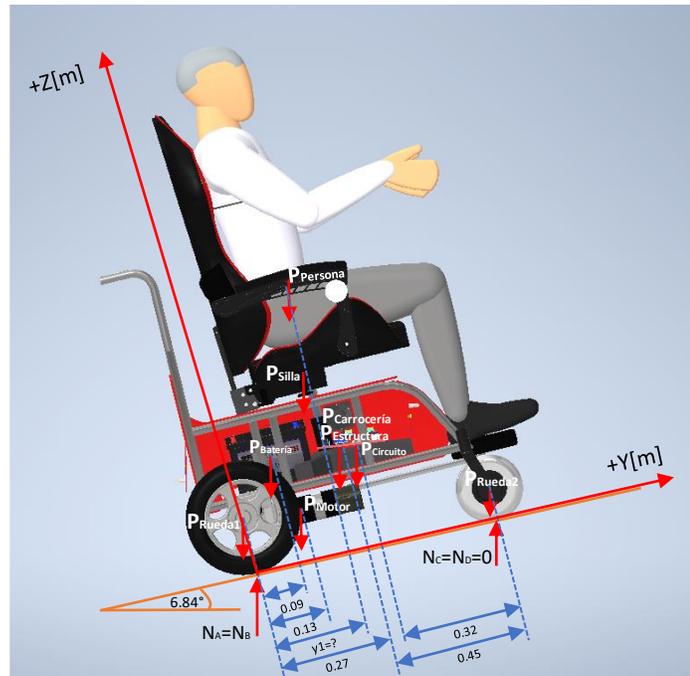
Para garantizar que el proyecto cumpla con la métrica de comodidad y estética se hace uso de una silla gaming, la cual se encuentra descrita en el Anexo 1, y sirve como base para realizar el análisis de volcamiento que consiste en encontrar una zona segura a fin de ubicar el asiento y evitar que exista una rotación de la silla de ruedas con respecto a las llantas posteriores y frontales, por lo tanto, existe dos casos de estudio de volcamiento:

- Volcamiento longitudinal con respecto a las ruedas posteriores.
- Volcamiento longitudinal con respecto a las ruedas frontales.

Volcamiento longitudinal con respecto a las ruedas posteriores.

Figura 11

Análisis de volcamiento longitudinal con respecto a las ruedas posteriores.



Las 2 ruedas posteriores y las 2 ruedas frontales son simétricas, por lo tanto, se asumen que las reacciones normales $N_A = N_B$ y $N_C = N_D$.

Sumatoria de momentos con respecto a la reacción normal N_A :

$$\begin{aligned} \curvearrow^+ \sum M_{N_A} &= 0 \\ 2P_{Bateria} (0.09m) \cos \theta + 2P_{Motor} (0.13m) \cos \theta + P_{Persona} y_1 \cos \theta + P_{Silla} y_1 \cos \theta + P_{Carroceria} (0.27m) \cos \theta + \\ &+ P_{Estructura} (0.27m) \cos \theta + P_{Circuito} (0.4m) \cos \theta + P_{Rueda2} (0.72m) \cos \theta - 2N_C (0.72m) \cos \theta = 0 \end{aligned}$$

Al ordenar la ecuación anterior se obtiene lo siguiente:

$$\begin{aligned} 2P_{Bateria} (0.09m) + 2P_{Motor} (0.13m) + P_{Persona} y_1 + P_{Silla} y_1 + P_{Carroceria} (0.27m) + \\ + P_{Estructura} (0.27m) + P_{Circuito} (0.4m) + P_{Rueda2} (0.72m) - 2N_C (0.72m) = 0 \end{aligned}$$

Para que exista un volcamiento longitudinal con respecto a las ruedas posteriores se debe cumplir que las reacciones normales N_C y N_D con respecto a las ruedas frontales sean iguales a cero, para que el volcamiento se produzca en un sentido antihorario con respecto a la Figura 11.

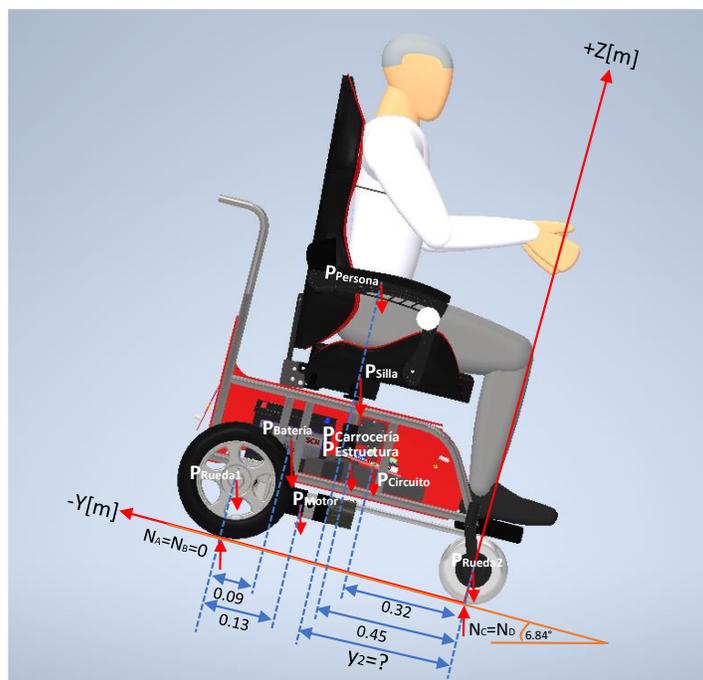
$$y_1 = -\frac{2P_{Bateria}(0.09m) + 2P_{Motor}(0.13m) + (P_{Carroceria})(0.27m) + P_{Estructura}(0.27m) + P_{Circuito}(0.4m) + P_{Rueda2}(0.72m)}{(P_{Persona} + P_{Silla})}$$

$$y_1 = -0.107m$$

Volcamiento longitudinal con respecto a las ruedas frontales.

Figura 12

Análisis de volcamiento longitudinal con respecto a las ruedas frontales.



Las 2 ruedas posteriores y las 2 ruedas frontales son simétricas, por lo tanto, se asumen que las reacciones normales $N_A = N_B$ y $N_C = N_D$.

Sumatoria de momentos con respecto a la reacción normal N_C :

$$\begin{aligned} \curvearrow^+ \sum M_{N_C} &= 0 \\ -P_{Circuito} (0.32m) \cos \theta - P_{Carrocería} (0.45m) \cos \theta - P_{Estructura} (0.45m) \cos \theta - P_{Persona} y_2 \cos \theta \\ -P_{Silla} y_2 \cos \theta - 2P_{Motor} (0.59m) \cos \theta - 2P_{Bateria} (0.63m) \cos \theta - P_{Rueda1} (0.72m) \cos \theta + 2N_A (0.72m) \cos \theta &= 0 \end{aligned}$$

Al ordenar la ecuación anterior se obtiene lo siguiente:

$$\begin{aligned} -P_{Circuito} (0.32m) - P_{Carrocería} (0.45m) - P_{Estructura} (0.45m) - P_{Persona} y_2 \\ -P_{Silla} y_2 - 2P_{Motor} (0.59m) - 2P_{Bateria} (0.63m) - P_{Rueda1} (0.72m) + 2N_A (0.72m) &= 0 \end{aligned}$$

Para que exista un volcamiento longitudinal con respecto a las ruedas frontales se debe cumplir que las reacciones normales N_A y N_B con respecto a las ruedas posteriores sean iguales a cero, para que el volcamiento se produzca en un sentido horario con respecto a la Figura 12.

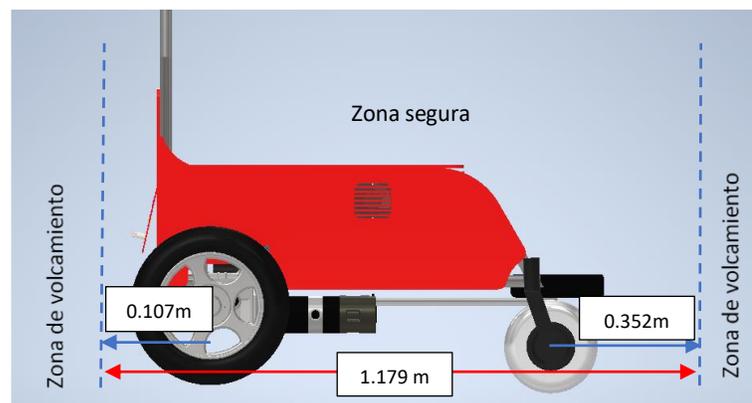
$$y_2 = -\frac{P_{Circuito} (0.32m) + P_{Carrocería} (0.45m) + P_{Estructura} (0.45m) + 2P_{Motor} (0.59m) + 2P_{Bateria} (0.63m) + P_{Rueda1} (0.72m)}{(P_{Persona} + P_{Silla})}$$

$$y_2 = -0.352m$$

Por lo tanto, en la Figura 13 muestran los límites dimensionales de ubicación de la silla para evitar el volcamiento con respecto a las ruedas frontales y posteriores.

Figura 13

Zona segura anti-volcamiento.



Cálculos diseño mecánico

En el diseño del chasis se busca garantizar que las partes estructurales que conforman el robot tengan un factor de seguridad aceptable en frente a situaciones críticas de esfuerzo y se consideran múltiples diseños preliminares del robot móvil para irlo transformando y perfeccionando hasta llegar al modelo correcto e ideal.

Para abordar el análisis de este proyecto se lo divide en varios zonas:

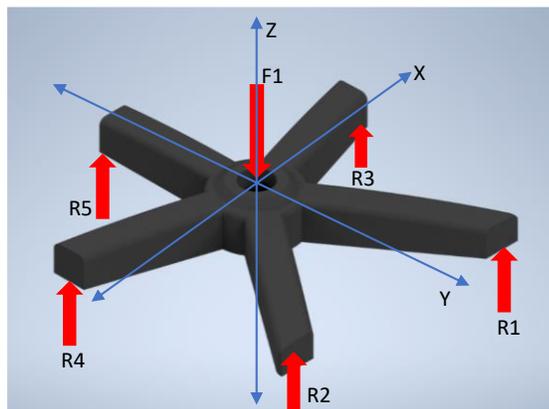
- Reacciones generadas sobre la base de la silla.
- Reacciones generadas sobre las 4 ruedas.
- Fuerza generada sobre la estructura.

Reacciones generadas sobre la base de la silla.

En la Figura 14 las reacciones generadas en los 5 puntos de apoyo aparecen por la distribución igualitaria de las masas del usuario, silla y accesorios (seguro de 5 puntas, paro de emergencia, micrófono, parlantes). A continuación, se calcula las reacciones:

Figura 14

Reacciones generadas sobre el soporte de la silla.



$$\uparrow^+ \sum F_z = 0$$

$$R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 - (M_{Silla} + M_{Persona} + M_{Accesorios}) \cdot g = 0$$

Las 5 puntas del soporte de la silla mantienen una separación simétrica, por lo tanto, se asume que la distribución de fuerzas de las reacciones es simétrica y se tiene que cada una de las reacciones son iguales, $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_5$.

$$5R_1 - (15kg + 75kg + 3.64kg) \cdot \left(9.81 \frac{m}{s^2}\right) = 0$$

$$5R_1 - (93.64kg) \cdot \left(9.81 \frac{m}{s^2}\right) = 0$$

$$R_1 = 183.72N$$

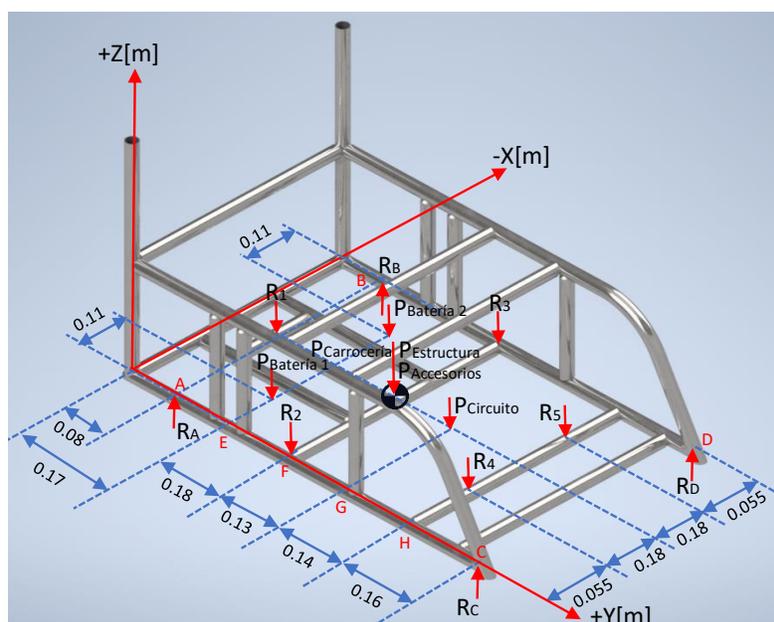
$$R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_5 = 183.72N$$

Reacciones generadas sobre las ruedas

En la Figura 15 las reacciones generadas sobre las 4 ruedas aparecen por las masas de la silla, usuario, baterías, estructura, carrocería, circuito y accesorios (ventiladores, cables, parlantes, micrófono, luces direccionales, jaladera, paro de emergencia, frenos manuales, seguro de 5 puntas). En el Anexo 3 se muestran los planos del diseño mecánico del bastidor.

Figura 15

Reacciones generadas sobre las 4 ruedas.



Las masas equivalentes generan una fuerza que es aplicable directamente sobre el centro de masa del bastidor:

$$M = (M_{Silla} + M_{Persona} + 2M_{Batería} + M_{Estructura} + M_{Carrocería} + M_{Circuito} + M_{Accesorios})$$

$$M = (15kg + 75kg + 2(11.7kg) + 11kg + 4.5kg + 1kg + 5.74kg)$$

$$M = 135.64kg$$

A continuación se realiza la sumatoria de fuerzas para obtener las reacciones generadas sobre las 4 ruedas:

$$+\uparrow \sum F_z = 0$$

$$R_A + R_B + R_C + R_D - M \cdot g = 0$$

$$R_A + R_B + R_C + R_D - (135.64kg) \cdot \left(9.81 \frac{m}{s^2}\right) = 0$$

$$R_A + R_B + R_C + R_D = 1330.62N$$

Por simetría se asume $R_A = R_B$ y que $R_C = R_D$ y se obtiene la ecuación (1):

$$2R_A + 2R_C = 1330.62N$$

$$R_A + R_C = 665.31N \quad (1)$$

Se realiza el cálculo del momento con respecto al punto A de la Figura 15:

$$\curvearrowleft^+ \sum Mx_{R_A} = 0$$

$$R_C \cdot d_{AC} + R_D \cdot d_{AC} - R_2 \cdot d_{AF} - R_3 \cdot d_{AF} - R_4 \cdot d_{AH} - R_5 \cdot d_{AH} - P_{Batería1} \cdot d_{AE} +$$

$$-P_{Batería2} \cdot d_{AE} - P_{Estructura} \cdot d_{AF} - P_{Carrocería} \cdot d_{AF} - P_{Circuito} \cdot d_{AG} - P_{Accesorios} \cdot d_{AF} = 0$$

$$R_C(0.61m) + R_D(0.61m) - R_2(0.18m) - R_3(0.18m) - R_4(0.45m) - R_5(0.45m) - P_{Batería1}(0.09m) +$$

$$-P_{Batería2}(0.09m) - P_{Estructura}(0.27m) - P_{Carrocería}(0.27m) - P_{Circuito}(0.4m) - P_{Accesorios}(0.27m) = 0$$

Las reacciones R_C y R_D son simétricas, por lo tanto $R_C = R_D$:

$$2R_C(0.61m) - 2R_2(0.18m) - 2R_4(0.45m) - 2P_{Batería1}(0.09m) +$$

$$-P_{Estructura}(0.27m) - P_{Carrocería}(0.27m) - P_{Circuito}(0.4m) - P_{Accesorios}(0.27m) = 0$$

$$-2R_C(0.61m) - 2(183.72N)(0.18m) - 2(183.72N)(0.45m) - 2(114.77)(0.09m) + \\ -(107.91N)(0.27m) - (44.14N)(0.27m) - (9.81N)(0.4m) - (56.3N)(0.27m) = 0$$

Resolviendo se tiene que:

$$R_C = 256N$$

Con el valor de la reacción R_C se despeja R_A de la ecuación (1) y se obtiene:

$$R_A + R_C = 665.31N$$

$$R_A = 665.31N - R_C$$

$$R_A = 665.31N - 256N$$

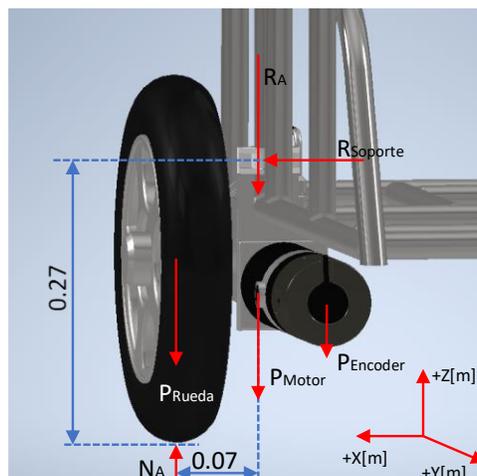
$$R_A = 409.31N$$

Fuerzas generadas por las ruedas hacia la estructura

En la Figura 16, por la distancia de separación que tienen las ruedas posteriores con respecto al bastidor, en la estructura se crea una reacción en el soporte de la estructura para evitar que las ruedas roten sobre la estructura de la silla, así:

Figura 16

Reacción generada por la separación que tienen las ruedas posteriores.



Nota. Dimensiones generales, fuerzas y reacciones generadas sobre la rueda posterior.

Sumatoria de momentos con respecto a N_A :

$$\begin{aligned} \curvearrowright^+ \sum My_{N_A} &= 0 \\ R_{\text{Soporte}} (0.27m) - P_{\text{Motor}} (0.07m) - P_{\text{Encoder}} (0.07m) - R_A (0.07m) &= 0 \\ R_{\text{Soporte}} (0.27m) - (70.63N)(0.07m) - (2.74N)(0.07m) - (409.31N)(0.07m) &= 0 \\ R_{\text{Soporte}} &= 88.51N \end{aligned}$$

Análisis mecánico al soporte para pies

En la normativa EN 12184:2004 de diseño de sillas de ruedas se establece que el peso que produce el usuario sobre el centroide del reposapiés a cada pie genera una fuerza normal al plano de la superficie del reposapiés, que es 1.25 veces la masa del ocupante, como se muestra en la ecuación (2).

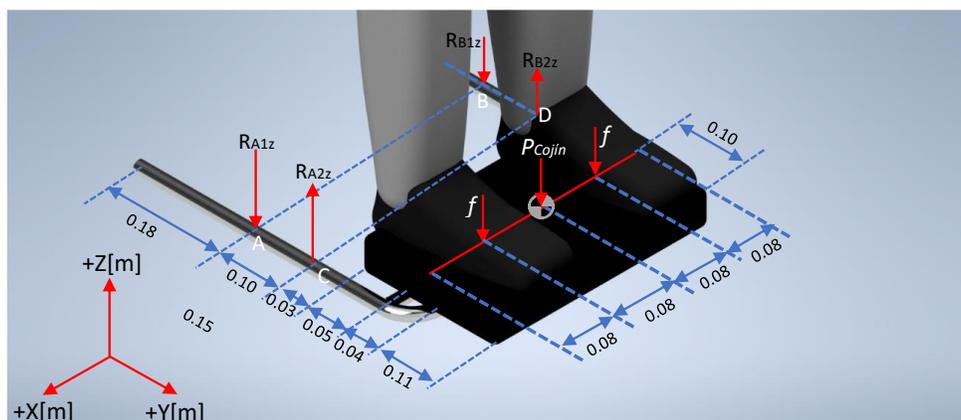
$$f = 1.25M \quad (2)$$

Donde:

- f : Es la fuerza normal en newtons aplicada al centro de masa del reposapiés de forma individual.
- M : Es la masa máxima del usuario en kilogramos.

Figura 17

Diagrama del cuerpo libre del reposapiés, vista isométrica.



En el Anexo 3 se muestran los planos generados durante el diseño mecánico de la estructura. A continuación, se calcula las reacciones sobre los puntos de apoyo A, B, C y D con respecto a la Figura 17:

$$\begin{aligned}
 & +\uparrow \sum F_z = 0 \\
 & -R_{A1z} + R_{A2z} - R_{B1z} + R_{B2z} - f - f - P_{Cojin} = 0
 \end{aligned}$$

Por simetría se asume que $R_{A2z} = R_{B2z}$ y $R_{A1z} = R_{B1z}$:

$$\begin{aligned}
 & -2R_{A1z} + 2R_{A2z} - 2(1.25M) - 5.88N = 0 \\
 & -2R_{A1z} + 2R_{A2z} - 2(1.25(75kg)) - 5.88N = 0 \\
 & \quad -R_{A1z} + R_{A2z} = 96.69N \\
 & \quad -R_{A1z} = 96.69N - 222.38N \\
 & \quad R_{A1z} = R_{B1z} = 125.69N
 \end{aligned}$$

Sumatoria de momentos con respecto al punto A:

$$\begin{aligned}
 & \curvearrowright^+ \sum M_{Ax} = 0 \\
 & R_{A2z}(0.1m) + R_{B2z}(0.1m) - f(0.23m) - f(0.23m) - P_{Cojin}(0.23m) = 0
 \end{aligned}$$

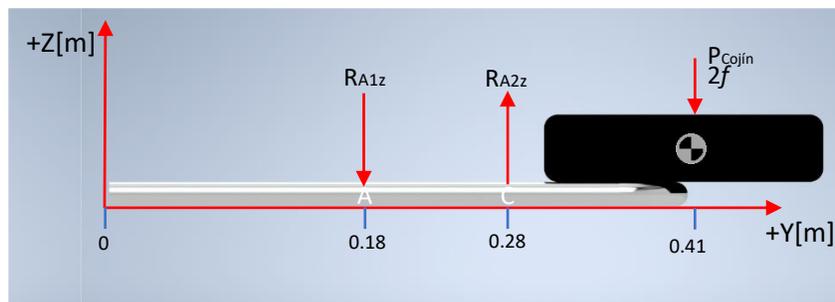
Por simetría se asume que $R_{A2z} = R_{B2z}$

$$\begin{aligned}
 & 2R_{A2z}(0.1m) = 2(1.25(75kg))(0.23m) + (5.88N)(0.23m) \\
 & R_{A2z} = \frac{2(1.25 \cdot (75kg))(0.23m) + (5.88N)(0.23m)}{2(0.1m)} \\
 & R_{A2z} = R_{B2z} = 222.38N
 \end{aligned}$$

Para un mejor análisis de la estructura del reposapiés se asume un corte por la mitad del tubo y se lo ubica con respecto a la vista lateral como se muestra en la Figura 18.

Figura 18

Diagrama del cuerpo libre del reposapiés, vista lateral.

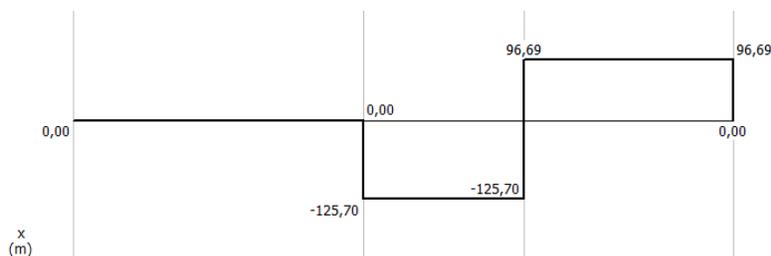


Nota. Vista lateral de las fuerzas y reacciones generadas sobre el reposapiés.

En la Figura 19 se muestra el diagrama de fuerza cortantes generado por el peso del cojín, la masa del usuario y las reacciones generadas.

Figura 19

Diagrama de fuerza cortante del reposapiés.

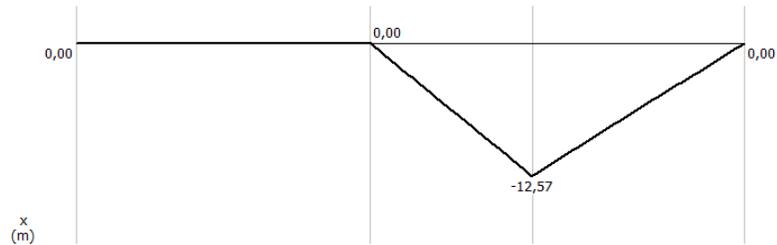


Nota. La fuerza cortante máxima es de 222.38N.

En la Figura 20 se muestra el diagrama de momentos flectores aplicados sobre la estructura del reposapiés, en donde se evidencia un momento crítico de 12.57 N.m en el punto C con respecto a la Figura 18.

Figura 20

Diagrama de momento flector del reposapiés.



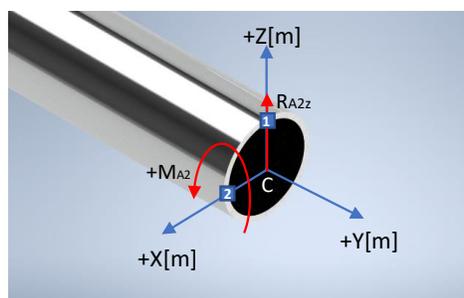
En la Figura 21, el momento flector máximo es de 12.57N.m. y se muestra un corte en el área de sección transversal del tubo de diámetro 18 mm y 0.5 mm de espesor para analizar los esfuerzos combinados que se generan por una carga cortante y momento flector en los puntos críticos y se obtiene los siguientes análisis:

- En el punto 1, se evidencia que el valor del esfuerzo cortante es cero, pero el esfuerzo flector es máximo.
- En el punto 2, se evidencia que el valor del esfuerzo cortante es máximo, pero el esfuerzo flector es cero. Además, en este punto el esfuerzo es menor que en el punto 1, por lo tanto, este análisis es despreciable.

Cálculo del esfuerzo de flexión con respecto al punto 1

Figura 21

Esfuerzo combinado en el punto C.



El módulo de sección transversal es:

$$S = \frac{\pi(D^4 - d^4)}{32D}$$

$$S = \frac{\pi((0.018m)^4 - (0.017m)^4)}{32(0.018m)}$$

$$S = 0.000000117m^3$$

Por consiguiente, se calcula el esfuerzo flector:

$$\sigma_y = \frac{Mc}{I} = \frac{M}{S}$$

$$\sigma_y = \frac{12.57N \cdot m}{0.000000117m^3}$$

$$\sigma_y = 107.43MPa$$

El punto 1 se encuentra ubicado en el extremo superior y se evidencia que el esfuerzo cortante es $\tau_{xz} = 0$.

$$\tau_{\max} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_y - \sigma_z}{2}\right)^2 + \tau_{xz}^2}$$

$$\tau_{\max} = \sqrt{\left(\frac{107.43MPa - 0}{2}\right)^2 + (0)^2}$$

$$\tau_{\max} = 53.71MPa$$

En el cálculo del factor de seguridad se usa la teoría del cortante máximo, puesto que es más conservador para materiales dúctiles bajo carga estática y se obtiene que el factor de seguridad mínimo es de $N = 2.32$ por lo cual, se concluye que no existe riesgo de rotura o falla del material.

$$N = \frac{0.5S_y}{\tau_{\max}}$$

$$N = \frac{0.5(250MPa)}{53.71MPa}$$

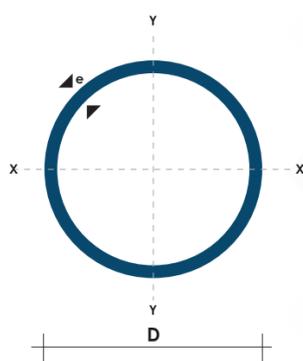
$$N = 2.32$$

Selección del material del bastidor

El acople que dispone la caja de transmisión de los motores tiene una abertura circular, es decir solo permite la sujeción para tubería redonda de diámetro de 1 in y en la Figura 22 se observa en el Anexo 2 del catálogo de Dipac, y se selecciona el tubo estructural redondo de diámetro 1 in y espesor de 2 mm en el material de acero negro NTE INEN 2415 para la construcción del bastidor, el cual es de ampliamente usado en el mercado y tiene buenas características mecánicas.

Figura 22

Tubo estructural redondo.



(D) Diámetro	Espesor	Peso	Área	I	W	i
Pulgadas	mm	Kg/m	cm ²	cm ⁴	cm ³	cm ³
7/8"	1.50	0.77	0.98	0.53	0.47	0.73
1"	1.50	0.88	1.13	0.81	0.64	0.85
1 1/4"	1.50	1.12	1.43	1.63	1.03	1.07
1 1/2"	1.50	1.35	1.72	2.89	1.52	1.30
1 3/4"	1.50	1.59	2.02	4.67	2.10	1.52
2"	1.50	1.82	2.32	7.06	2.78	1.74
2 1/2"	1.50	2.29	2.92	14.05	4.42	2.19
3"	1.50	2.76	3.52	24.56	6.45	2.64
1"	2.00	1.15	1.47	1.01	0.80	0.83
1 1/4"	2.00	1.47	1.87	2.08	1.31	1.05
1 1/2"	2.00	1.78	2.27	3.71	1.95	1.29
1 3/4"	2.00	2.09	2.67	6.02	2.71	1.50
2"	2.00	2.41	3.07	9.14	3.60	1.73
2 1/2"	2.00	3.03	3.86	18.29	5.76	2.18
3"	2.00	3.66	4.66	32.11	8.43	2.62
2"	3.00	3.54	4.51	12.92	5.09	1.69
2 1/2"	3.00	4.48	5.70	26.15	8.24	2.14
3"	3.00	5.42	6.90	46.29	12.15	2.59

Nota. Especificaciones físicas del tubo estructural redondo. Tomando de (Dipac, 2020).

Análisis de elementos finitos del bastidor

Al dimensionar los componentes de acuerdo con la normativa ISO 7176-5 y determinarse las fuerzas y reacciones generadas sobre la estructura del bastidor de acuerdo con los parámetros físicos del acero estructural ASTM A-36 descritos en la Tabla 6, se procede a validar las tensiones, desplazamientos críticos y factor de seguridad mediante software CAE.

Tabla 6

Parámetros del acero estructural ASTM A-36.

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Resistencia a la fluencia	S_y	250	MPa
Resistencia última	S_u	400	MPa
Módulo de elasticidad	E	200	GPa
Módulo de Rigidez	G	77.2	GPa
Razón de Poisson	ν	0.26	-

Nota. Características físicas y mecánicas del acero estructural ASTM A-36.

En la Figura 23 se observa que el límite elástico para el acero ASTM A-36 es de 250 MPa y el valor máximo de las tensiones de Von Mises sobre la estructura del bastidor es de 44.144 MPa, es decir, los esfuerzos generados no superan el límite elástico del material.

Figura 23

Simulación del AEF de las tensiones de Von Mises sobre el bastidor.

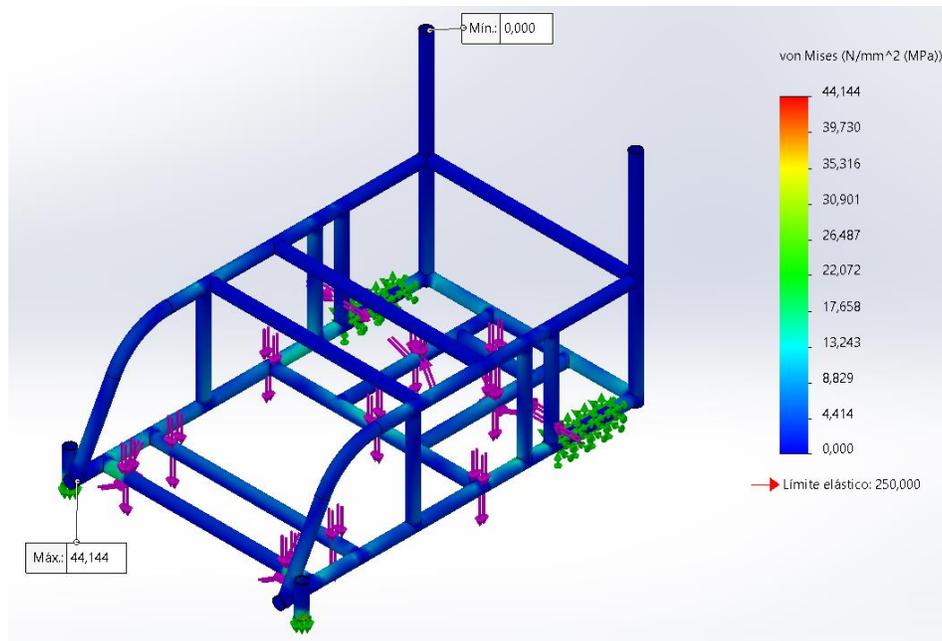


Figura 24

Simulación del AEF de la deformación máxima del bastidor.

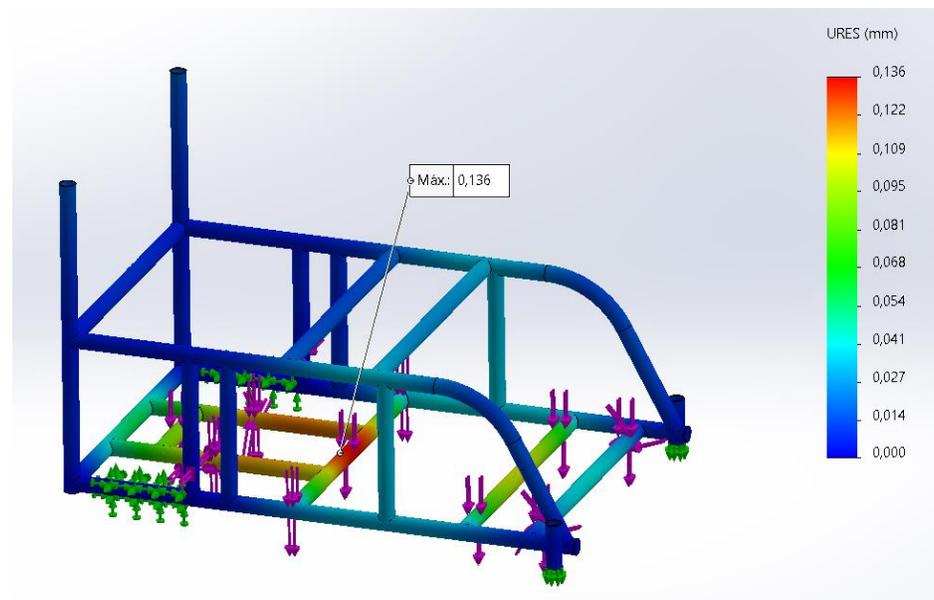
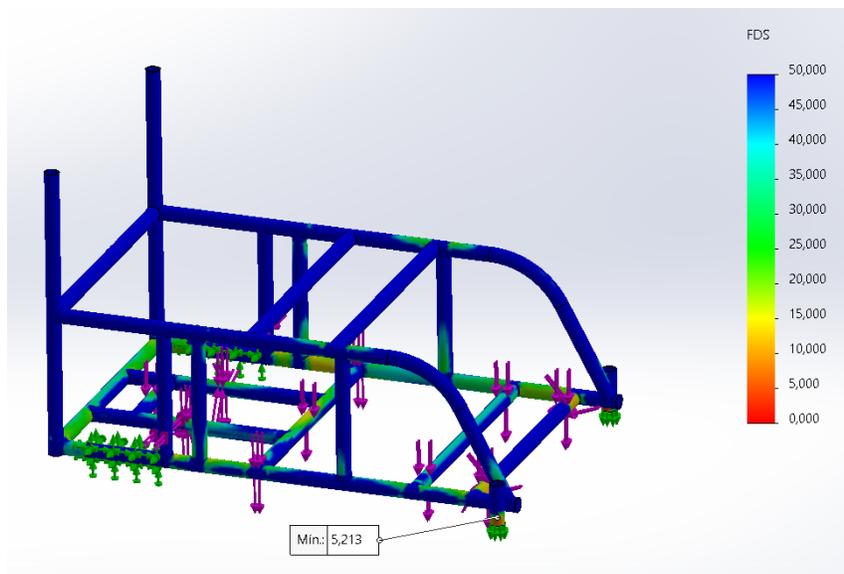


Figura 25

Simulación del AEF del factor de seguridad del bastidor.



Nota. El factor de seguridad mínimo es de 5.213 en la zona de los acoples de las llantas frontales.

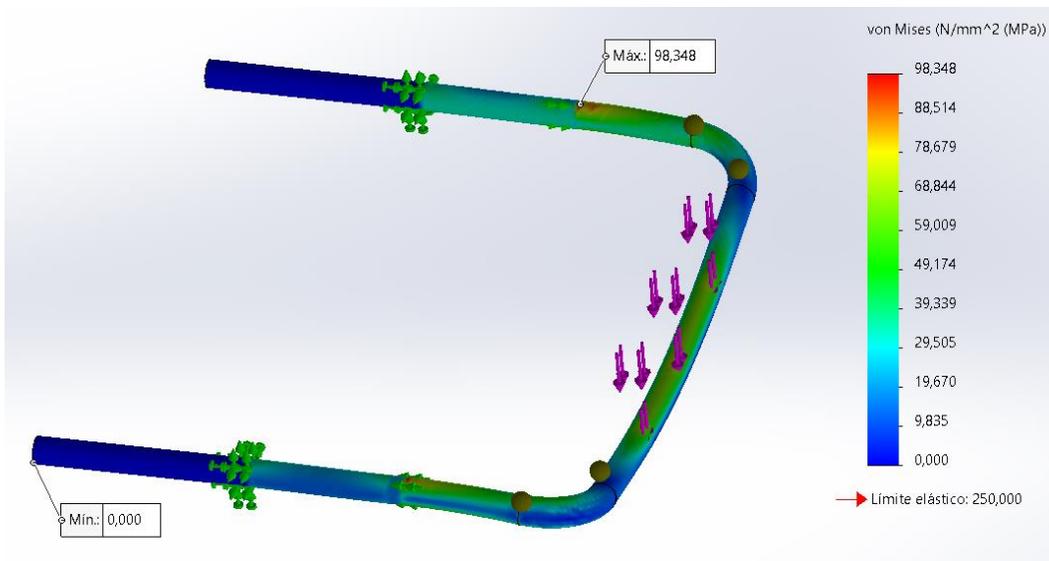
En la Figura 24 se evidencia que el valor máximo de deformación que presenta el bastidor es de 0.136 mm en la zona circundante al centro de masa y además el factor de seguridad mínimo requerido para equipos médicos es de 2 pero en la Figura 25 se evidencia un factor de seguridad mínimo de 5.213 en la zona del acople a las llantas frontales, por lo cual, se concluye que no existe riesgo de rotura o falla del material.

Análisis de elementos finitos de la estructura del reposapiés.

En la Figura 26 se observa que el límite elástico para el acero ASTM A-36 es de 250 MPa y el valor máximo de las tensiones de Von Mises sobre la estructura del bastidor es de 98.348 MPa, es decir, los esfuerzos generados no superan el límite elástico del material.

Figura 26

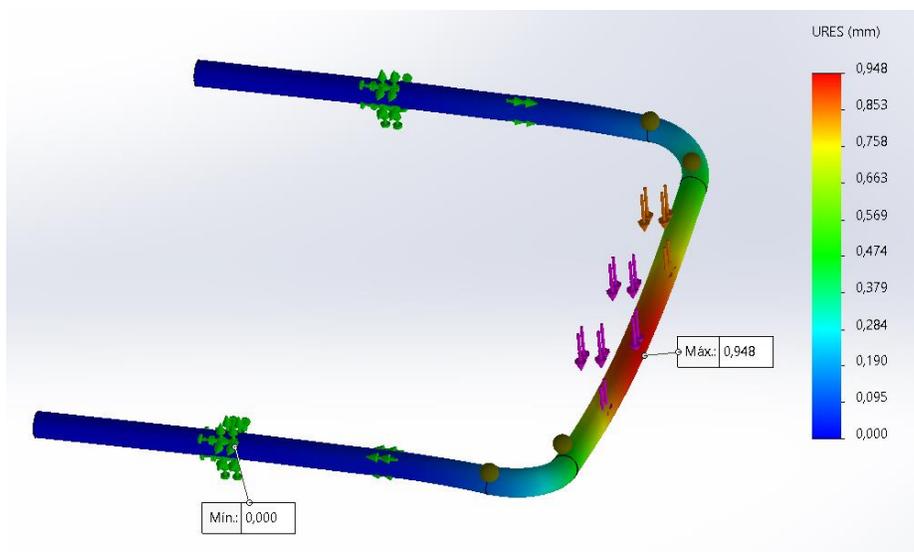
Simulación del AEF de las tensiones de Von Mises en el reposapiés.



Nota. El valor máximo de esfuerzo es de 98.348 MPa en la zona de los soportes.

Figura 27

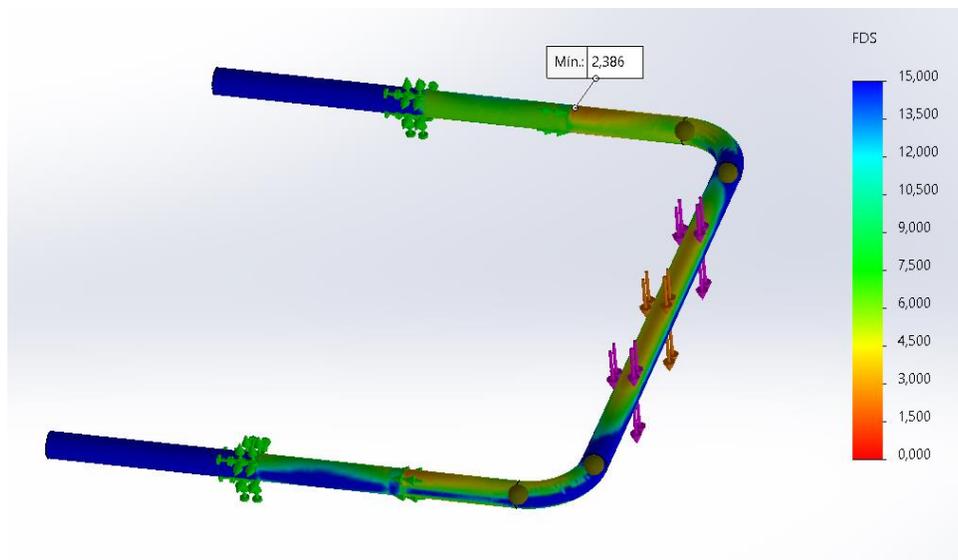
Simulación del AEF de la deformación máxima en el reposapiés.



Nota. La deformación máxima es de 0.948 mm en la zona central de la estructura.

Figura 28

Simulación del AEF del factor de seguridad en el reposapiés.



Nota. El factor de seguridad mínimo es de 2.386 en la zona de los soportes.

En la Figura 27 se evidencia que el valor máximo de deformación que presenta la estructura del reposapiés es de 0.948 mm en la zona central y además el factor de seguridad mínimo requerido para equipos médicos es de 2 pero en la Figura 28 se evidencia un factor de seguridad mínimo de 2.386 mientras que el calculado fue de 2.32 en la zona de los soportes, por lo cual, se concluye que no existe riesgo de rotura o falla del material.

Cálculo de la Fuerza de empuje

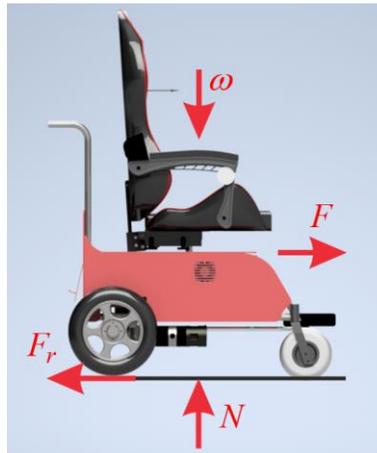
Para realizar el cálculo de las fuerzas necesarias para el movimiento de la silla se requiere conocer la masa del usuario, la cual es de 75 Kg, sin embargo, los cálculos se realizan para una masa de 100 Kg con lo que se asegura el diseño para dicho margen. La masa de la silla con todos sus componentes es de 82,8 Kg, por lo tanto, la masa total corresponde a 182,8 Kg.

Cálculo de fuerza requerida para una superficie plana

En la Figura 29 se visualiza el diagrama de cuerpo libre de la silla de ruedas en una superficie plana, en el que se debe determinar la fuerza mínima necesaria para vencer el rozamiento estático y movilizarse.

Figura 29

Diagrama de cuerpo libre del robot en un plano horizontal



En base al gráfico de la Figura 29, se identifican las siguientes fuerzas:

- ω : Peso total
- F : Fuerza de empuje
- F_r : Fuerza de fricción
- N : Normal

Los datos conocidos son la masa total, la gravedad y los coeficientes de fricción estática y dinámica de los neumáticos con el asfalto, los cuales se obtienen del informe realizado por (GoodYear, 2014)

$$m = 182.8Kg$$

$$g = 9.81 \frac{m}{s}$$

$$u_s = 0.8$$

$$u_k = 0.6$$

Condición estática. Se inicia el análisis aplicando las leyes fundamentales de la estática, por lo cual se realiza la sumatoria de fuerzas en el eje de las ordenadas y se obtiene la ecuación (3):

$$\begin{aligned} \sum F_y &= 0 \\ N - \omega &= 0 \\ N &= mg \end{aligned} \quad (3)$$

Aplicando la sumatoria de fuerzas en el eje de las abscisas y considerando que debe vencer la estática para iniciar el movimiento, es decir, la aceleración a es nula, se obtiene:

$$\begin{aligned} \sum F_x &= 0 \\ F - F_r &= 0 \\ F &= F_r \end{aligned} \quad (4)$$

La ecuación (4) se puede reescribir considerando que la fuerza de fricción estática se define como el producto de la fuerza normal N y el coeficiente de fricción estático μ_s , de forma que se obtiene la fuerza de empuje como se indica en (5):

$$F = \mu_s N \quad (5)$$

De la ecuación (5) se puede identificar que la fuerza de empuje para vencer la estática de una carga en un plano horizontal es directamente proporcional a la fuerza normal y al coeficiente de fricción estático. Reemplazando la ecuación (3) en la ecuación (5) y resolviendo se obtiene:

$$F = \mu_s mg$$

$$F = (0.8)(182.8Kg) \left(9.81 \frac{m}{s} \right)$$

$$F = 1434.61N$$

La fuerza de empuje requerida para vencer la estática es de 1434.61N .

Condición móvil. El análisis se realiza considerando que la silla ha vencido la estática y se encuentra en movimiento a velocidad constante.

La sumatoria de fuerza en el eje de las ordenadas se conserva:

$$\sum F_y = 0$$

$$N - \omega = 0$$

$$N = mg$$

La sumatoria de fuerza en el eje de las abscisas considera el valor del coeficiente de fricción dinámico y una aceleración nula, debido a que la velocidad de movimiento es constante:

$$\sum F_x = ma$$

$$F - F_r = 0$$

$$F = \mu_k N \tag{6}$$

De la ecuación (6) se puede observar que la fuerza de empuje necesaria para movilizar la silla a velocidad constante depende proporcionalmente del coeficiente de fricción dinámico μ_k y de la fuerza normal N . Reemplazando la ecuación (3) en (6) y resolviendo se obtiene:

$$F = \mu_k mg$$

$$F = (0.6)(182.8Kg) \left(9.81 \frac{m}{s} \right)$$

$$F = 1075.96N$$

La fuerza de empuje necesaria para trasladar la silla a velocidad constante es de 1075.96N .

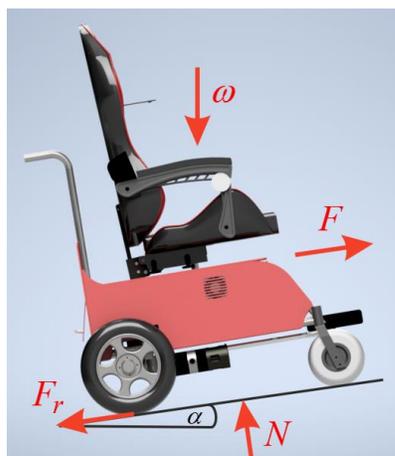
Analizando los resultados del estudio estático y móvil se concluye que es mayor la fuerza necesaria para romper la estática ($1434.61N$), que la fuerza necesaria para conservar un movimiento a velocidad constante ($1075.96N$), debido a que el coeficiente de fricción es mayor para vencer el estado de reposo e iniciar el movimiento que el que actúa cuando la silla está en movimiento.

Cálculo de fuerza requerida para una superficie inclinada ascendente

Para calcular la fuerza de empuje en el plano inclinado ascendente se visualiza en la Figura 30 el esquema de las fuerzas que intervienen. Cabe recalcar que con la normativa NTE INEN 2245 referente a la accesibilidad de las personas al medio físico, mención rampas, explica que la pendiente máxima para tramos de rampa es del 12%, lo que significa que el ángulo de inclinación de una rampa es de 6.84° . (INEN, 2016)

Figura 30

Diagrama de cuerpo libre del robot en un plano inclinado ascendente.



Condición estática. La silla de ruedas se encuentra en reposo, a punto de romper la inercia e iniciar el movimiento.

Realizando la sumatoria de fuerzas en el eje “y” se obtiene la ecuación (7):

$$\begin{aligned}\sum F_y &= 0 \\ N - \omega_y &= 0\end{aligned}$$

$$N = mg \cos(\alpha) \quad (7)$$

Aplicando la sumatoria de fuerzas en el eje "x" se obtiene la ecuación (8):

$$\begin{aligned}\sum F_x &= 0 \\ F - F_r - \omega_x &= 0\end{aligned}$$

$$F = F_r + \omega_x \quad (8)$$

Reescribiendo la ecuación (8) y reemplazando la fuerza normal de la ecuación (7) en ella se obtiene la ecuación (9):

$$F = \mu_s N + \omega \sin(\alpha)$$

$$F = \mu_s mg \cos(\alpha) + mg \sin(\alpha) \quad (9)$$

Analizando la ecuación (9) se concluye que la fuerza de empuje para vencer la estática de una carga en un plano inclinado depende de la fuerza de fricción y adicionalmente de la componente del peso en el eje "x".

Reemplazando las variables conocidas en la ecuación (9) se obtiene:

$$\begin{aligned}F &= (0.8)(182.8Kg) \left(9.81 \frac{m}{s} \right) \cos(6.84^\circ) + (182.8Kg) \left(9.81 \frac{m}{s} \right) \sin(6.84^\circ) \\ F &= 1637.98N\end{aligned}$$

La fuerza de empuje requerida para vencer la estática en un plano inclinado es de 1637.98N .

Condición móvil. Se realiza el análisis considerando que la silla se encuentra movilizándose a velocidad constante, por lo que se utiliza el coeficiente de fricción dinámica para el cálculo de la fuerza de empuje necesaria.

La sumatoria de fuerza en el eje de las ordenadas se conserva:

$$\begin{aligned}\sum F_y &= 0 \\ N - \omega_y &= 0 \\ N &= mg \cos(\alpha)\end{aligned}$$

Realizando la sumatoria de fuerzas en el eje de las abscisas y reemplazando el valor de la normal (7), se obtiene la ecuación (10):

$$\begin{aligned}\sum F_x &= 0 \\ F - F_r - \omega_x &= 0 \\ F &= F_r + \omega_x \\ F &= \mu_k N + mg \sin(\alpha) \\ F &= \mu_k mg \cos(\alpha) + mg \sin(\alpha)\end{aligned}\tag{10}$$

La fuerza de empuje para movilizar una carga lineal en un plano inclinado a velocidad constante resulta de la suma de la fuerza de fricción y la componente del peso en el eje “x”. Sustituyendo las variables se tiene:

$$\begin{aligned}F &= (0.6)(182.8Kg) \left(9.81 \frac{m}{s} \right) \cos(6.84^\circ) + (182.8Kg) \left(9.81 \frac{m}{s} \right) \sin(6.84^\circ) \\ F &= 1281.88N\end{aligned}$$

La fuerza de empuje necesaria para trasladar la silla a velocidad constante es de 1281.88N .

Cálculo de fuerza requerida para una superficie inclinada descendente

La Figura 31 indica las fuerzas que intervienen en el análisis estático de la silla de ruedas en un plano inclinado descendente.

Figura 31

Diagrama de cuerpo libre del robot en un plano inclinado descendente



Condición estática. El robot se encuentra en estado de reposo. Realizando la sumatoria de fuerzas en el eje “y” se obtiene nuevamente la siguiente ecuación (7).

$$\begin{aligned}\sum F_y &= 0 \\ N - \omega_y &= 0 \\ N &= mg \cos(\alpha)\end{aligned}\quad (7)$$

Aplicando la sumatoria de fuerzas en el eje “x” se obtiene la ecuación (11):

$$\begin{aligned}\sum F_x &= 0 \\ F - F_r + \omega_x &= 0 \\ F &= F_r - \omega_x\end{aligned}\quad (11)$$

Al reescribir la ecuación (11) y reemplazar la fuerza normal (7) en ella se obtiene la ecuación (12):

$$\begin{aligned}F &= \mu_s N - \omega \sin(\alpha) \\ F &= \mu_s mg \cos(\alpha) - mg \sin(\alpha)\end{aligned}\quad (12)$$

De (12) se puede concluir que, en un plano inclinado descendente, la fuerza de empuje mínima para vencer la estática resulta de la diferencia entre la fuerza de fricción y la componente del peso en el eje “x”.

Reemplazando todos los valores en (12) se obtiene:

$$F = (0.8)(182.8Kg)\left(9.81\frac{m}{s}\right)\cos(6.84^\circ) - (182.8Kg)\left(9.81\frac{m}{s}\right)\sin(6.84^\circ)$$

$$F = 1210.83N$$

La fuerza de empuje mínima para iniciar el movimiento en un plano inclinado descendente es de 1210.83N

Condición móvil. Ahora se determina la fuerza de empuje utilizando el coeficiente de fricción dinámica ya que la silla se encuentra en movimiento a velocidad constante.

La sumatoria de fuerza en el eje de las ordenadas se conserva:

$$\sum F_y = 0$$

$$N - \omega_y = 0$$

$$N = mg \cos(\alpha)$$

Realizando la sumatoria de fuerzas en el eje de las abscisas se obtiene la ecuación (13):

$$\sum F_x = 0$$

$$F - F_r + \omega_x = 0$$

$$F = F_r - \omega_x$$

$$F = \mu_k N - mg \sin(\alpha)$$

$$F = \mu_k mg \cos(\alpha) - mg \sin(\alpha) \quad (13)$$

La fuerza de empuje para trasladar una carga a velocidad constante en un plano inclinado descendente es similar al caso estático, sin embargo, la ecuación (13) utiliza el coeficiente de fricción dinámica, por lo tanto, se obtiene:

$$F = (0.6)(182.8Kg) \left(9.81 \frac{m}{s} \right) \cos(6.84^\circ) - (182.8Kg) \left(9.81 \frac{m}{s} \right) \sin(6.84^\circ)$$

$$F = 854.73N$$

La fuerza de empuje necesaria para trasladar la silla a velocidad constante es de 854.73N .

Una vez finalizado el cálculo de la fuerza de empuje para condiciones estáticas y móviles, los resultados se resumen en la Tabla 7.

Tabla 7

Resumen del cálculo de la fuerza de empuje

Descripción	Plano horizontal		Plano inclinado ascendente		Plano inclinado descendente	
	μ_s	μ_k	μ_s	μ_k	μ_s	μ_k
Fuerza de empuje	1434.61N	1075.96N	1637.98N	1281.88N	1210.83N	854.73N

Nota. Comparativa de las fuerzas de empuje necesarias para movilizar cargas lineales en diferentes planos.

La mayor fuerza de empuje requerida se experimenta al vencer la condición de estática en un plano inclinado ascendente (1637.98N). Este valor es importante para cálculos posteriores relacionados con el dimensionamiento de la potencia del motor ya que debe desarrollar dicha fuerza y permitir el movimiento continuo de la silla de ruedas.

Capítulo IV

Diseño Electrónico

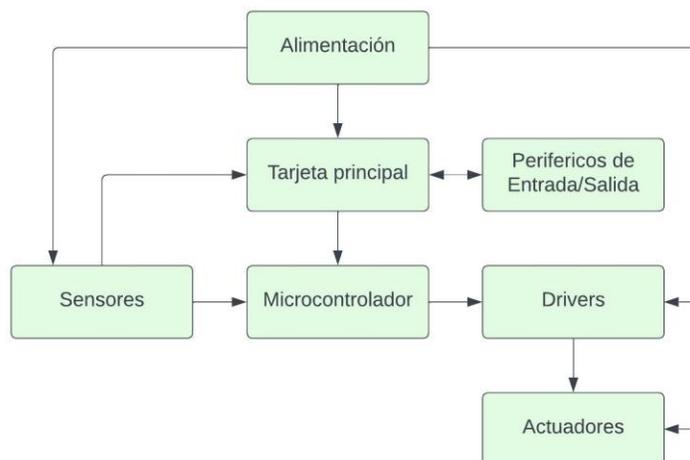
Para el diseño electrónico se consideran aspectos importantes en el apartado del circuito de control, como los requisitos de procesamiento de modelos de redes neuronales para la detección de palabras clave y la necesidad de implementar periféricos de entrada y salida elementales para el desarrollo de la interfaz del usuario. Se ha definido un sistema distribuido, de forma que el controlador de la silla de ruedas debe estar embebido en un microcontrolador que cumpla los requisitos de rendimiento, permita realizar tareas como ejecutar el algoritmo de control, adquirir señales de los sensores y actuar a favor de corregir el error de control; además debe implementar un sistema de comunicación que permita desarrollar el sistema distribuido, es decir, que permita adquirir la información obtenida por el dispositivo principal y utilizar dicha información para generar el movimiento de la silla de ruedas. El circuito de control también debe contemplar elementos que permitan acoplar las señales de potencia, como relés o drivers de motores.

En el apartado del circuito de potencia se debe seleccionar los elementos que proporcionan energía, tales como los motores que cumplan con los requisitos de potencia y velocidad, las baterías que energizan al robot o los drivers que permitan acoplar las señales de control al circuito de fuerza. Además, se consideran elementos para la señalización de movimiento y el sistema de ventilación de los dispositivos electrónicos.

La Figura 32 muestra la arquitectura del circuito de control y circuito de potencia.

Figura 32

Arquitectura del circuito de control y de potencia



Nota. El esquema del circuito distribuye el sistema de reconocimiento de voz en la tarjeta principal y el algoritmo de control en el microcontrolador.

Cálculo de la potencia del motor

Para dimensionar la potencia de un motor, es importante empezar definiendo la función que va a desempeñar, para este estudio, el conjunto de dos motores permitirá movilizar linealmente el peso de la silla de ruedas robótica, la cual contempla estructura, baterías, ruedas, silla ergonómica, motores, y demás elementos del equipo en conjunto con el peso de la persona que la utilizará.

Para definir la carga que deben movilizar los motores se determinó la masa de la silla de ruedas la cual es de 82.8 Kg, y se le añade la masa de una persona de 100 Kg, por tanto, la carga a movilizar es de 182.8 Kg.

Como se había determinado anteriormente, el valor de la fuerza mínima para la movilización de esta carga en un plano horizontal es de $1434.61N$; mientras que en un plano inclinado con 6.84° de elevación es de $1637.98N$. Para garantizar el funcionamiento de los

motores en todas las condiciones se utiliza $1637.98N$ como la carga crítica que se tiene que movilizar.

La potencia que deben desarrollar los motores en conjunto debe permitir movilizar la carga máxima sin problemas. El cálculo de la potencia mecánica requerida se realiza mediante la ecuación (14) que relaciona el trabajo w desarrollado en un tiempo t :

$$P = \frac{w}{t} \quad (14)$$

La ecuación (14) se puede reescribir considerando que el trabajo se realiza al aplicar una fuerza a un objeto y movilizarlo cierta distancia. De esta manera, la ecuación se describe en valores de fuerza, distancia y tiempo. Sabiendo que la velocidad es el resultado de dividir la distancia recorrida en un intervalo de tiempo, la ecuación se reescribe como indica (15):

$$P = \frac{Fd}{t}$$

$$P = Fv \quad (15)$$

Donde:

- P : Potencia mecánica $[W]$
- F : Fuerza $[N]$
- v : Velocidad $\left[\frac{m}{s}\right]$

De esta manera la ecuación para determinar la potencia mecánica que requieren los motores se define como el producto de la fuerza requerida para movilizarlo y la velocidad máxima a la que se desplazará.

Finalmente, se determina el valor de la potencia mecánica requerida para movilizar la silla de ruedas a la velocidad máxima de $0.3 \frac{m}{s}$, con una fuerza crítica de $1637.98N$, reemplazando los valores en (15).

$$P = (1637.98N) \left(0.3 \frac{m}{s} \right)$$

$$P = 491.39[W]$$

El valor de la potencia mecánica requerida es de $491.39[W]$. Este cálculo es de suma importancia para la selección de los motorreductores, ya que la potencia que suministren los dos motores debe superar al valor calculado. Con el dimensionamiento de la potencia de $491.39[W]$, se determina que cada motor debe suministrar la mitad de dicha cantidad, es decir, cada motor debe generar $245.7[W]$.

Cabe destacar que la velocidad a la que se moviliza la silla de ruedas no debe ser excesiva ya que transportará a una persona con tetraplejia, por lo cual no es necesario que se proporcione velocidades elevadas, en su lugar, es más importante anteponer la seguridad del usuario.

Selección de componentes

En este apartado se detallarán las opciones para cada elemento necesario en el circuito electrónico: tarjeta principal, microcontrolador, drivers, periféricos, etc. La selección de componentes permite evaluar las opciones disponibles, identificar características favorables, dimensionar las necesidades y elegir el componente cuyas prestaciones se ajusten de manera adecuada a los requisitos del sistema.

Circuito de control

Tarjeta principal. Es el dispositivo embebido que se encarga del procesamiento del modelo de inteligencia artificial para el reconocimiento de voz, además de incorporar periféricos de entrada/salida como el micrófono, que permite capturar el sonido para ser procesado; o los parlantes, que permiten retroalimentar al usuario, sobre el control de la silla, mediante el asistente de voz. La Tabla 8 muestra la selección de este componente.

Tabla 8

Selección de la tarjeta principal

	LattePanda 3	NVIDIA Jetson	Raspberry Pi 4
	Delta	Nano	Model B
Criterios de selección			
Precio	419 \$ (-)	250 \$ (-)	160 \$ (+)
Almacenamiento	64GB interno (0)	MicroSD (0)	MicroSD (0)
RAM	8 GB (+)	4 GB (-)	8 GB (+)
Velocidad de procesamiento	3.4GHz (+)	1,42 GHz (-)	1,5 Ghz (-)
Núcleos	2 (-)	4 (+)	4 (+)
Puertos USB	3 (-)	4 (+)	4 (+)
Tamaño	115 x 78 x 14 (-)	100 x 80 x 29 (-)	88 x 58 x 18,5 (+)
Disponibilidad	-	-	+
Suma (+)	2	2	6
Suma (-)	5	5	1

	Lattepanda 3	NVIDIA Jetson	Raspberry Pi 4
	Delta	Nano	Model B
Criterios de selección			
Suma (0)	1	1	1
Evaluación	-3	-3	5

Nota. Tomado de (LattePanda, 2023), (NVIDIA, 2023) y (Raspberry, 2023)

El dispositivo elegido es el miniordenador Raspberry PI 4 model B, ya que presenta las características más afines a los requisitos necesarios para el proyecto: alta memoria RAM, buen nivel de procesamiento ya que maneja 4 núcleos, 2 puertos del tipo USB 2.0 y 2 puertos USB de tipo USB 3.0, además cuenta con redes de comunicación que permiten interconectar dispositivos mediante UART, I2C, etc. Las dimensiones del dispositivo lo hacen un ordenador pequeño, lo que permite reducir el tamaño del circuito de control y optimizar espacio. Finalmente, el precio es accesible en comparación a los precios de las tarjetas similares. Por las características mencionadas anteriormente se elige este dispositivo como la tarjeta principal que se encargará de ejecutar el sistema de reconocimiento de voz. Para evidenciar más información del componente se puede revisar el Anexo 4.

Microcontrolador. Es el dispositivo embebido que permite ejecutar las instrucciones programadas internamente. Se encarga de leer las señales de entrada como sensores, y generar salidas hacia los actuadores. Entre las características principales para seleccionar un microcontrolador están: número de puertos de entradas analógicas y digitales, salidas digitales que incorporen modulación por ancho de pulso, sistemas de comunicación, frecuencia de trabajo, documentación disponible, velocidad de procesamiento, etc.

La Tabla 9 detalla las características de diferentes microcontroladores disponibles actualmente.

Tabla 9

Selección del microcontrolador

Criterios de selección	Arduino Uno	Raspberry Pi Pico	ESP32
			
Precio	14 \$ (+)	14 \$ (+)	20 \$
Procesador	8 bits (-)	32 bits (+)	32 bits (+)
Frecuencia PWM	980 Hz (-)	19,2 MHz (+)	40 MHz (+)
Frecuencia reloj	16 MHz (-)	133 MHz (0)	240 MHz (+)
Tamaño	80 x 55.1 x 24.9mm (-)	51 x 21 x 1 mm (+)	51 x 23 x 8 mm (0)
Comunicaciones	(+)	(+)	(+)
Documentación	(+)	(+)	(+)
Suma (+)	3	6	6
Suma (-)	4	0	1
Suma (0)	0	1	0
Evaluación	-1	6	5

Nota. Tomado de (Olujinmi, 2022)

La tarjeta que se ajusta a los requisitos del proyecto es la Raspberry Pi Pico, la cual incorpora un procesador que trabaja a 32 bits, lo que permite ejecutar operaciones con gran resolución, a una velocidad de procesamiento de 133 MHz. Dispone de 23 pines GPIO para

entrada y salida de dispositivos, la frecuencia de PWM permite eliminar el ruido que producen frecuencias bajas al trabajar con motores de corriente continua y dispone de protocolos de comunicación estándar. Es importante considerar que este dispositivo trabaja a un nivel lógico de 3.3V, por lo tanto, la electrónica que se utilice debe incorporar un transformador de nivel de tensión para conectar dispositivos de tensiones diferentes. Para evidenciar más información del componente se puede revisar el Anexo 5.

Circuito de potencia

Motorreductor. Los motores son las máquinas eléctricas encargadas de transformar energía eléctrica en energía mecánica de rotación. Permiten propulsar a las ruedas del robot lo que produce su movimiento. Las principales características de los motores eléctricos son la potencia mecánica, el voltaje y la corriente nominal, la relación de transmisión de la caja reductora, la velocidad máxima y el torque que genera. La Tabla 10 muestra la comparativa de diferentes motorreductores disponibles en el mercado.

Tabla 10

Selección del motorreductor

Criterios de selección	Motorreductor SCD2-030ABB	Motorreductor YL005	Motorreductor 80ZY163-24
			
Costo	350 \$ (-)	150 \$ (+)	170 \$ (0)
Voltaje	24V (+)	24V/36V (+)	24 V (+)
Amperaje	13 A (0)	2.5 A (+)	25 A (-)
Potencia	250 W (+)	250 W (+)	276 W (+)

Criterios de selección	Motorreductor SCD2-030ABB	Motorreductor YL005	Motorreductor 80ZY163-24
			
Torque	17 N.m (+)	3 N.m (-)	22 N.m (+)
Velocidad nominal	135 RPM (0)	160 RPM (-)	120 RPM (+)
Disponibilidad	(+)	(-)	(-)
Suma (+)	4	4	4
Suma (-)	1	3	2
Suma (0)	2	0	1
Evaluación	3	1	2

Nota. Tomado de (Direct Industry, 2023a), (Direct Industry, 2023b)

Los motores seleccionados son los de la serie SCD2-030 ABB, los cuales disponen de un buen torque y potencia, lo que permite movilizar la carga total del robot, considerando que en el cálculo de la potencia requerida se determinó un valor de $491.39[W]$, la suma de la potencia suministrada por ambos motores de $250[W]$ genera una potencia total de $500[W]$, con lo que se cumple los requisitos de potencia. Cabe destacar que dicha potencia se calculó para la masa de un paciente de 100 Kg, sin embargo, el peso de la persona para la cual se realiza el diseño tiene una masa de 75 Kg, por lo que existe un 33% de margen de confianza.

Adicionalmente el motor funciona con 24 VDC, tiene un tamaño adecuado para la estructura planteada e incorpora un freno electromecánico que permite detener el movimiento de forma independiente.

Un factor clave fue la disponibilidad local de los motores, ya que las otras dos opciones requieren procesos de importación.

Drivers. Son dispositivos que permiten acoplar las señales de control al circuito de potencia, es decir, permiten controlar un dispositivo de potencia mediante un microcontrolador. Ejecuta la tarea de interfaz de control entre el motor y el microcontrolador, ya que trabajan con niveles de corriente distintos. La Tabla 11 muestra la comparativa entre distintos drivers de motores para el proceso de selección.

Tabla 11

Selección de drivers.

Criterios de selección	VNH3SP30 	Cytron MDD20A 	BTS7960 
Costo	16 \$ (+)	35 \$ (-)	18 \$ (+)
Voltaje máximo	16 V (-)	30 V (+)	27 V (+)
Amperaje máximo	14 A (0)	20 A (+)	43 A (+)
Frecuencia PWM	20 KHz (+)	20 KHz (+)	25 KHz (+)
Canal doble	Si (+)	Si (+)	No (-)
Documentación	Si (+)	Si (+)	Si (+)
Disponibilidad	Si (+)	No (-)	Si (+)
Suma (+)	5	5	6
Suma (-)	1	2	1
Suma (0)	1	0	0
Evaluación	4	3	5

Nota. Tomado de (Novatronic, 2023), (Cytron, 2022) y (SanDoRobotics, 2022)

El driver seleccionado es el IBT7960 debido a que cumple con los requisitos del proyecto: maneja una corriente máxima de 43 amperios, permite una frecuencia PWM de hasta 25 KHz e incorpora disipadores para ayudar a la refrigeración del driver. Es importante mencionar que el dispositivo funciona para nivel lógico de 5V y de 3.3V, el cual corresponde al nivel de tensión digital que maneja la Raspberry Pi Pico. Para evidenciar más información del componente se puede revisar el Anexo 6.

Baterías. Las baterías son la fuente de energía eléctrica que incorpora el robot móvil. Existen diferentes tipos de baterías que se pueden implementar en el proyecto, sin embargo, los principales criterios de selección son la tensión, la corriente suministrada, autonomía, durabilidad y peso. La Tabla 12 detalla los criterios de selección de cada opción.

Tabla 12

Selección de baterías

Criterios de selección	Baterías Bosch S3 40Ah	Batería Pride Jazzy Select 35Ah	Batería Secca 24Ah FirstPower
			
Costo	70 \$ (+)	75 \$ (-)	70 \$ (+)
Voltaje	12V (+)	12V (+)	12V \$ (+)
Amperaje	40Ah (+)	35Ah (0)	24Ah (-)
Ciclos de vida (50% carga)	400 (+)	400 (+)	350 (-)
Peso	11.7 Kg (-)	10.5 Kg (0)	9.8 Kg (+)
Suma (+)	4	2	3

Criterios de selección	Baterías Bosch S3 40Ah	Batería Pride Jazzy Select 35Ah	Batería Seca 24Ah FirstPower
			
Suma (-)	1	1	2
Suma (0)	0	2	0
Evaluación	3	1	1

Nota. Tomado de (Bosch, 2022), (Clerk, 2023) y (AEC, 2022)

La batería seleccionada es la Bosch S3 con capacidad de 40Ah, la cual permite suministrar hasta un máximo de 30A por hora, por lo que la silla dispondrá de buena autonomía. Las baterías tienen un peso aceptable, las dimensiones son adecuadas para el diseño del chasis y el ciclo de vida, a una carga de alrededor del 50%, es de 400 ciclos, lo que resulta en larga vida útil. Se debe recalcar que el voltaje es de 12V, por tal motivo, el robot requiere dos baterías para conectarlas en serie y obtener 24V necesario para alimentación de los motores. Para evidenciar más información del componente se puede revisar el Anexo 7.

La alimentación del circuito de control también depende de la fuente de energía principal, por tal motivo se utiliza una fuente electrónica de conversión que integra un lazo cerrado, de forma que la salida de voltaje siempre será la misma regulada, aunque las baterías estén en descarga continua. Para mostrar el nivel de carga de las baterías se hace uso del indicador Fixitok, en la que muestra el nivel con un rango de 0 a 100%. Para evidenciar más información de los componentes se puede revisar los Anexo 8, Anexo 9 y Anexo 10.

Selección de periféricos

En este apartado se detalla la selección de los periféricos de entrada y salida de la tarjeta principal.

Micrófono. El micrófono es el dispositivo que permite captar las señales sonoras, convertirlas en señales eléctricas y enviarlas a la tarjeta principal para el análisis y clasificación de los comandos. La Tabla 13 muestra los criterios de selección del micrófono.

Tabla 13

Selección de micrófono

Criterios de selección	Logitech H390 micrófono USB	Razer Seiren Mini Mercury USB	Micrófono Havit GK55 Rgb USB
			
Costo	46 \$ (-)	65 \$ (-)	16 \$ (+)
Disponibilidad	Si (+)	Si (+)	Si (+)
Adaptabilidad al asiento	Fácil (+)	Difícil (-)	Fácil (+)
Conectividad	Si (+)	Si (+)	Si (+)
Suma (+)	3	2	4
Suma (-)	1	2	0
Suma (0)	0	0	0
Evaluación	2	0	4

Nota. Tomado de (Computron, 2022), (Bestcell, 2022), (Havit, 2022)

La opción adecuada es el micrófono Havit GK55 RGB, el cual se puede adaptar fácilmente a al asiento de la silla de ruedas, ya que dispone de flexibilidad para posicionar el micrófono y tiene conexión USB, característica importante que permite captar audio por medio de la tarjeta Raspberry Pi 4.

Parlantes. Los parlantes permiten darle un medio de comunicación a la silla de ruedas mediante la interacción de un asistente que actúa como interfaz entre el usuario y los comandos de movimiento del robot. En la Tabla 14 se observan las características tomadas en cuenta para la selección de estos componentes.

Tabla 14

Selección de parlantes

Criterios de selección	Parlante Genius SP-Q160	Parlante Nitron Yst-1046	Parlante Havit SK205
			
Costo	12 \$ (+)	21 \$ (-)	17 \$ (-)
Disponibilidad	Si (+)	Si (+)	Si (+)
Dimensiones	81x85x102mm (0)	65x63x95mm (+)	182x87x117mm (-)
Potencia	6W (+)	5W (+)	6W (+)
Suma (+)	3	3	2
Suma (-)	0	1	2
Suma (0)	1	0	0
Evaluación	3	2	0

Nota. Tomado de (Genius, 2023), (Kinetshop, 2023) y (Havit, 2023).

Los parlantes seleccionados para la reproducción de audio del asistente de voz son los parlantes Genius SP-Q160. Entre las características más relevantes de este equipo es el costo, la potencia de audio y sus reducidas dimensiones.

Acondicionamiento de sensores

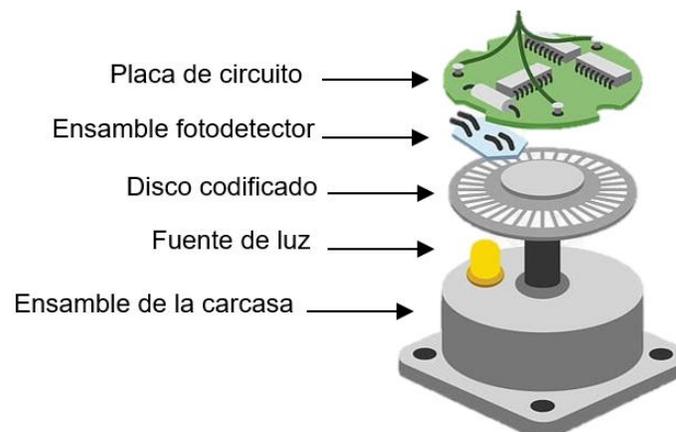
Para la localización del robot en el plano bidimensional se utilizan encoders incrementales en cada motor, los cuales permitirán estimar la velocidad de cada rueda y a su vez determinar la velocidad del robot, la cual se utiliza en el modelo cinemático planteado en el Capítulo IV para la estimación de la posición.

Encoders

Son sensores optoelectrónicos que consisten en un disco giratorio ranurado ubicado entre un arreglo de Leds emisores de luz y un conjunto de fotodetectores, como se observa en la Figura 33. En un primer caso, el diodo LED genera un haz de luz que atraviesa el disco, por medio de la ranura, y llega al receptor, generando un pulso lógico alto; mientras que el segundo caso se origina por el movimiento del disco giratorio, impidiendo al haz de luz atravesar la rendija y generando un pulso lógico bajo.

Figura 33

Partes principales de un encoder



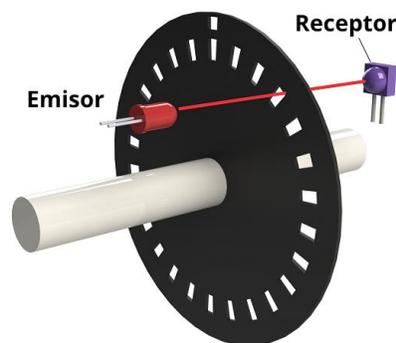
Nota. Tomado de (Encoder Products, 2023)

Dicho disco ranurado se acopla al eje motor, cuyo movimiento causa en la salida del encoder un tren de pulsos proporcional al ángulo de giro del rotor (encoder incremental), o una palabra codificada en formato binario (encoder absoluto); esta señal puede ser leída por un microcontrolador lo que permite determinar la posición, velocidad y dirección del robot. (Reyes et al., 2013)

Encoder incremental. Su función radica en interrumpir el haz de luz generado por los diodos LED, generando un tren de pulsos cuadrados, los mismo que representan proporcionalmente al ángulo girado. El movimiento del eje del motor, acoplado al encoder, genera las transiciones en la salida, cambiado de estado lógico alto a bajo en función de las interrupciones generadas al haz de luz por parte del disco ranurado, como se indica en la Figura 34. La acumulación de pulsos representa la variación del ángulo de giro y, considerando periodos de muestreo constantes, se puede determinar la velocidad angular del motor obteniendo la razón entre los pulsos contados y el tiempo de muestreo.

Figura 34

Encoder Incremental



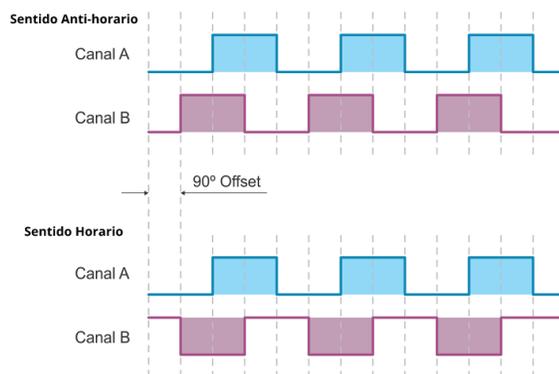
Nota. Tomado de (Hitecnologia, 2017)

Para determinar la dirección de giro el encoder cuenta con los canales A y B, los cuales se encuentran desfasados 90 grados, realizando una comparación simple del orden en

el que se generan los pulsos se puede determinar la dirección de rotación. La Figura 35 muestra las señales generadas por los canales del encoder para el sentido de giro horario y antihorario. En este proyecto se hace uso del encoder incremental LPD3806-360BM y para evidenciar más información del componente se puede revisar el Anexo 11.

Figura 35

Sentido de giro del encoder



Nota. Señales de encoder generadas por el canal A y el canal B para identificar el sentido horario y antihorario. Tomado de (Hitecnologia, 2017)

Sensor ultrasónico

Son sensores ampliamente utilizados ya que su sistema de medición es no invasivo, es decir, la medida se puede realizar sin ejercer ningún contacto. Este tipo de sensores se encuentran en vehículos que notifican al conductor la proximidad de un objeto al conducir en reversa. Este sensor se apoya en el efecto Doppler, ya que el elemento emisor genera una onda ultrasónica por encima de los 20KHz la cual es absorbida y reflejada por el objeto a medir. La atenuación de la onda es percibida por el receptor y realizando un cálculo con el tiempo que le toma percibir, es posible obtener la distancia al objeto. (Corona Ramírez et al., 2014)

Sensor HC-SR04. Es un tipo de sensor que trabaja con una señal ultrasónica de 40kHz que se emite por medio del transmisor, la cual viaja hasta rebotar en un objeto reenviando la

señal al receptor. Tomando el tiempo del traslado de la señal y la velocidad del sonido en el aire es posible determinar la distancia con gran precisión. (Corona Ramírez et al., 2014)

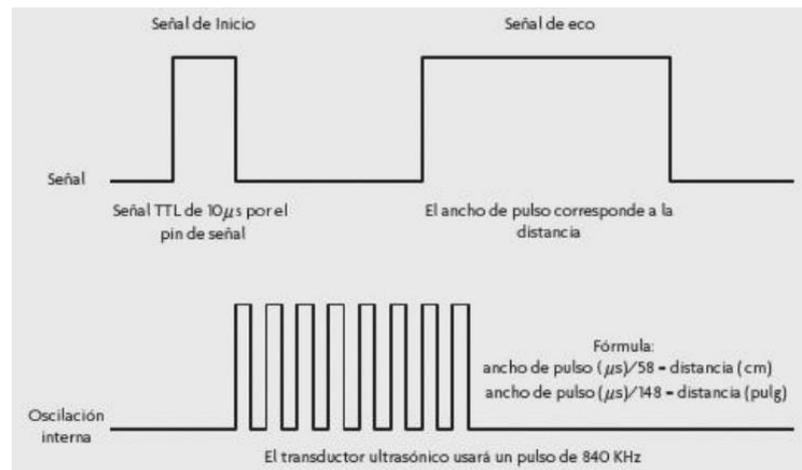
Los pines que componen el sensor son:

- **VCC:** pin de alimentación a 5V.
- **Trig:** pin activa un tren de pulsos a una frecuencia de 40kHz.
- **Echo:** señal de entrada que habilita la medición del sensor.

En la Figura 36 se puede observar el funcionamiento del sensor ultrasónico. Para evidenciar más información del componente se puede revisar el Anexo 12

Figura 36

Señales del sensor ultrasónico HC-SR04



Nota. Tomado de (Corona Ramírez et al., 2014)

Cálculo de la distancia. La distancia d se define como el producto de la velocidad v y el tiempo t .

$$d = vt$$

Considerando que la velocidad del sonido a través del aire es de $343 \frac{m}{s}$, entonces la distancia se define como se indica:

$$d = \left(343 \frac{m}{s} \right) t$$

Se debe considerar que dicha distancia corresponde a la total recorrida en un tiempo t , el cual transcurre desde el envío de la señal del emisor hacia el objeto y el regreso de la señal al receptor, por lo cual se toma la mitad de dicho trayecto, obteniendo la distancia emisor – objeto, como se indica en la ecuación (16):

$$d = \left(171.5 \frac{m}{s} \right) t \quad (16)$$

Si la distancia se mide en centímetros y el tiempo en microsegundos, la ecuación que permite determinar la distancia al objeto se define como indica (17):

$$d = \left(0.01715 \frac{cm}{us} \right) t \quad (17)$$

Acondicionamiento

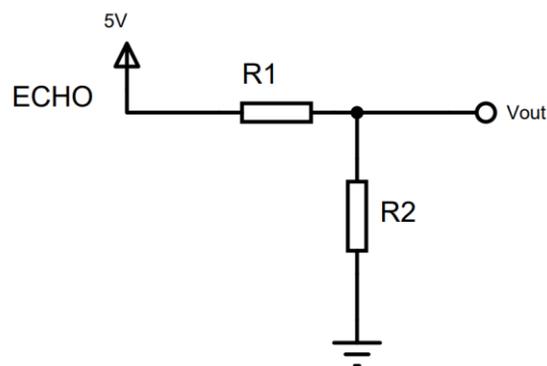
La silla de ruedas robótica cuenta con 3 sensores ultrasónicos HC-SR04, uno colocado en la parte posterior, cuya función es evitar choques al realizar un movimiento hacia atrás, un sensor en la parte lateral derecha y un sensor en la parte lateral izquierda, estos últimos permiten determinar si la silla robótica está próxima a un obstáculo o una pared de forma que dicha distancia indique al controlador del robot que su posición debe corregirse para evitar el choque.

Los sensores ultrasónicos se conectarán a la tarjeta principal para determinar cada distancia, esto debido a que el microcontrolador contiene el programa del lazo de control y el cálculo de cada distancia, que depende del tiempo de rebote de la señal, afecta directamente al periodo de muestreo, generando problemas en el controlador. Por el motivo mencionado, y aprovechando la potencia de cálculo de la tarjeta principal, se conectan dichos sensores a los puertos GPIO de la Raspberry Pi 4 model B.

El inconveniente que surge es la diferencia existente entre el voltaje de operación del sensor HC-SR04, el cual es de 5V; y el voltaje de operación de los puertos GPIO de la tarjeta principal, que es de 3.3V. Por tal motivo se desarrolla un circuito divisor de voltaje que permita recibir la señal ECHO de los sensores con un voltaje de 3.3V adecuado para los puertos de la tarjeta principal. El cálculo de las resistencias necesarias se realiza tomando el circuito de la Figura 37.

Figura 37

Circuito divisor de voltaje para pin Echo



Considerando una resistencia R_1 de $1k\Omega$, se determina la resistencia R_2 mediante la ecuación (17):

$$V_{out} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{in} \quad (18)$$

Reemplazando los valores se obtiene:

$$3.3V = \frac{R_2 [k\Omega]}{1[k\Omega] + R_2 [k\Omega]} (5V)$$

Simplificando unidades y despejando el valor de R_2 :

$$3.3(1 + R_2) = 5R_2$$

$$3.3 + 3.3R_2 = 5R_2$$

$$1.7R_2 = 3.3$$

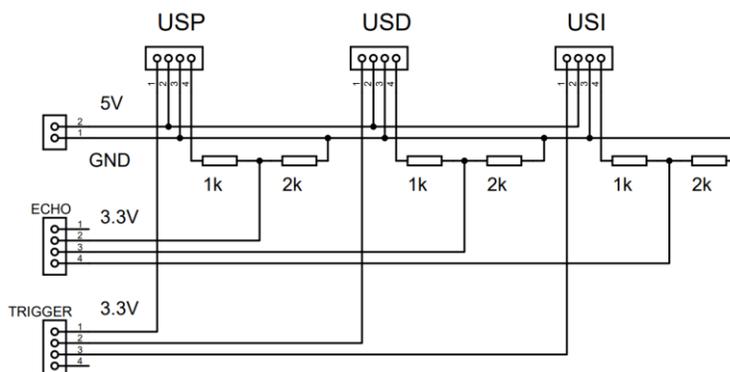
$$R_2 = 1.94k\Omega$$

Con el cálculo realizado se puede aproximar el valor de la resistencia calculada a una resistencia comercial, de forma que se selecciona una resistencia de $2k\Omega$.

La Figura 38 muestra el esquema del circuito de acondicionamiento de los tres sensores ultrasónicos para poder conectarlos a la tarjeta principal.

Figura 38

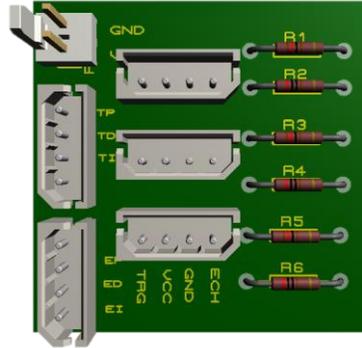
Circuito de acondicionamiento de los sensores ultrasónicos



La Figura 39 muestra la placa desarrollada para la conexión de los sensores y los divisores de voltaje que permiten acoplar la señal Echo a la tarjeta principal.

Figura 39

Placa de acondicionamiento de sensores ultrasónicos



Se debe tomar en cuenta que el sensor debe ser energizado con 5V para poder operar correctamente, voltaje que se obtiene de los pines 4 (5V) y 6 (GND) de la propia Raspberry Pi 4; y finalmente el pin TRIGGER puede activarse con una señal de 3.3V ya que su lógica digital de 5V toma como alto dicho valor.

Esquema del circuito eléctrico

El circuito electrónico se complementa con un regulador de alimentación en lazo cerrado LM2596, el cual permite regular el voltaje de las baterías que suministran 24VDC, a 5VDC con 3A de corriente máxima, lo que permite energizar la tarjeta principal. Al disponer de un circuito en lazo cerrado, la descarga de las baterías no altera el suministro de este regulador de voltaje, por lo que se puede asegurar una alimentación adecuada de la tarjeta principal.

Se utiliza componentes de potencia que trabajan a 12V y 24V, por lo que se acoplan las señales de control con 4 relés:

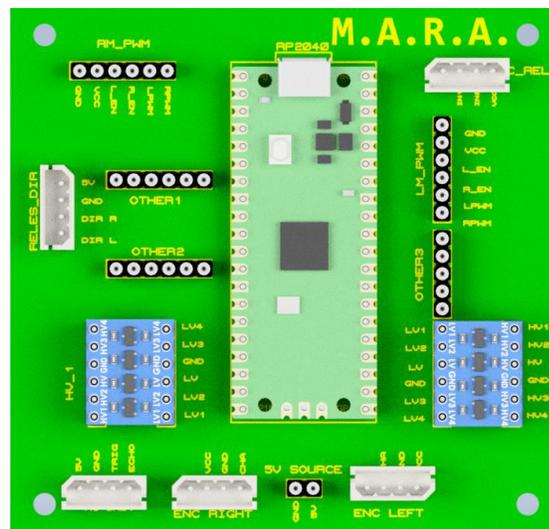
- El primero, encargado del acoplamiento y desacoplamiento de los electrofrenos que funcionan a 24V.
- El segundo, encargado del encendido y apagado de ventiladores, y luces azules posteriores que trabajan a 12V.

- El tercero, activa y desactiva la luz direccional derecha que funciona a 12V.
- El cuarto, activa y desactiva la luz direccional izquierda que funciona a 12V.

La placa del controlador consiste en la adecuación de conexiones de sensores y actuadores al microcontrolador Raspberry Pi Pico, mediante el acondicionamiento de señales digitales de entrada y salida de 5V a 3.3V mediante convertidores de nivel lógico bidireccional, los cuales se insertan en la placa. La Figura 40 muestra el diseño de la placa desarrollada para el microcontrolador.

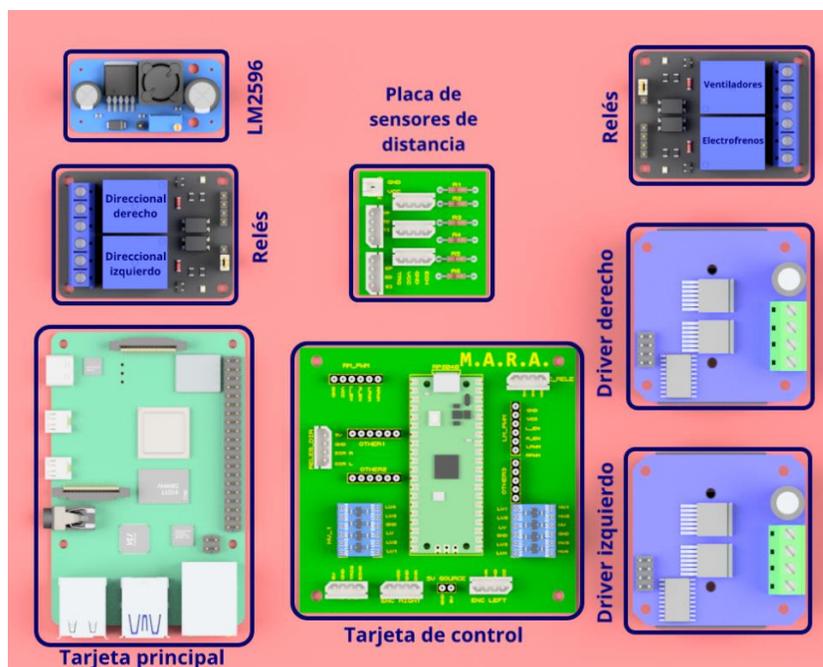
Figura 40

Placa de control del robot



Nota. Placa desarrollada para acondicionar las señales del microcontrolador Raspberry Pi Pico.

La Figura 41 muestra la disposición final del tablero electrónico que contempla fuente de alimentación y la tarjeta principal, placa de la tarjeta de control, drivers de los motores, tarjeta de acondicionamiento de señales de sensores ultrasónicos y módulos relés de activación de circuitos de electro frenos y luces direccionales.

Figura 41*CAD del tablero electrónico*

Nota. En el Anexo 13 se muestran los planos generados durante el diseño del circuito de control y potencia.

Capítulo V

Diseño del controlador

Modelamiento matemático de una plataforma móvil

La cinemática de robots comprende la configuración que tienen los robots en su espacio de trabajo, las relaciones entre su geometría y las restricciones que ésta le impone. Por ejemplo, un robot de base fija puede tener estructura cilíndrica, cartesiana, esférica, etc., lo que limita su movimiento a la configuración de sus articulaciones. Mientras que un robot móvil puede tener desde una a varias ruedas con o sin restricciones en su movimiento. El estudio y desarrollo de estructuras cinemáticas para robots sigue siendo un tema de investigación con la finalidad de crear sistemas que permitan ejecutar tareas más sofisticadas y complejas en varias aplicaciones tanto industriales como sociales. (Tzafestas, 2014)

Modelo geométrico

En la investigación de (Hernández et al., 2017) se explica a una plataforma móvil robótica como un dispositivo que se traslada en una superficie mediante motores que accionan las ruedas montadas en él. Para el propósito de modelación se asume lo siguiente:

- El robot móvil se mueve sobre una superficie plana horizontal, por lo que la energía potencial es constante.
- El robot móvil se traslada en una superficie plana horizontal, sin variación en su altura, por lo que la energía potencial gravitacional es constante.
- No existe deslizamiento entre las ruedas y la superficie, por lo que el contacto entre ellas se sintetiza a un punto.
- Ningún elemento del robot es flexible.

La Figura 42 muestra una silla de ruedas, a manera de plataforma móvil diferencial, que se traslada en el plano XY del sistema de referencia R . El centro del eje de las ruedas se

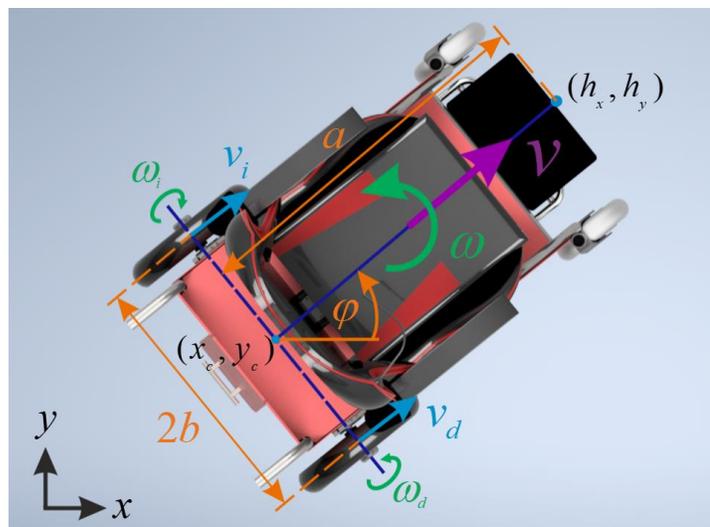
encuentra en el punto $\mathbf{c}(x_c, y_c)$ y a una distancia frontal a se ubica el punto de interés $\mathbf{h}(h_x, h_y)$. También se considera que el robot se encuentra desplazado un ángulo φ respecto a la horizontal y que se moviliza con una velocidad lineal v y una velocidad angular ω . El objetivo de la modelación del robot móvil es obtener la posición y orientación del punto de interés en función del desplazamiento y la rotación que experimenta respecto al sistema de referencia R .

Con las consideraciones anteriores se puede representar la posición y orientación \mathbf{h} del robot (19) en el punto de interés con el siguiente modelo geométrico:

$$\mathbf{h} = \begin{bmatrix} h_x \\ h_y \\ \varphi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_c + a \cos(\varphi) \\ y_c + a \sin(\varphi) \\ \varphi \end{bmatrix} \quad (19)$$

Figura 42

Representación gráfica del modelo geométrico del robot móvil diferencial



Del gráfico mostrado en la Figura 42 también se puede obtener la velocidad v_i como indica la ecuación (20) y la velocidad v_d como indica la ecuación (21), las cuales corresponden a las velocidades lineales de cada rueda:

$$v_d = v + b\omega \quad (20)$$

$$v_i = v - b\omega \quad (21)$$

Al sumar y restar las ecuaciones (20) y (21) se puede obtener la velocidad lineal (22) y angular (24) del robot en función de la velocidad lineal de las ruedas. Adicionalmente, estas velocidades se pueden desglosar en términos de las velocidades angulares de cada rueda como indican las ecuaciones (23) y (25). (Tzafestas, 2014)

$$v = \frac{v_d + v_i}{2} \quad (22)$$

$$v = r_w \frac{(\omega_d + \omega_i)}{2} \quad (23)$$

$$\omega = \frac{v_d - v_i}{2b} \quad (24)$$

$$\omega = r_w \frac{(\omega_d - \omega_i)}{2b} \quad (25)$$

Teniendo en cuenta que ω_d y ω_i son las velocidades angulares de las ruedas derecha e izquierda respectivamente; r_w el radio de la rueda y $2b$ corresponde a la distancia entre ambas ruedas.

Modelo cinemático

El modelado cinemático estudia el movimiento sin considerar las fuerzas que intervienen para generar dicho movimiento. Para el robot móvil tipo diferencial, el modelo tiene la finalidad de representar las velocidades del robot en función de las velocidades de las ruedas en conjunto con los parámetros geométricos del robot (Dhaouadi & Abu, 2013). Por lo que se

determinar dicho modelo a partir de derivar \mathbf{h} , del modelo geométrico (19), respecto al tiempo y obtener el modelo cinemático (26) que hacen referencia a $\dot{\mathbf{h}}$:

$$\dot{\mathbf{h}} = \begin{bmatrix} \dot{h}_x \\ \dot{h}_y \\ \dot{\varphi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{x}_c - a \sin(\varphi) \dot{\varphi} \\ \dot{y}_c + a \cos(\varphi) \dot{\varphi} \\ \dot{\varphi} \end{bmatrix} \quad (26)$$

Considerando que el robot se mueve con una velocidad lineal $v \left[\frac{m}{s} \right]$ y una velocidad angular $\omega \left[\frac{rad}{s} \right]$ como se muestra en el esquema de la Figura 42, las variables \dot{x}_c , \dot{y}_c y $\dot{\varphi}$ de la ecuación (26) se pueden reescribir como se indica en (27); y ordenando términos se obtiene (28) que representa el modelo cinemático en forma matricial.

$$\dot{\mathbf{h}} = \begin{bmatrix} \dot{h}_x \\ \dot{h}_y \\ \dot{\varphi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v \cos(\varphi) - a \sin(\varphi) \omega \\ v \sin(\varphi) + a \cos(\varphi) \omega \\ \omega \end{bmatrix} \quad (27)$$

$$\dot{\mathbf{h}} = \begin{bmatrix} \dot{h}_x \\ \dot{h}_y \\ \dot{\varphi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\varphi) & -a \sin(\varphi) \\ \sin(\varphi) & a \cos(\varphi) \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} \quad (28)$$

Finalmente se puede escribir el modelo cinemático de forma compacta como se indica en (29).

$$\dot{\mathbf{h}}(\mathbf{t}) = \mathbf{J}(\varphi) \mathbf{v}(\mathbf{t}) \quad (29)$$

En donde cada elemento representa:

- $\dot{\mathbf{h}}(\mathbf{t})$: El vector de velocidades lineales y angular del punto de interés.
- $\mathbf{J}(\varphi)$: La matriz jacobiana del robot.
- $\mathbf{v}(\mathbf{t})$: Las velocidades lineal y angular del robot móvil diferencial.

La matriz jacobiana representa la relación del desplazamiento de las articulaciones, en este caso las velocidades lineal y angular, con el desplazamiento de la posición del robot en el espacio de trabajo.

Diseño del controlador

(Tzafestas, 2014) detalla que el control de robots se encarga de determinar las acciones de control que los actuadores deben desarrollar para que el robot se desplace a la posición deseada o realice alguna tarea específica con cierto requisito de rendimiento. Estos requisitos se refieren al periodo transitorio, es decir, el desempeño del robot durante la corrección del error de control y al periodo de estado estable, cuando el robot ha logrado llegar al objetivo con un error de control que tiende a cero. En ambientes estructurados, como una fábrica, un robot puede desempeñarse mejor al conocer el entorno al que está expuesto, ya que éste se puede organizar para optimizar el funcionamiento del robot, en este caso un control basado en modelos es muy eficiente. Por el contrario, robots que se exponen a ambientes inciertos y variables requieren algoritmos de control más sofisticados.

El control de velocidad consiste en que las articulaciones se mueven simultáneamente a diferentes velocidades, de modo que se obtiene un movimiento deseado en el espacio cartesiano. Para desarrollar una ley de control basada en el modelo cinemático del robot móvil tipo diferencial, se parte de la necesidad de un punto deseado \mathbf{h}_d , al cual el robot se debe desplazar. El objetivo de control es aplicar velocidades al robot que permitan alcanzar una posición deseada, es decir, el controlador debe determinar las velocidades a las que se debe desplazar el robot para llegar al destino propuesto. Para este objetivo, se resuelve el sistema planteado en (29) para $\mathbf{v}(\mathbf{t})$, con la finalidad de determinar las velocidades referencia. Este vector de acciones de control se denomina $\mathbf{u}(\mathbf{t})$ y se muestra en la ecuación (30).

$$\mathbf{u}(\mathbf{t}) = \mathbf{J}^{-1}(\boldsymbol{\varphi})\dot{\mathbf{h}}_d(\mathbf{t}) \quad (30)$$

Analizando la ley de control propuesta en (30) se determina la velocidad lineal ν y la velocidad angular ω en función de la jacobiana inversa del robot y las velocidades del punto de control deseadas. Se debe considerar que este controlador se basa en el error $\tilde{\mathbf{h}}(\mathbf{t})$, que es la diferencia entre la posición de referencia y la posición actual. El peso de cada error de control para determinar la acción de control se regula mediante una matriz cuadrada de ganancia \mathbf{W} . La nueva ley de control se describe en la ecuación (31), la cual se conoce como controlador de seguimiento.

Controlador de seguimiento

Este controlador contempla el término $\dot{\mathbf{h}}_d(\mathbf{t})$, el cual es diferente de cero, esto quiere decir que la derivada de la referencia existe y no es nula, por lo que el Set Point varía con el tiempo. En otras palabras, el controlador permitirá ejecutar una tarea de seguimiento a la referencia, ya que ésta va cambiando con el tiempo. El término $\dot{\mathbf{h}}_d(\mathbf{t})$ consiste en la variación necesaria en el controlador para dar seguimiento al Set Point, y puede ser variable, en cuyo caso el controlador depende del tiempo, denominado controlador de seguimiento de trayectoria; o ser constante, donde deja de lado la dependencia del tiempo y pasa a denominarse controlador de camino. Este tipo de controladores se catalogan dentro del grupo de controladores de alto nivel ya que se calcula o planifica un perfil a seguir como referencia del robot. Este controlador se utilizará para la planificación de trayectoria en los movimientos hacia el frente y hacia atrás, de forma que se dé seguimiento a una trayectoria recta.

$$\mathbf{u}(\mathbf{t}) = \mathbf{J}^{-1}(\boldsymbol{\varphi})\left(\dot{\mathbf{h}}_d(\mathbf{t}) + \mathbf{W}\tilde{\mathbf{h}}(\mathbf{t})\right) \quad (31)$$

Con $\tilde{\mathbf{h}}(\mathbf{t}) = \mathbf{h}_d - \mathbf{h}(\mathbf{t})$.

Control de regulación

Para el control de posición cartesiana y los giros en el propio eje, el tipo de controlador a utilizarse es de regulación, por lo que no existe variación del punto deseado a través de tiempo y en consecuencia $\dot{\mathbf{h}}_d(\mathbf{t}) = 0$, de forma que la ecuación (31) se puede reescribir como se muestra en (32):

$$\mathbf{u}(\mathbf{t}) = \mathbf{J}^{-1}(\boldsymbol{\varphi})\mathbf{W}\tilde{\mathbf{h}}(\mathbf{t}) \quad (32)$$

De esta forma se determina la ley de control para regulación de posición, desde un punto inicial a un punto deseado en el plano cartesiano. Este tipo de controlador se encuentra dentro de la categoría de controladores de medio nivel.

Este controlador se basa en el comportamiento inverso de la planta, es decir, parte del modelo cinemático del robot, pero en este caso se despejan las velocidades del robot para determinarlas en función del error existente entre el valor deseado y el valor actual.

Controlador de bajo nivel

El controlador cinemático proporciona los valores de velocidad lineal y velocidad angular como acciones de control que deben ingresar al proceso para corregir el error de control determinado por la diferencia existente entre la posición actual y la posición deseada.

Dichas variables de control hacen referencia a las velocidades a las cuales se debe desplazar el robot, por lo tanto, se debe determinar las velocidades que cada rueda debe proporcionar para lograr dicho objetivo. Para calcular la velocidad de cada rueda a partir de la velocidad lineal y angular del robot, se resuelve el sistema de dos ecuaciones con dos incógnitas que se presenta en las ecuaciones (22) y (24), considerando que, las variables conocidas son la velocidad lineal v y angular ω , las cuales son proporcionadas por el controlador, mientras que el valor de las velocidades de la rueda derecha v_R e izquierda v_L , son variables desconocidas. La solución del sistema de ecuaciones se presenta en (33), que

corresponde a la velocidad angular de la rueda derecha, y (34), que corresponde a la velocidad angular de la rueda izquierda.

$$\omega_d = \frac{2v + \omega b}{2r} \quad (33)$$

$$\omega_i = \frac{2v - \omega b}{2r} \quad (34)$$

De esta forma se obtiene el valor de velocidad angular que cada rueda debe experimentar para corregir el error del controlador de medio nivel. Se debe tomar en cuenta que el motor, al ser el elemento acoplado a la rueda, es el encargado de accionar a la velocidad determinada por el controlador cinemático, por lo que el motor debe implementar un controlador de bajo nivel que le permita compensar perturbaciones de peso y seguir a las velocidades deseadas.

PID discreto

Implementar un controlador PID en cada rueda tiene varias alternativas, al igual que métodos de sintonización. Para nuestro propósito, se evaluará el desempeño de un controlador PID discreto, ya que estará embebido en un microcontrolador cuyo funcionamiento es digital.

El controlador PID se basa en el error, el cual es la diferencia entre el valor referencial y el valor actual; y los términos del controlador actúan de la siguiente forma:

- **Término proporcional:** actúa de forma proporcional al error actual, es decir, si existe un error grande, la acción de control será resultado de dicho error por el factor de ganancia K_p
- **Término integral:** considera valores de error pasados y los integra en el tiempo para eliminar el error en estado estacionario.

- **Término derivativo:** predice el comportamiento del error mediante la proyección de la tangente del punto actual del error. Reduce el comportamiento fluctuante del controlador.

En la literatura se describe a la ley de control PID en modo continuo mediante la ecuación (35):

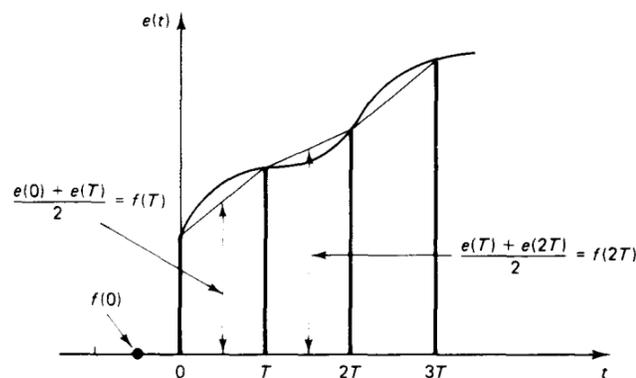
$$u(t) = k_p \left[e(t) + \frac{1}{t_i} \int_0^t e(t) dt + t_d \frac{d}{dt} e(t) \right] \quad (35)$$

Pero en el caso de implementación en un sistema digital, el controlador debe considerar el periodo de muestreo, aproximaciones al término integral y al término derivativo; además de ecuaciones en diferencias.

Aproximación al término integral. Se utiliza el método de integración trapezoidal, ya que proporciona aproximaciones más ajustadas que la integración rectangular. Considerando el gráfico de la Figura 43, se puede aplicar la ecuación (36) correspondiente al área de un trapecio, para aproximar el área bajo la curva en un periodo de muestreo T_s .

Figura 43

Método de integración trapezoidal



Nota. Tomado de (Kuo, 1996)

$$A = \left[\frac{e(k) + e(k-1)}{2} \right] T_s \quad (36)$$

Para calcular el área total bajo la curva se realiza la sumatoria del área de cada trapecio determinado, por lo que la aproximación a la integral se expresa como indica la ecuación (37):

$$\int e(t) dt = \sum_{h=0}^k \left[\frac{e(h) + e(h-1)}{2} \right] T_s \quad (37)$$

Aproximación al término derivativo. Se utiliza la diferencia de puntos, que consiste en determinar la pendiente generada por el error actual y el error en un periodo de muestreo anterior entre un instante de muestreo, obteniendo la ecuación (38).

$$\frac{d}{dt} e(t) = \frac{e(k) - e(k-1)}{T_s} \quad (38)$$

Con las aproximaciones anteriores se reescribe la ecuación (35) del PID de forma discretizada para un instante de muestreo k , obteniendo la ecuación (39):

$$u(k) = k_p \left[e(k) + \frac{T_s}{2t_i} \sum_{h=0}^k [e(h) + e(h-1)] + \frac{t_d}{T_s} [e(k) - e(k-1)] \right] \quad (39)$$

Aplicando el instante de muestreo $k-1$ se obtiene la ecuación (40):

$$u(k-1) = k_p \left[e(k-1) + \frac{T_s}{2t_i} \sum_{h=0}^k [e(h-1) + e(h-2)] + \frac{t_d}{T_s} [e(k-1) - e(k-2)] \right] \quad (40)$$

Restando las ecuaciones (39) y (40) se obtiene la ecuación en diferencias (41):

$$u(k) - u(k-1) = k_p \left[e(k) - e(k-1) + \frac{T_s}{2t_i} \sum_{h=0}^k [e(h) - e(h-2)] + \frac{t_d}{T_s} [e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)] \right] \quad (41)$$

De la ecuación (41), se analiza el término integral, y se evalúa la sumatoria para 4 valores con el objetivo de identificar la convergencia, de la siguiente forma:

$$\sum_{h=0}^4 [e(h) - e(h-2)] = e(0) - e(-2) + e(1) - e(-1) + e(2) - e(0) + e(3) - e(1) + e(4) - e(2)$$

Teniendo en cuenta que los errores con tiempo de muestreo negativos son nulos, se puede observar que todos los términos se cancelan, excepto los errores en el tiempo de muestreo 3 y 4.

$$\sum_{h=0}^4 [e(h) - e(h-2)] = e(4) + e(3)$$

Por lo que se identifica que la sumatoria en k iteraciones converge en la suma de los errores en los tiempos de muestreo k y $k-1$, como se observa en la ecuación (42):

$$\sum_{h=0}^k [e(h) - e(h-2)] = e(k) + e(k-1) \quad (42)$$

Reemplazando (42) en (41) se obtiene la ecuación (43):

$$u(k) - u(k-1) = k_p \left[e(k) - e(k-1) + \frac{T_s}{2t_i} [e(k) + e(k-1)] + \frac{t_d}{T_s} [e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)] \right] \quad (43)$$

Agrupando términos se reescribe la ecuación como se muestra en (44):

$$u(k) - u(k-1) = k_p \left[\left(1 + \frac{T_s}{2t_i} + \frac{t_d}{T_s} \right) e(k) - \left(1 - \frac{T_s}{2t_i} + \frac{2t_d}{T_s} \right) e(k-1) + \left(\frac{t_d}{T_s} \right) e(k-2) \right] \quad (44)$$

Donde:

- $u(k)$: acción de control en el periodo de muestreo actual

- $u(k-1)$: acción de control en el periodo de muestreo anterior
- $e(k)$: error en el instante de muestreo actual.
- $e(k-1)$: error en el periodo de muestreo anterior.
- $e(k-2)$: error en dos periodos de muestreo anteriores.
- T_s : tiempo de muestreo.

Finalmente, la ecuación se compacta en (45):

$$u(k) = u(k-1) + q_0 e(k) + q_1 e(k-1) + q_2 e(k-2) \quad (45)$$

Con las constantes (46), (47) y (48):

$$q_0 = k_p \left(1 + \frac{T_s}{2t_i} + \frac{t_d}{T_s} \right) \quad (46)$$

$$q_1 = -k_p \left(1 - \frac{T_s}{2t_i} + \frac{2t_d}{T_s} \right) \quad (47)$$

$$q_2 = k_p \left(\frac{t_d}{T_s} \right) \quad (48)$$

Aplicando la transformada Z a la ecuación (45) se obtiene la función de transferencia discretizada:

$$U(z) = U(z)z^{-1} + q_0 E(z) + q_1 E(z)z^{-1} + q_2 E(z)z^{-2}$$

$$\frac{U(z)}{E(z)} = \frac{q_0 + q_1 z^{-1} + q_2 z^{-2}}{1 - z^{-1}}$$

Implementación del PID discreto

Para implementar este tipo de controladores existen dos métodos.

Sintonización en lazo cerrado. Consiste en implementar un controlador proporcional, con los términos integral y derivativo iguales a cero, e ir aumentando la ganancia experimentalmente hasta conseguir una respuesta oscilatoria con amplitud constante. El valor de ganancia a la cual se obtiene dichas oscilaciones se denomina ganancia crítica, y a partir del gráfico se determina el periodo crítico. Con estos datos se sintonizan las constantes mediante tablas.

Sintonización en lazo abierto. Consiste en aplicar una entrada escalón a la planta para generar una salida, ésta debe ser de tipo sigmoïdal para poder aplicar el criterio de sintonización. Con la curva de salida se caracteriza la planta mediante la estimación de la función de transferencia, calculando los parámetros de ganancia del proceso, la constante de tiempo y el retardo. Con estos valores se sintoniza las constantes del controlador en base a tablas. Este método será el utilizado para diseñar el controlador de bajo nivel.

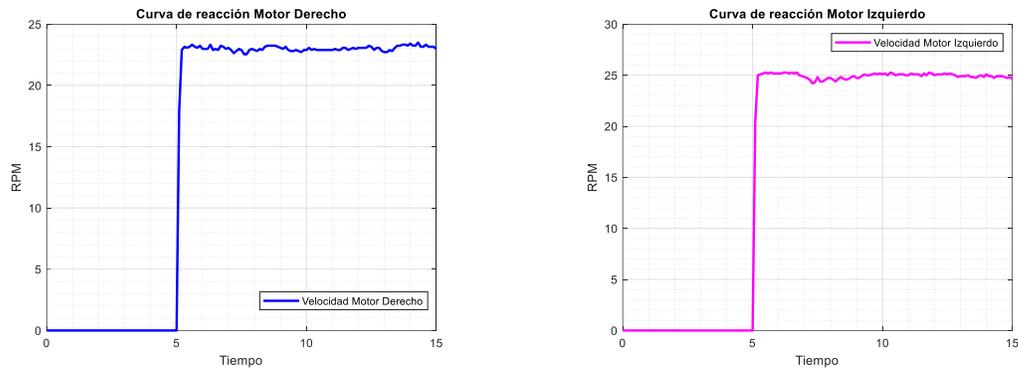
Función de transferencia. Permite caracterizar la planta, mediante la estimación de la función de transferencia de primer orden de los motores, la cual tiene la estructura de la ecuación (49):

$$G(s) = \frac{K}{\tau s + 1} e^{-Ls} \quad (49)$$

Para dicho objetivo se utiliza el método de la curva de reacción, que consiste en inyectar un valor de entrada escalón a la planta para excitarla hasta llegar al estado estable, con lo que se puede determinar experimentalmente el valor de la constante de tiempo τ , la ganancia del proceso K y el retardo L . En la Figura 44 se visualiza la curva de reacción del motor derecho y del motor izquierdo, ambas salidas para un valor de entrada correspondiente al 25% del PWM.

Figura 44

Curva de reacción del motor derecho e izquierdo



En el software Matlab, el comando "systemIdentification" permite estimar la función de transferencia de primer orden con retardo, mediante la importación de datos en el dominio del tiempo. En la Figura 45 se observan los argumentos necesarios para la estimación:

- **Input:** Vector de entradas a la planta, bits de PWM inyectados al motor.
- **Output:** Vector de salidas de la planta, Rpm censadas del motor.
- **Starting time:** Tiempo de inicio de la prueba.
- **Sample time:** Periodo de muestreo de la prueba.

Figura 45

Importación de datos para estimación de función de transferencia

Una vez importados los valores se calcula la función de transferencia de cada motor mediante la opción 'Process Models' en la que se elige la función de transferencia con retardo.

Matlab calcula los parámetros de la función de transferencia, sin embargo, se debe tener en cuenta que, para controladores digitales, el tiempo de retardo L es igual a la suma del valor calculado más la mitad del tiempo de muestreo, como indica la ecuación (50).

$$L' = L + \frac{T_s}{2} \quad (50)$$

Con la consideración anterior, las funciones de transferencia determinadas son (51) para el motor derecho y (52) para el motor izquierdo:

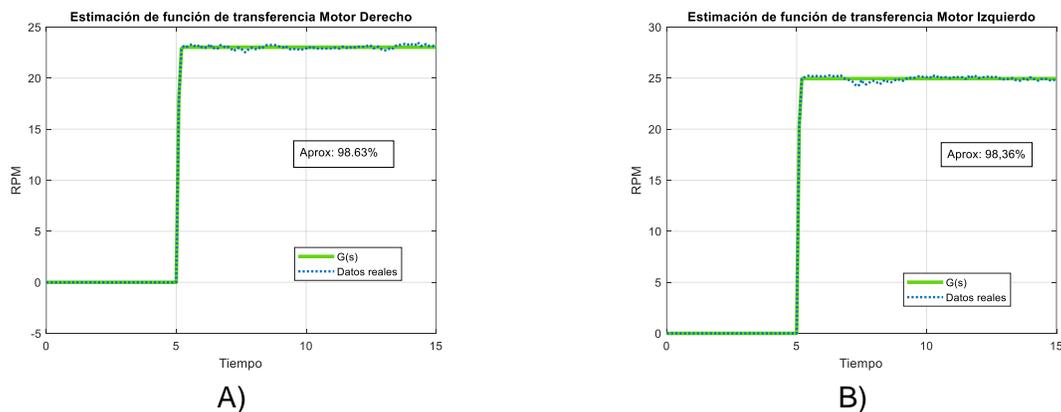
$$G(s) = \frac{0.001535}{0.026811s + 1} e^{-0.1097s} \quad (51)$$

$$G(s) = \frac{0.0016633}{0.015247s + 1} e^{-0.1244s} \quad (52)$$

En la Figura 46 literal A, se muestra la comparativa gráfica entre la función de transferencia estimada y los valores reales de la curva de reacción del motor derecho. La función se aproxima en un 98,63 % a los datos importados.

Figura 46

Estimación de la función de transferencia del motor derecho e izquierdo



La Figura 46 literal B, muestra la misma comparativa para el motor izquierdo. En este caso el modelo se aproxima en un 98,36% a los datos reales.

En base a los parámetros de la función de transferencia de cada motor, se utiliza la tabla de sintonización de Ziegler Nichols, mostrada en la Tabla 15.

Tabla 15

Tabla de sintonización de Ziegler-Nichols

Tipo de controlador	K_p	T_i	T_d
P	$\frac{T}{L}$	∞	0
PI	$0.9\frac{T}{L}$	$\frac{L}{0.3}$	0
PID	$1.2\frac{T}{L}$	$2L$	$0.5L$

Nota. Tomado de (Kuo, 1996)

Este controlador aporta velocidad de respuesta, permite llevar el error a cero con la acción integral y brinda al controlador la característica de anticipación del comportamiento futuro con la acción derivativa.

Con las fórmulas de la Tabla 15 se calculan las constantes Proporcional, Integral y Derivativa en base a los modelos de (51) y (52) correspondientes a los motores derecho e izquierdo respectivamente, obteniendo los valores mostrados en la Tabla 16.

Tabla 16*Constantes de PID para motores*

Constante	K_p	T_i	T_d
Motor derecho	191.06	0.2194	0.05485
Motor izquierdo	88.42	0.2488	0,0622

Utilizando las constantes de la Tabla 16 el controlador en ambos motores evidencia una respuesta con un sobreimpulso excesivo, generando movimientos acelerados y sin suavidad. Aunque el controlador tiende a corregir el error, su comportamiento es muy oscilatorio, por tal motivo se utilizan los criterios de sintonía fina para ajustar las constantes y obtener un comportamiento adecuado de los motores. Los criterios considerados para sintonizar las constantes del controlador son las siguientes:

- Al aumentar la constante proporcional, aumenta la velocidad de respuesta, pero disminuye la estabilidad
- Al disminuir el tiempo integral, se aumenta la velocidad de corrección del error de control, pero disminuye la estabilidad.
- Aumentar la constante derivativa inyecta estabilidad al controlador

En base a dichos criterios, se obtienen los valores mostrados en la Tabla 17, los cuales permitieron obtener en los motores, una respuesta suave, con el error de control en cero en el estado estable, poca oscilación y estabilidad adecuada. Las pruebas experimentales de este controlador se observan en el Capítulo VII enfocado en pruebas de fábrica y campo.

Tabla 17*Sintonización fina de constantes PID de los motores*

Constante	K_p	T_i	T_d
Motor derecho	1.5	0.2194	2
Motor izquierdo	1.4	0.2488	2.1

Con el controlador PID que regula la velocidad de las ruedas y el controlador cinemático que determina las velocidades a las que se debe movilizar el robot, se procede a revisar la estabilidad del controlador de medio y alto nivel.

Estabilidad del controlador

Para analizar la estabilidad del controlador propuesto se utiliza el método de Lyapunov, que se basa en analizar la energía de un sistema y cómo ésta se aproxima a cero cuando el tiempo tiende a infinito. El sistema es estable si la energía cumple las características detalladas en las ecuaciones (53) y (54):

$$E_x > 0 \quad (53)$$

$$\frac{d}{dt} E_x < 0 \quad (54)$$

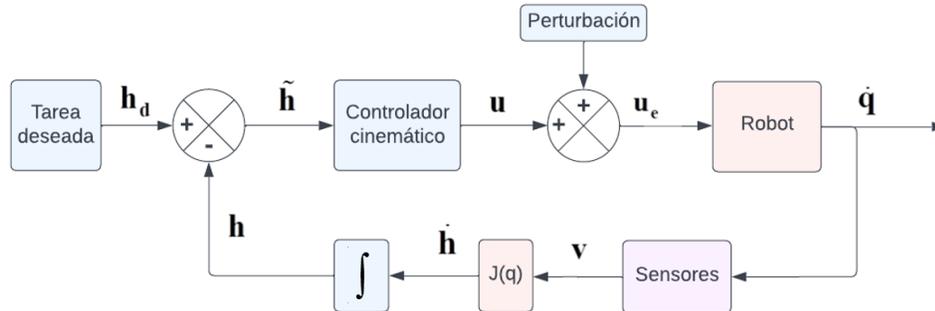
Es decir, la energía del sistema es positiva y la derivada de la energía respecto al tiempo siempre es negativa, de modo que la hace decrecer hasta cero a medida que transcurre el tiempo.

Estabilidad del controlador de regulación

Una vez definido el criterio de Lyapunov se procede a analizar la estabilidad del esquema de control propuesto para la tarea de regulación, la Figura 47 muestra el diagrama de bloques del controlador correspondiente.

Figura 47

Esquema del lazo de control de regulación de posición



Nota. Diagrama de bloques que detalla el lazo de control de regulación.

Para analizar la estabilidad por este método, en primera instancia se analizan las ecuaciones del proceso (29) y controlador (32):

$$\dot{\mathbf{h}}(\mathbf{t}) = \mathbf{J}(\boldsymbol{\varphi})\mathbf{v}(\mathbf{t}) \quad (29)$$

$$\mathbf{u}(\mathbf{t}) = \mathbf{J}^{-1}(\boldsymbol{\varphi})\mathbf{W}\tilde{\mathbf{h}}(\mathbf{t}) \quad (32)$$

Se asume que la velocidad referencia del controlador $\mathbf{u}(\mathbf{t})$ es igual a la velocidad del robot $\mathbf{v}(\mathbf{t})$, por lo que reemplazando (32) en (29), se obtiene la ecuación (55):

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{h}}(\mathbf{t}) &= \mathbf{J}(\boldsymbol{\varphi})\mathbf{J}^{-1}(\boldsymbol{\varphi})\mathbf{W}\tilde{\mathbf{h}}(\mathbf{t}) \\ \dot{\mathbf{h}}(\mathbf{t}) &= \mathbf{W}\tilde{\mathbf{h}}(\mathbf{t}) \end{aligned} \quad (55)$$

Ahora se busca una equivalencia para el término $\dot{\mathbf{h}}(\mathbf{t})$, el cual se obtiene del análisis del error de control:

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{h}} &= \mathbf{h}_d - \mathbf{h} \\ \dot{\tilde{\mathbf{h}}} &= \dot{\mathbf{h}}_d - \dot{\mathbf{h}} \end{aligned}$$

Considerando que $\dot{\mathbf{h}}_d = 0$ debido a que no existe variación de la referencia en el tiempo se obtiene la equivalencia (56):

$$\begin{aligned}\dot{\tilde{\mathbf{h}}} &= -\dot{\mathbf{h}} \\ \dot{\mathbf{h}} &= -\dot{\tilde{\mathbf{h}}}\end{aligned}\quad (56)$$

Ahora reemplazando $\dot{\mathbf{h}}$ en la ecuación (55), se obtiene la ecuación en lazo cerrado (57):

$$\begin{aligned}-\dot{\tilde{\mathbf{h}}} &= \mathbf{W}\tilde{\mathbf{h}}(t) \\ \dot{\tilde{\mathbf{h}}} &= -\mathbf{W}\tilde{\mathbf{h}}(t)\end{aligned}\quad (57)$$

Una vez determinada la ELC se debe proponer una función candidata de Lyapunov que permita caracterizar la energía del sistema y evaluar los criterios de estabilidad. En este caso se utiliza la expresión del error cuadrático medio (58) y se halla su derivada (59).

$$\mathbf{V}(\tilde{\mathbf{h}}) = \frac{1}{2} \tilde{\mathbf{h}}^T \tilde{\mathbf{h}} \quad (58)$$

$$\dot{\mathbf{V}}(\tilde{\mathbf{h}}) = \tilde{\mathbf{h}}^T \dot{\tilde{\mathbf{h}}} \quad (59)$$

Reemplazando $\dot{\tilde{\mathbf{h}}}$ de la ecuación (57) en la ecuación (59):

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{V}}(\tilde{\mathbf{h}}) &= \tilde{\mathbf{h}}^T (-\mathbf{W}\tilde{\mathbf{h}}(t)) \\ \dot{\mathbf{V}}(\tilde{\mathbf{h}}) &= -\tilde{\mathbf{h}}^T \mathbf{W}\tilde{\mathbf{h}}(t)\end{aligned}\quad (60)$$

Para evaluar que el controlador sea estable, se recurre a la segunda condición de la estabilidad de Lyapunov, en la que se menciona que la derivada de la función debe ser negativa. Analizando los términos de la ecuación (60), se concluye que los valores $\tilde{\mathbf{h}}$ no se pueden diseñar, ya que constituyen el error de control que se determina por la diferencia entre

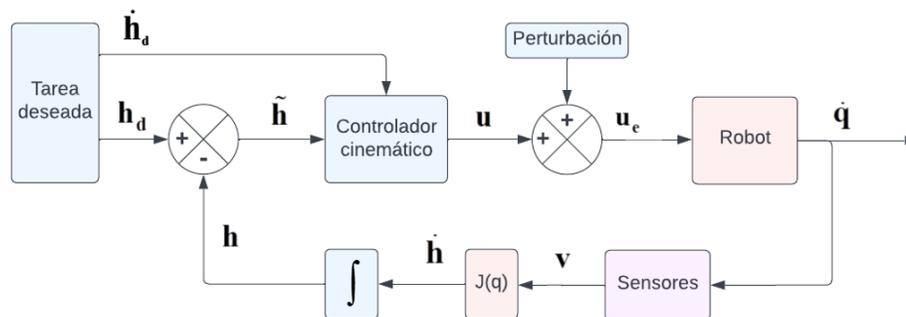
el valor deseado y el valor actual. Cabe destacar que la multiplicación de los términos $\tilde{\mathbf{h}}^T \tilde{\mathbf{h}}(t)$ siempre resulta en valores positivos, por lo que la estabilidad del sistema depende únicamente del diseño de la matriz \mathbf{W} . Esta matriz debe ser definida positiva, es decir $\mathbf{W} > 0$, ya que solo de esta forma se cumple la condición de que la expresión de la derivada sea negativa.

Estabilidad del controlador de seguimiento de camino

Ahora se procede a analizar la estabilidad del controlador de seguimiento, el cual incluye el criterio de velocidad en el cálculo de las acciones de control, lo que permite dar seguir una trayectoria. El diagrama de bloques del controlador se muestra en la Figura 48.

Figura 48

Esquema del lazo de control de seguimiento de camino



Nota. Diagrama de bloques que detalla el lazo de control de seguimiento de camino. Se observa el parámetro de velocidad deseada como entrada al controlador.

Para determinar la ecuación en lazo cerrado, se utiliza la ecuación del proceso (29) y la ley de control (32)

$$\dot{\mathbf{h}}(t) = \mathbf{J}(\boldsymbol{\varphi})\mathbf{v}(t) \quad (29)$$

$$\mathbf{u}(t) = \mathbf{J}^{-1}(\boldsymbol{\varphi})\left(\dot{\mathbf{h}}_d(t) + \mathbf{W}\tilde{\mathbf{h}}(t)\right) \quad (32)$$

Nuevamente se asume que la velocidad del robot es la misma que la determinada por el controlador, de forma que se obtiene la ecuación (61):

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{h}}(\mathbf{t}) &= \mathbf{J}(\boldsymbol{\varphi})\mathbf{J}^{-1}(\boldsymbol{\varphi})\left(\dot{\mathbf{h}}_d(\mathbf{t}) + \mathbf{W}\tilde{\mathbf{h}}(\mathbf{t})\right) \\ \dot{\mathbf{h}}(\mathbf{t}) &= \dot{\mathbf{h}}_d(\mathbf{t}) + \mathbf{W}\tilde{\mathbf{h}}(\mathbf{t})\end{aligned}\quad (61)$$

Ahora se determina la equivalencia para el término $\dot{\mathbf{h}}(\mathbf{t})$, la que se obtiene del análisis del error de control. Se debe tomar en cuenta que, en este caso, la derivada de la referencia existe y es diferente de cero, por lo que la expresión obtenida se muestra en la ecuación (62):

$$\begin{aligned}\tilde{\mathbf{h}} &= \mathbf{h}_d - \mathbf{h} \\ \dot{\tilde{\mathbf{h}}} &= \dot{\mathbf{h}}_d - \dot{\mathbf{h}} \\ \ddot{\mathbf{h}} &= \ddot{\mathbf{h}}_d - \ddot{\mathbf{h}}\end{aligned}\quad (62)$$

Reemplazando en la ecuación (61), se obtiene la ecuación en lazo cerrado ELC para analizar la estabilidad del esquema de control (57):

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{h}}(\mathbf{t}) &= \dot{\mathbf{h}}_d(\mathbf{t}) + \mathbf{W}\tilde{\mathbf{h}}(\mathbf{t}) \\ \dot{\mathbf{h}}_d - \dot{\tilde{\mathbf{h}}} &= \dot{\mathbf{h}}_d(\mathbf{t}) + \mathbf{W}\tilde{\mathbf{h}}(\mathbf{t}) \\ \dot{\tilde{\mathbf{h}}} &= -\mathbf{W}\tilde{\mathbf{h}}(\mathbf{t})\end{aligned}\quad (57)$$

Como se puede observar, la ecuación en lazo cerrado se mantiene al anularse el término de la velocidad de cambio de la referencia, tal y como se analizó en la estabilidad del controlador de regulación, por tal motivo, se puede concluir que la estabilidad de este controlador se evalúa de la misma forma; el término de diseño es la matriz de ganancia \mathbf{W} , la cual debe ser definida positiva, para cumplir los criterios expuestos por la estabilidad de Lyapunov.

Capítulo VI

Reconocimiento de voz

El reconocimiento automático de la voz con sus siglas en inglés ASR (Audio Speech Recognition), es la cooperación interdisciplinaria de la informática y la lingüística computacional para desarrollar algoritmos capaces de traducir el lenguaje hablado y permitir que las computadoras puedan interpretarlo mediante técnicas matemáticas. (Fouad, 2022)

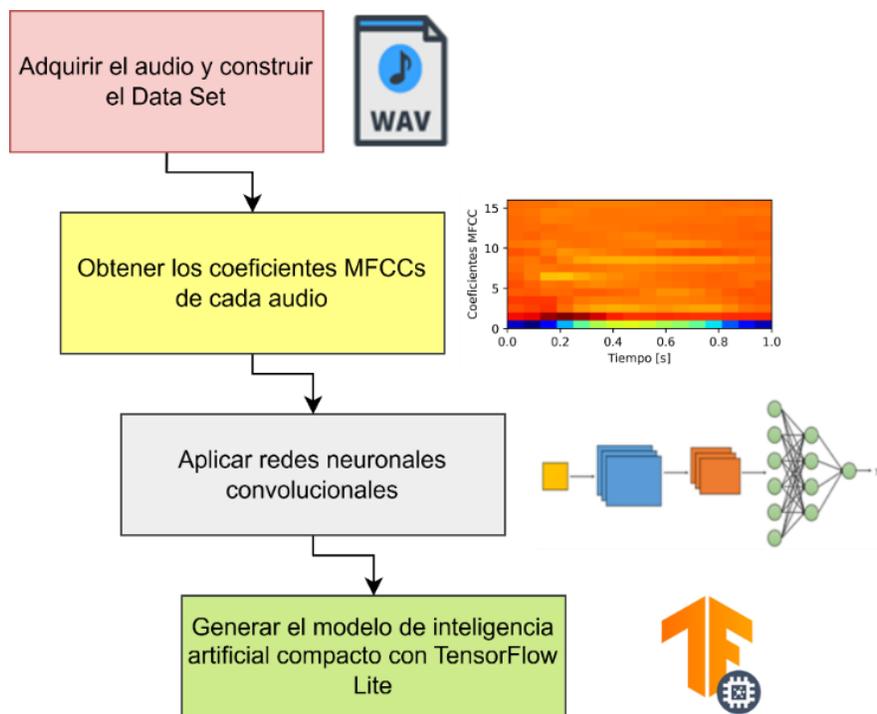
En el proceso de clasificación del lenguaje hablado común y los comandos útiles para el sistema de reconocimiento de voz de la silla es necesario el uso de un algoritmo de reconocimiento de la palabras claves (Wake Word Detection) que permite la búsqueda de palabras aisladas mientras se desarrolla una conversación fluida y cuando la palabra clave se detecta se dispone del reconocimiento de voz por el kit de herramientas de VOSK que permitirá la transformación del lenguaje hablado a comandos útiles que admitan el movimiento de la silla de ruedas bajo los requerimientos de un usuario.

Detección de la palabra clave (Wake Word Detection)

De acuerdo con la Figura 49, las etapas para construir el modelo de inteligencia artificial consisten en generar el Dataset de archivos de audio separados por categorías de clasificación en formato WAV, después se obtiene los coeficientes cepstrales de frecuencias Mel (MFCCs) de cada audio, para después desarrollar la arquitectura de una red neuronal convolucional que recibe como parámetros de entrada los coeficientes Mel y a la salida de la red tiene la función de activación Softmax que entrega un vector de predicción escalado entre 0 a 1 por cada una de las categorías. Finalmente, el modelo entrenado de reconocimiento de la palabra clave se exporta en el formato de TensorFlow lite que tiene como característica principal que es relativamente pequeño y compatible con dispositivos inteligentes como Android, iOS y Raspberry Pi 4.

Figura 49

Etapas del reconocimiento de voz de una palabra clave.



Nota. Construcción de un algoritmo de inteligencia artificial aplicado al reconocimiento de voz.

Recolección del Dataset de voz

La voz humana generalmente se encuentra en frecuencias que varían entre 200 a 3000 Hz, por lo tanto, para evitar en fenómeno de Aliasing y que al momento de muestrear digitalmente las señales continuas, éstas no se tornen indistinguibles o se pierda información importante, se considera que la frecuencia de muestreo de las señales de audio debe ser como mínimo 2 veces la frecuencia de la voz humana como se evidencia en la ecuación (63):

$$f_{muestro} \geq 2 \cdot f_{Voz\ Humana} \quad (63)$$

Tabla 18

Frecuencias de muestreo típicas de audio.

Muestreo	Cuantificación	Aplicación
8000 Hz	8 bits	Teléfonos
11025 Hz	8 bits	Radio AM
22050 Hz	16 bits	Radio FM
32000 Hz	16 bits	Mini DV
44100 Hz	16 bits	CD
48000 Hz	16 bits	DAT
96000 Hz	24 bits	Blu-ray

Nota. Adquisición digital del sonido. Tomado de (Millán, 2022).

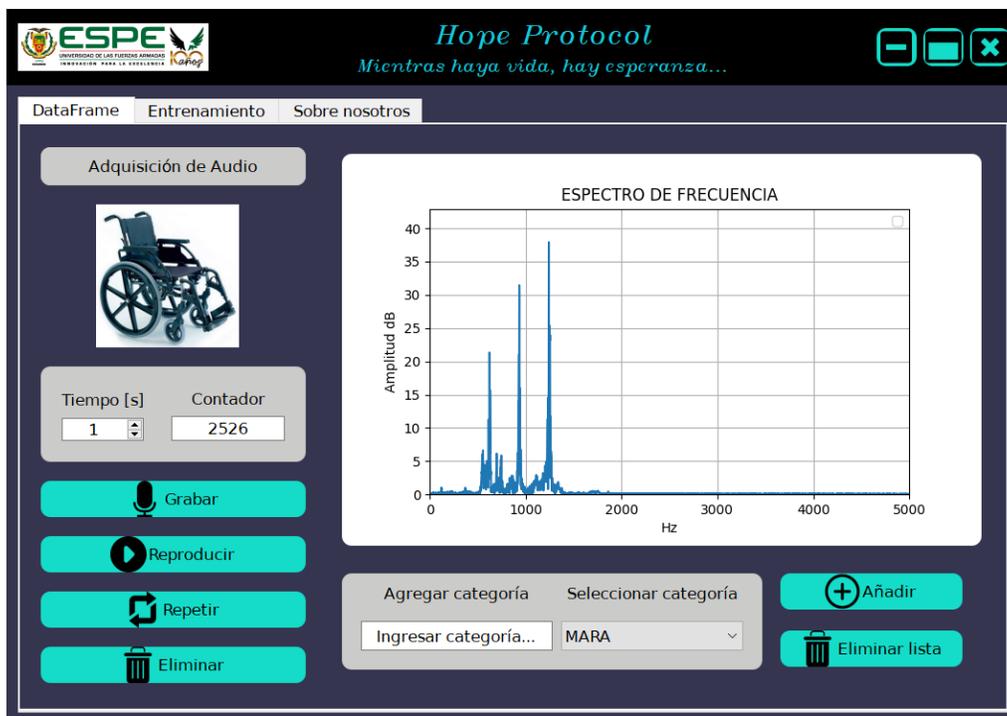
En la Tabla 18, se establecen frecuencias de muestreo típicas para el sonido, por lo cual la recolección del Dataset de voz se considera una frecuencia de muestreo que garantice calidad, rendimiento y evite el fenómeno de Aliasing de acuerdo con la ecuación (63), por ende, se selecciona la frecuencia de muestreo típica de 48000 Hz para la recolección la construcción del Dataset.

Estructura del Dataset

El Dataset de audio fue recolectado mediante el desarrollo de un interfaz gráfico que tiene el paradigma de generar la adquisición de audio con una frecuencia de muestreo de 48000 Hz, con base en la modificación del tiempo de grabación, edición de parámetros de gestión de categorías de clasificación y además permite editar los parámetros de entrenamiento de la red neuronal convolucional para la construcción del modelo de reconocimiento de la palabra clave y a su vez exportarlo en el formato de TensorFlow lite.

Figura 50

Interfaz gráfico de adquisición de archivos de audio.



Nota. Interfaz gráfico para construir el Dataset de audio en función del tiempo y de las categorías.

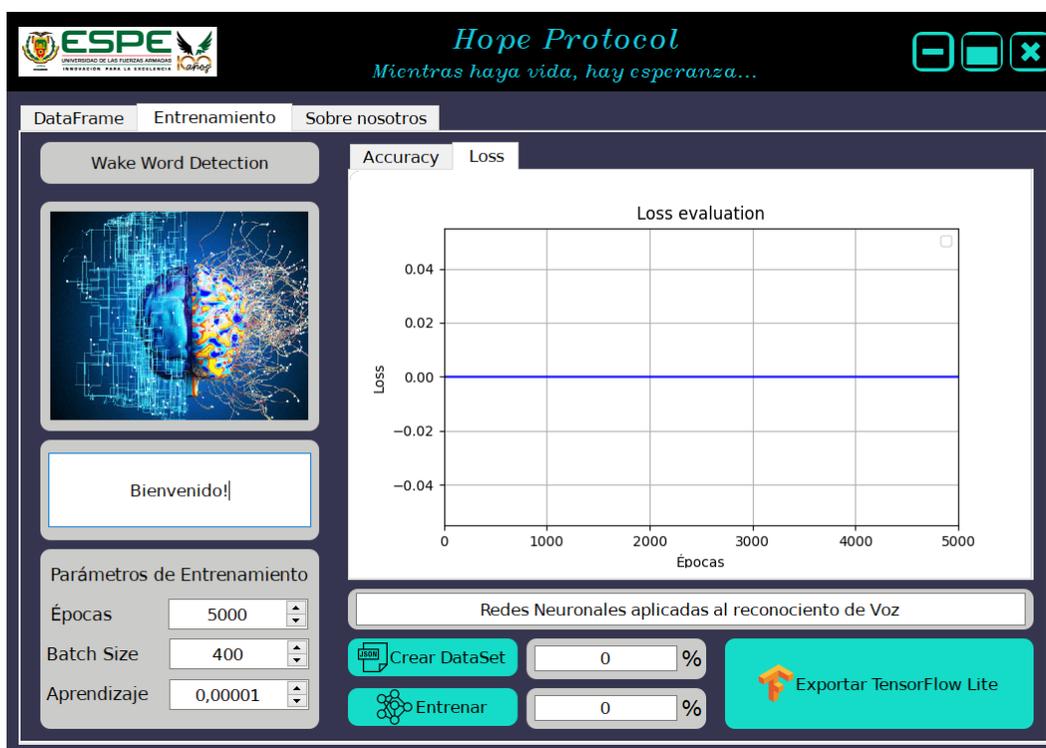
En la Figura 50 la pestaña del Dataset se busca generar la adquisición controlada del sonido con una frecuencia de muestreo de 48000 Hz por defecto y además gestionar el almacenamiento automático de los archivos de audio en carpetas denominadas categorías.

- Los parámetros controlables del interfaz gráfico son los siguientes:
- Tiempo: para cuantificar la duración de cada archivo de audio.
- Contador: indicar cuantos archivos de audio existen.
- Grabar: inicia la grabación.
- Reproducir: reproduce el último archivo de audio.
- Repetir: repite la adquisición del último archivo de audio.

- Eliminar: elimina el último archivo de audio.
- Agregar categoría: insertar el nombre de la nueva categoría de audio.
- Seleccionar categoría: permite desplegar las categorías disponibles.
- Añadir: permite añadir otra categoría de audio.
- Eliminar lista: elimina la categoría y todos los archivos de audio.

Figura 51

Interfaz gráfico de entrenamiento y modelo de inteligencia artificial.



Nota. Interfaz gráfico para construir el Dataset de audio en función del tiempo y de las categorías.

En la Figura 51 la pestaña de “Entrenamiento” se busca crear el Dataset por medio de la concatenación de los vectores MFCCs en un archivo de formato JSON por cada archivo de audio pregrabado. Además, en el apartado de parámetros de entrenamiento se gestiona las

calidades de aprendizaje de la red neuronal y finalmente se exporta el modelo de inteligencia artificial en el formato de TensorFlow Lite.

Los parámetros controlables del interfaz gráfico son los siguientes:

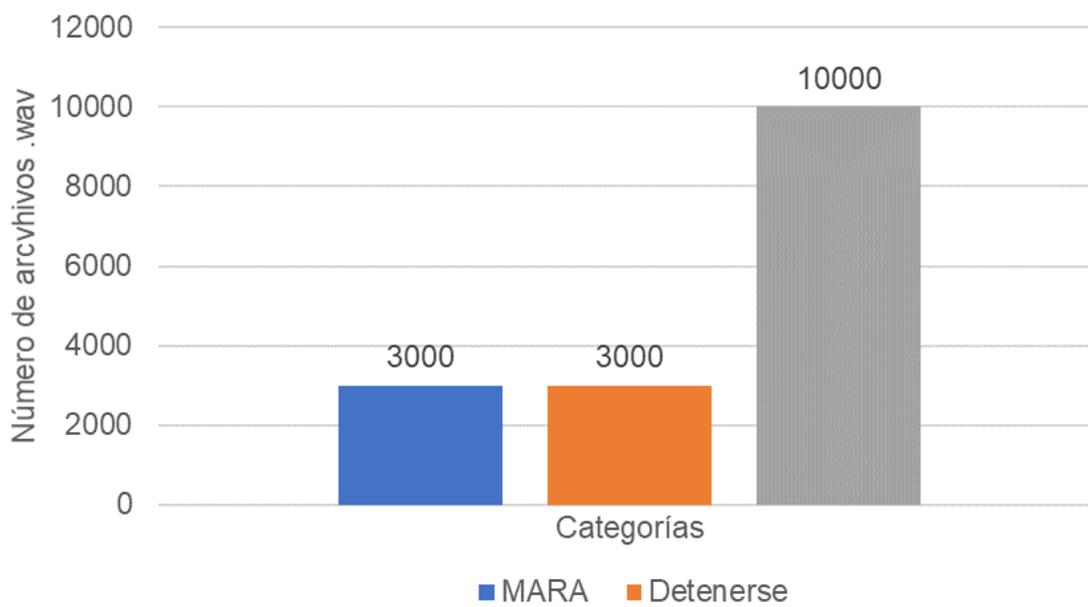
- Crear Dataset: crea un archivo JSON de la concatenación de los vectores MFCCs de cada archivo de audio y separados por categorías.
- Épocas (Epochs): número de ciclos de propagación hacia atrás y hacia adelante para reducir la pérdida y tener resultados más precisos.
- Tamaño de lote (Batch Size): número de datos tomados por la actualización de la gradiente. Este parámetro depende directamente de las capacidades de una computadora para procesar grandes cantidades de datos.
- Aprendizaje (Learning Rate): es la tasa de aprendizaje aplicada al algoritmo de optimización del descenso de la gradiente, ADAM.
- Cuando es más grande la tasa de aprendizaje, este tiende a ser más rápido, pero menos preciso en el nivel de acierto y cuando es más pequeño, este tiende a ser más lento pero más preciso en el nivel de acierto.
- Entrenar: genera el entrenamiento de la red neuronal.
- Acierto (Accuracy): es la pestaña que indica la gráfica de Acierto vs. Épocas.
- Pérdida (Loss): es la pestaña que indica la gráfica de Pérdida vs. Épocas.
- Exportar a TensorFlow Lite: el modelo de inteligencia artificial generado en el entrenamiento se exporta en el formato TFLITE.

El Dataset

La Figura 52 denota como está construido el Dataset de audio en formato WAV con duración de 1 segundo donde se establece un conjunto de varias categorías de palabras claves correspondientes a los comandos de voz y se encuentran detallados en el siguiente gráfico:

Figura 52

Categorías del Dataset



Nota. Representación del Dataset en función de las categorías.

Estas categorías fueron seleccionadas en base a los siguientes criterios:

- MARA: palabra clave para activar la etapa de reconocimiento de comandos de movimiento y coordenadas para después generar el accionamiento del robot.
- Además, MARA es un acrónimo que pretende humanizar y volver más interactivo a un robot, de acuerdo con la Figura 53.
- Detenerse: palabra clave para detener el robot cuando está en movimiento y es de acuerdo con la necesidad del usuario.
- Vacío: categoría destinada para determinar sonidos que pertenecen a ruidos del ambiente y palabras en el lenguaje hablado que no pertenecen a las categorías MARA o Detenerse.

Figura 53

Acrónimo de MARA.

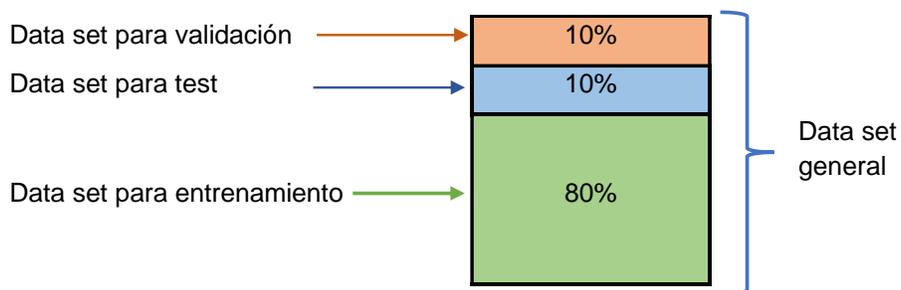


Nota. Significado del acrónimo M.A.R.A. para el reconocimiento de voz.

La Figura 54, muestra cómo está separado el conjunto de archivos de audio del Dataset en donde se divide en 3 subconjuntos que sirven para establecer las etapas de entrenamiento, test y validación dentro de la ejecución del algoritmo de inteligencia artificial.

Figura 54

Subconjuntos del Dataset.



Nota. Separación del Dataset para entrenamiento, test y validación.

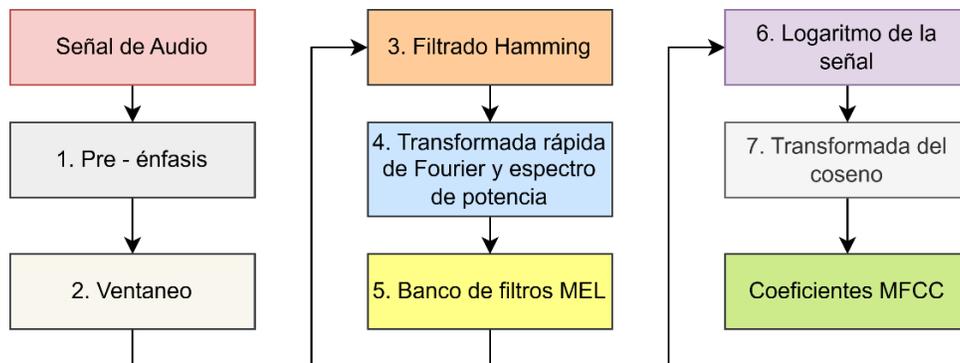
Coeficientes cepstrales de frecuencias MEL

El análisis del sonido en el dominio del tiempo y la amplitud crea una gran cantidad de datos secuenciales que tienden a ser muy variables en el tiempo, por ende, la extracción de patrones de datos es colosal.

Al analizar el sonido en el dominio de la frecuencia se considera los coeficientes Cepstrales de frecuencias Mel (MFCC) en donde se toman segmentos de la señal muestreada y se reducen de forma considerable la cantidad de datos a simples coeficientes en la escala de frecuencias Mel. Para la extracción de los coeficientes se aplica un algoritmo secuencial, de acuerdo con la Figura 55, en donde a la señal de audio se la va procesando hasta obtener un espectrograma de los MFCCs.

Figura 55

Extracción de los coeficientes MFCCs.



Nota. Las 7 etapas para extraer los coeficientes cepstrales de frecuencias Mel en base a una señal continua de audio.

A continuación, se toma como ejemplo un audio de la categoría MARA en formato de audio WAV con una duración de 1 segundo a una frecuencia de muestreo de 48000 Hz para después realizar un remuestreo de 8000 Hz para optimizar el algoritmo.

Las etapas para extraer los MFCCs son los siguientes:

Pre - énfasis

Se realiza un filtrado inicial llamado pre - énfasis para atenuar el ruido existentes en los picos de la señal por medio de la ecuación (64).

$$y[n] = x[n] - a \cdot x[n-1] \quad (64)$$

Donde:

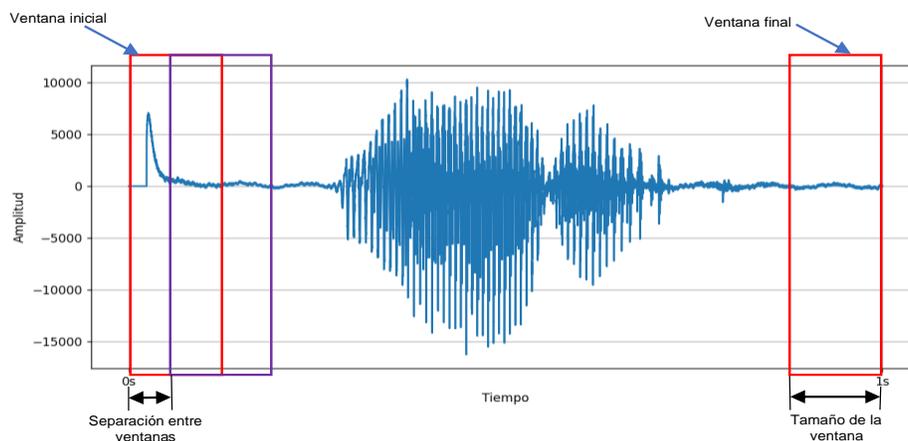
- x : corresponde a la señal de audio discretizada.
- a : constante del filtro que varía entre 0 a 1, habitualmente es 0.95.

Ventaneo

En la Figura 56, el archivo de sonido en el dominio del tiempo se divide en segmentos o ventanas que tienen el mismo tamaño, al ser un archivo de audio de 1000 milisegundos cada ventana tiene un tamaño de 250 milisegundos y una separación entre ventanas de 50 milisegundos.

Figura 56

Archivo de audio correspondiente a la categoría MARA.



Nota. Segmentación del sonido en ventanas de 250 milisegundos.

Por lo tanto, en la segmentación del sonido en ventanas, estas se separan uniformemente y la cantidad de datos muestreados por cada ventana se calcula con la ecuación (65).

$$Elementos_{Ventana} = f_{muestreo} \times Tama\tilde{n}o_{Ventana} \quad (65)$$

$$Elementos_{Ventana} = \left(\frac{8000 \text{ muestras}}{\text{segundos}} \right) \times 0.250 \text{ segundos}$$

$$Elementos_{Ventana} = 2000 \text{ muestras}$$

La cantidad de ventanas deslizantes generadas en el proceso de segmentación de un archivo de audio de duración de 1 segundo se calcula con la ecuación (66).

$$Ventanas = \frac{Duración_{Audio} - duración_{Ventana}}{Separación_{Ventanas}} + 1 \quad (66)$$

$$Ventanas = \frac{1000 \text{ milisegundos} - 250 \text{ milisegundos}}{50 \text{ milisegundos}} + 1$$

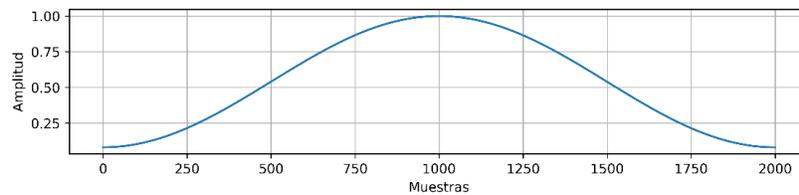
$$Ventanas = 16$$

Filtrado Hamming

La ventana Hamming se aplica para suavizar o filtrar los datos después de haber sido separados en ventanas deslizantes. En la Figura 57 se observa el filtro Hamming con un valor de 2000 muestras correspondiente al tamaño de la ventana, después se muestra la señal original correspondiente a la ventana de 0.250 milisegundos en la Figura 58 y finalmente la señal suavizada en la Figura 59.

Figura 57

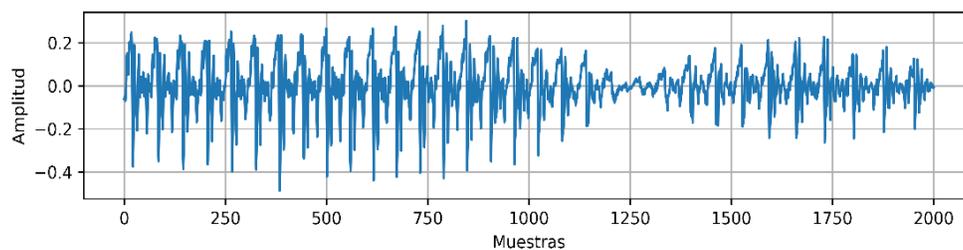
Señal de 2000 muestras correspondiente a la ventana Hamming.



Nota. Filtro Hamming para suavizar señales.

Figura 58

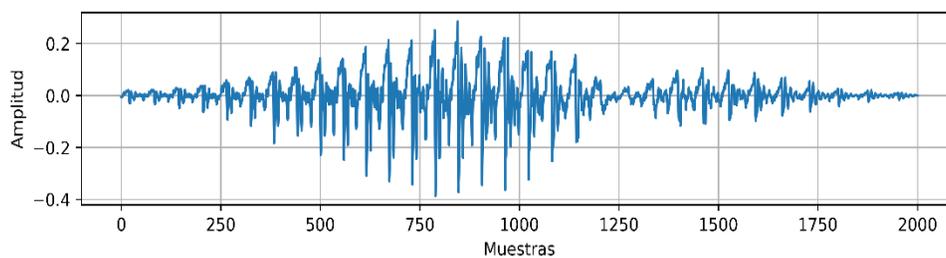
Señal de 2000 muestras correspondiente a una ventana de la señal original.



Nota. Señal de audio en el dominio del tiempo sin un filtrado previo.

Figura 59

Señal de 2000 muestras suavizada con la ventana Hamming.



Nota. Señal de audio en el dominio del tiempo con un suavizado Hamming.

Transformada rápida de Fourier y espectro de potencia

En cada ventana de datos se calcula la transformada discreta de Fourier para representar los datos de la señal de audio en el dominio de la frecuencia discreta. Es decir, al existir una señal audio muestreada en el dominio del tiempo discreto, esta se define como

$X_0[n]$ y se la representa mediante el conjunto de datos temporales

$\{X_0[0], X_0[1], X_0[3], \dots, X_0[n]\}$ y al aplicar la transformada discreta de Fourier con la

ecuación (67):

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} X(n) \cdot e^{-\frac{2\pi knj}{N}}, \text{ donde } k=0, \dots, N-1 \quad (67)$$

Se obtiene la representación de las componentes de la señal de audio de forma compleja en el dominio de la frecuencia discreta para luego extraer el espectro de potencias con la ecuación (68):

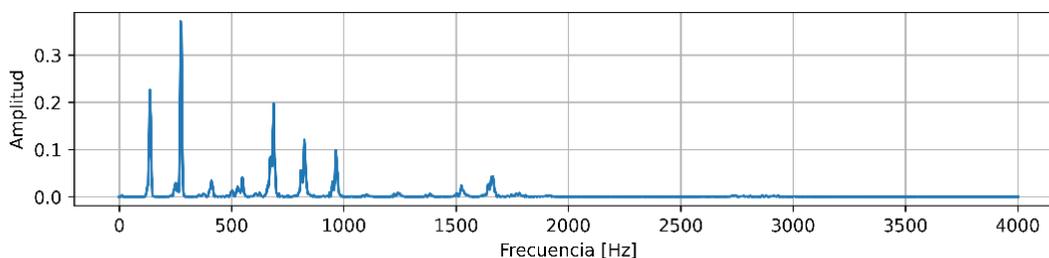
$$P(k) = \frac{|X(k)|^2}{N_{FFT}} \quad (68)$$

Donde $k=0, \dots, N-1$ y N_{FFT} : conjunto de frecuencias, 2048 recipientes.

La transformada rápida de Fourier dispone de una cantidad de recipientes o conjuntos de frecuencias que debe ser $N_{FFT} = 2^k$, en donde $k: 1, 2, 3, \dots, N$, es decir, al aplicar la FFT a una señal de tipo real se tiene un espectro simétrico con respecto al punto medio de la frecuencia, por lo tanto, en la Figura 60, se evidencia que la frecuencia se reduce a la mitad, es decir, a 4000 Hz en 1024 recipientes.

Figura 60

Espectro de potencia de una ventana de audio entre 0.4 y 0.65 segundos.

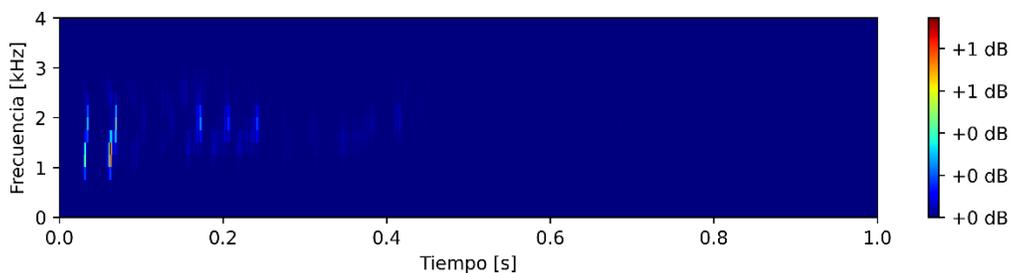


Nota. Representación del espectro de potencia de una señal de audio de 250 milisegundos.

En la Figura 61 se muestra el espectrograma de potencia resultante de toda la señal de audio.

Figura 61

Espectrograma de potencia de la señal de audio.



Nota. Espectrograma de potencia con duración de 1 segundo.

Banco de filtros MEL

La escala Mel es una escala psicoacústica que busca representar de forma no lineal la percepción que tiene el oído humano del sonido y mediante la ecuación (69) se obtiene el valor representativo de la escala Mel M con respecto a una frecuencia f . (F. Salcedo, 2007)

$$M = 2595 \log_{10} \left(1 + \frac{f}{700} \right) \quad (69)$$

El banco de filtros es una representación de múltiples filtros triangulares que se solapan cerca del 50% y constituyen la escala Mel de forma matricial con vectores concatenados de forma vertical, como se observa en la ecuación (70).

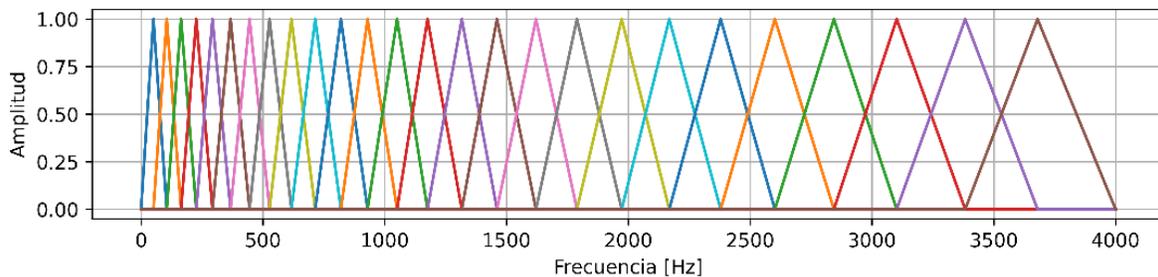
$$\mathbf{H}_{\text{Mel}} = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_1 \\ \mathbf{H}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{H}_n \end{bmatrix} \quad (70)$$

Donde:

- \mathbf{H}_{Mel} : representa el banco de filtros Mel.
- $\mathbf{H}_1, \mathbf{H}_2, \dots, \mathbf{H}_n$: representan cada vector de los filtros triangulares, para este proyecto se considera que el número filtros triangulares $N_{\text{Filt}} = 26$.

Figura 62

Banco de filtros triangulares.



Nota. Representación de los 26 filtros triangulares de la escala Mel.

Aquí se multiplica matricialmente el espectrograma de potencia de dimensión (16 x 1025) correspondiente a la Figura 61 por la transpuesta del banco de filtros triangulares de

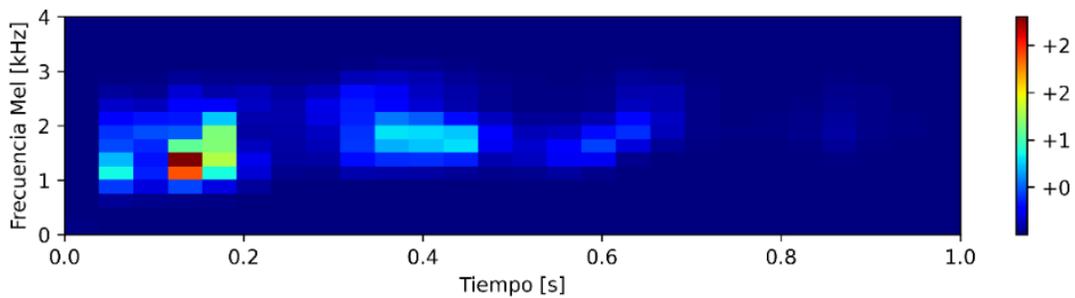
dimensión (1025 x 26) correspondiente a la Figura 62 y se obtiene una matriz resultante de los coeficientes Mel como se evidencia en la ecuación (71) cuya dimensión es (16 x 26).

$$\mathbf{R} = \mathbf{E} \cdot \mathbf{H}_{\text{Mel}}^T \quad (71)$$

A continuación, en la Figura 63 se muestra el espectrograma resultante de la multiplicación del espectrograma de potencia y el banco de filtros.

Figura 63

Espectrograma filtrado.



Nota. Espectrograma resultante después de filtrado triangular.

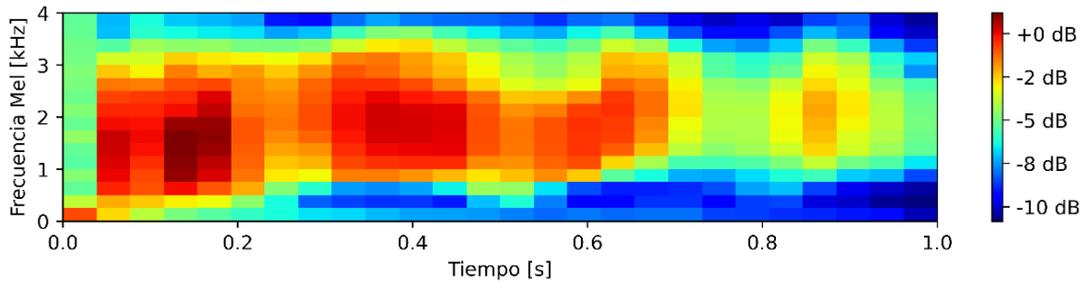
Logaritmo de la señal

A continuación, en la Figura 64 se muestra el espectrograma de MEL y con la ecuación (72) se calcula la energía con el logaritmo de cada uno de los elementos de la matriz \mathbf{R} de la ecuación (71).

$$\mathbf{L} = 20 \cdot \log_{10}(\mathbf{R}) \quad (72)$$

Figura 64

Logaritmo del espectrograma filtrado.



Nota. Obtención de la energía a partir del espectrograma con filtrado triangular.

Transformada del coseno

Finalmente, se realiza la etapa de obtención de la transformada discreta del coseno DCT de acuerdo con la ecuación (73) y se obtiene un vector de datos reales y no simétricos.

$$\mathbf{Q}(k) = \alpha(k) \sum_{n=0}^{N-1} \mathbf{X}(n) \cdot \cos\left(\frac{\pi k (2n+1)}{2N}\right) \quad (73)$$

Donde:

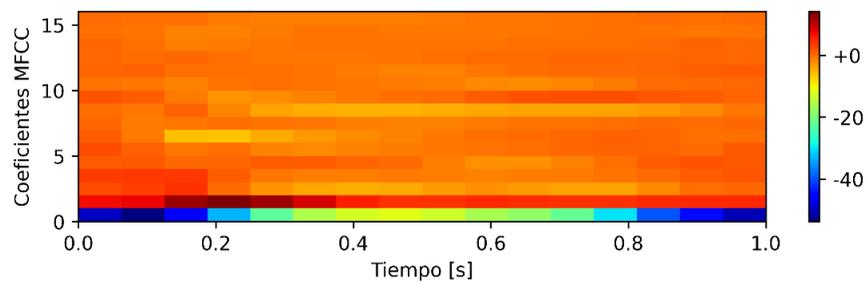
- $\mathbf{Q}(k)$: Es el vector resultante de la transformada discreta del coseno.
- N : es el número de términos de cada vector fila de la Matriz \mathbf{L} .
- k : es un número entero $k = 0, 1, 2, \dots, N-1$.
- n : es un número entero $n = 0, 1, 2, \dots$
- $\mathbf{X}(n)$: son los valores de entrada de la señal de la Matriz \mathbf{L} .

- $\alpha(k)$: es un factor de escala $\begin{cases} \sqrt{\frac{1}{N}}, & \text{cuando } k = 0 \\ \sqrt{\frac{2}{N}}, & \text{cuando } k \neq 0 \end{cases}$.

El tamaño del vector de salida de $Q(k)$ es de 26 coeficientes, pero usualmente para el análisis de audios se toman hasta los 16 coeficientes y el resto se desecha. En la matriz **MFCC** se concatena cada uno de los vectores $Q(k)$ y se construye la matriz de los coeficientes con una dimensión de (16 x 16) como se evidencia en la Figura 65.

Figura 65

Coefficientes MFCCs.



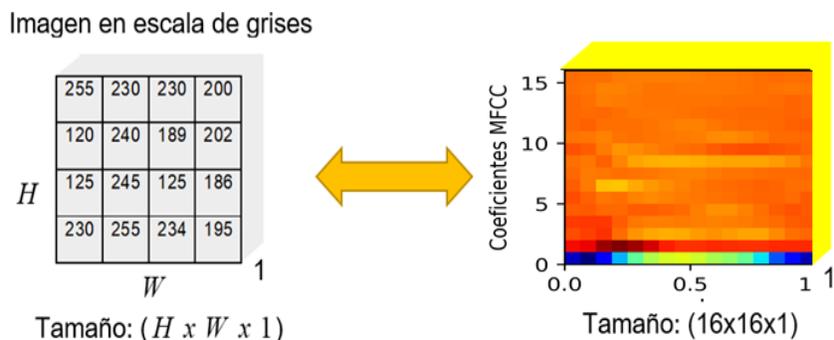
Nota. Matriz MFCCs con duración de 1 segundo y tamaño de (16 x 16).

Arquitectura de la red neuronal

Para este proyecto se dispone de un conjunto de redes neuronales convolucionales y que generalmente son usadas para procesar imágenes. La resolución de la imagen como se muestra en la Figura 66 está dada por $H \times W \times D$, donde, H es el tamaño de la altura, W es el ancho y D es la dimensión que generalmente se usa para especificar las capas RGB de una imagen.

Figura 66

Estructura de los datos de entrada de la red Neuronal.



Nota. Similitud de la matriz MFCC y una imagen en escala de grises.

Para establecer los datos de entrada de las neuronas se considera que H corresponde a 16 coeficientes cepstrales de frecuencias Mel, W corresponde al número de 16 ventanas de acuerdo con la ecuación (66) y D corresponde a 1 ya que emula la dimensión de una imagen en escala de grises. El número de neuronas de la capa de entrada se define como la multiplicación de los parámetros que forman la estructura de una imagen como se evidencia en la ecuación (74).

$$Neuronas_{Entrada} = H \times W \times D \quad (74)$$

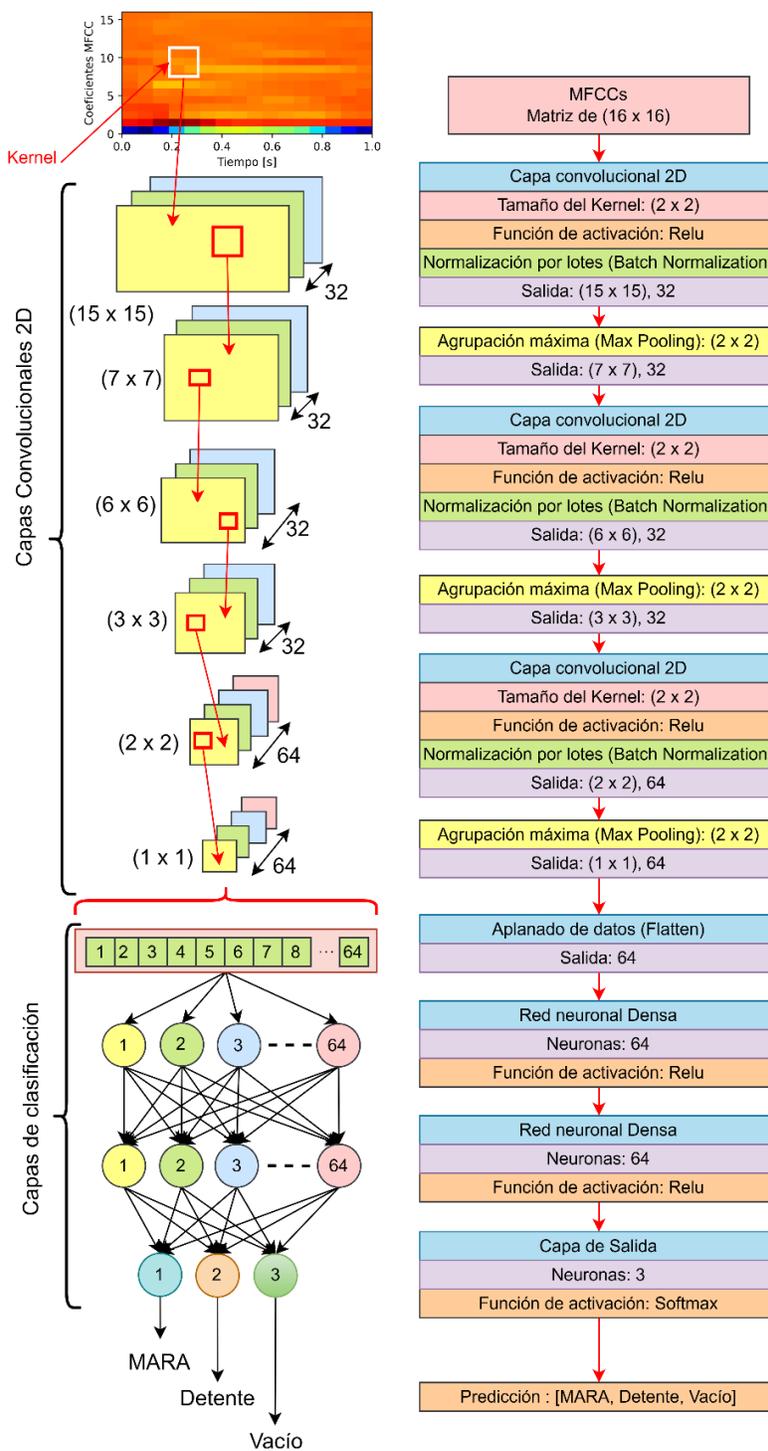
$$Neuronas_{Entrada} = (16) \cdot (16) \cdot (1)$$

$$Neuronas_{Entrada} = 256$$

En la Figura 67 se evidencia la estructura del algoritmo de inteligencia artificial implementado que permite ingresar como datos de entrada la matriz **MFCC** hacia una capa de entrada de 256 neuronas, después se concatenan con 3 capas de redes neuronales convolucionales, 2 capas de redes neuronales secuenciales para clasificar y en la capa de salida se tiene 3 neuronas que representan las categorías MARA, Detente y Vacío.

Figura 67

Estructura del algoritmo de inteligencia artificial.



Nota. Arquitectura de la red neuronal convolucional para clasificar.

En la Figura 68 se evidencia la implementación en Tensor Flow del modelo de reconocimiento de voz descrito en la Figura 67 y arroja un total de 21571 parámetros, de los cuales 21315 corresponde a los parámetros entrenables y los restantes 256 son parámetros de entrada de la red neuronal o el número de neuronas de entrada.

Figura 68

Estructura del algoritmo de detección de palabras claves en TensorFlow.

```

Model: "sequential"
-----
Layer (type)                Output Shape                Param #
-----
conv2d (Conv2D)             (None, 15, 15, 32)         160
batch_normalization (BatchN (None, 15, 15, 32)         128
ormalization)
max_pooling2d (MaxPooling2D (None, 7, 7, 32)           0
)
conv2d_1 (Conv2D)           (None, 6, 6, 32)           4128
batch_normalization_1 (Batc (None, 6, 6, 32)           128
hNormalization)
max_pooling2d_1 (MaxPooling (None, 3, 3, 32)           0
2D)
conv2d_2 (Conv2D)           (None, 2, 2, 64)           8256
batch_normalization_2 (Batc (None, 2, 2, 64)           256
hNormalization)
max_pooling2d_2 (MaxPooling (None, 1, 1, 64)           0
2D)
flatten (Flatten)           (None, 64)                  0
dense (Dense)                (None, 64)                  4160
dense_1 (Dense)              (None, 64)                  4160
dense_2 (Dense)              (None, 3)                   195
-----
Total params: 21,571
Trainable params: 21,315
Non-trainable params: 256

```

Nota. Implementación en TensorFlow algoritmo de detección de palabras.

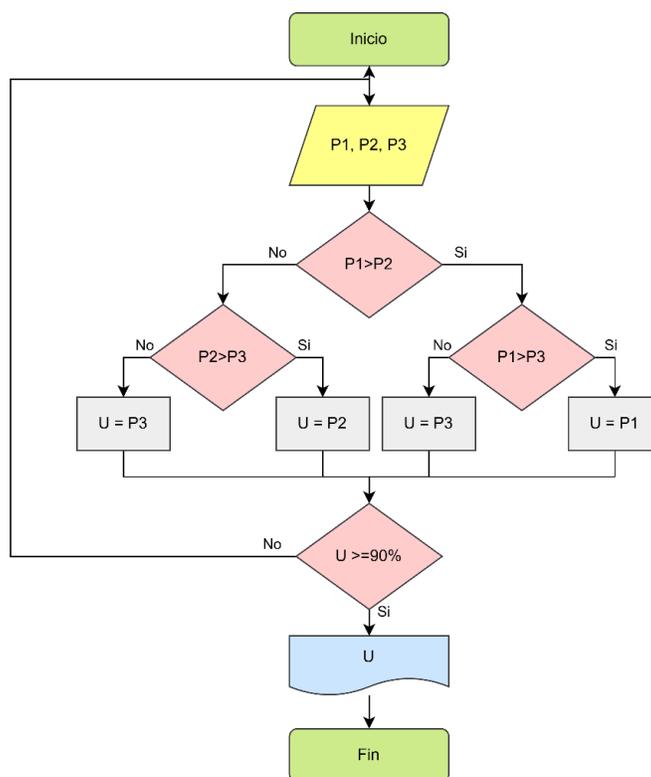
Umbral de Probabilidad

Al final de la red neuronal descrita en la Figura 67 existen 3 salidas que crean un vector de predicción $P = [P_1, P_2, P_3]$, que representa las categorías ["MARA", "Detente", "Vacío"], el rango de cada valor de predicción varía entre 0 y 1, de acuerdo con la función de activación Softmax.

Para garantizar el correcto funcionamiento de la detección de la palabra clave, en la Figura 69 se muestra el diagrama de flujo que va comparando los valores del vector de predicción P_1 , P_2 y P_3 , para después seleccionar la categoría que tenga el valor más elevado y verificar que además la categoría sea superior al umbral del 90%.

Figura 69

Algoritmo para la selección de la categoría.



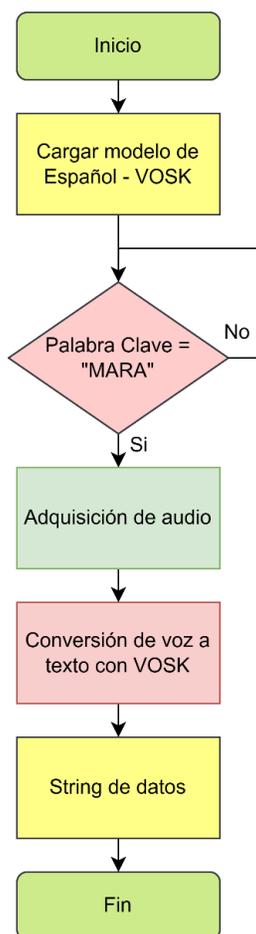
Nota. Algoritmo para buscar la categoría superior y su umbralización al 90%.

Conversión de voz a texto – VOSK

En la etapa de conversión de voz a texto se hace uso de la librería VOSK porque permite ejecutarse sin conexiones a internet y para el funcionamiento en este proyecto es una parte vital para evitar que existan tiempos muertos que ocasionen problemas en la lectura de comandos de voz entre envíos y recepciones de datos. A continuación, en la Figura 70 muestra el funcionamiento del algoritmo de VOSK para el reconocimiento de voz en este proyecto:

Figura 70

Algoritmo de conversión de voz a texto con VOSK.



Nota. Obtención del String de datos con el kit de herramientas de VOSK.

El diagrama de flujo de la Figura 70 inicia cargando el modelo en español de VOSK y se establece la frecuencia de funcionamiento a 8000Hz, después espera hasta que el algoritmo de detección de una palabra clave sobrepase el umbral del 90% con respecto al reconocimiento de la palabra clave MARA, después genera la adquisición de audio y finalmente genera un string de datos con los resultados obtenidos en la conversión de voz a texto.

Los comandos de voz fueron seleccionados bajo los conceptos del movimiento del robot, control del sistema operativo e información, para que pueda ser usado de forma simple por personas discapacitadas, a continuación, se muestra la lista de comandos de voz:

- Los comandos de voz análogos descritos en la **Tabla 19** son similares a un control de tipo joystick y están divididos en dos grupos: a) Comandos lineales, que permiten trasladar al robot de forma lineal y b) Comandos rotacionales, que permiten rotar al robot sobre su propio eje.

Tabla 19

Descripción de los comandos análogos.

Tipo	Comando de Voz	Variación del comando
Lineal	Hacia el frente	Hacia el Frente
		Hacia adelante
Lineal	Hacia atrás	Hacia atrás
		Atrás
Rotacional	Girar a la derecha	Girar a la derecha
		Rotar a la derecha
Rotacional	Girar a la izquierda	Girar a la izquierda
		Rotar a la izquierda

Nota. Comandos de voz que emulan a un joystick.

- Los comandos de voz para establecer las coordenadas de movimiento en el plano cartesiano siguen la estructura “Coordenadas equis k zeta m ”, donde k y m son números enteros con un rango de $[-10, 10]$ metros y el usuario puede establecer el punto deseado de acuerdo con el set point enviado al controlador robótico.
- Los comandos del sistema operativo descritos en la **Tabla 20** son usados para apagar o reiniciar de forma automática los equipos electrónicos.

Tabla 20

Descripción de los comandos del sistema operativo.

Comando de Voz	Variación del comando
Apagarse	Apagar, Apagarse y Apágate
Reiniciarse	Reiniciar, Reiniciarse y Reiníciate

Nota. Comandos para apagar y reiniciar el sistema operativo.

- Los comandos informativos descritos en la **Tabla 21** están diseñados para que el usuario pueda interactuar con el robot.

Tabla 21

Descripción de los comandos informativos.

Comando de Voz	Variación del comando
Información	--
Hola	Buenos días Buenas tardes Buenas noches

Nota. Comandos que permiten la interacción con el usuario.

Capítulo VII

Pruebas y Resultados

En este capítulo se detallan las pruebas realizadas a los subsistemas de la silla de ruedas inteligente, se pone a prueba el control de bajo, medio y alto nivel, al igual que las pruebas de reconocimiento de voz, las cuales permiten validar el funcionamiento técnico del prototipo. Finalmente se aplica una encuesta de satisfacción, la cual permite ponderar si el equipo robótico ayuda en la autonomía móvil de personas tetrapléjicas.

Sistema de control

En este apartado se detallarán las pruebas realizadas a los sistemas de control de forma independiente, empezando por pruebas de regulación y seguimiento a los controladores de bajo nivel, es decir, a los controladores PID discretos implementados en cada motor. Posteriormente se evaluará el desempeño del controlador de medio nivel, el cual se encarga de la regulación de posición en base al cálculo de las velocidades que debe experimentar el robot para corregir el error de control. Finalmente se analizarán los resultados del controlador de camino, el cual permite seguir una trayectoria a velocidad constante.

Controlador de bajo nivel

El controlador utilizado para los motores es un PID discreto, el cual permite seguir la referencia dada para tareas de regulación y seguimiento de manera rápida, permitiendo corregir el error en estado estacionario y generando un desempeño adecuado.

La ecuación (44) detalla la ecuación del PID discreto implementada y la **Tabla 17** las constantes de control de cada motor.

$$u(k) - u(k-1) = k_p \left[\left(1 + \frac{T_s}{2t_i} + \frac{t_d}{T_s} \right) e(k) - \left(1 - \frac{T_s}{2t_i} + \frac{2t_d}{T_s} \right) e(k-1) + \left(\frac{t_d}{T_s} \right) e(k-2) \right] \quad (44)$$

Tabla 22

Sintonización fina de constantes PID de los motores

Constante	K_p	T_i	T_d
Motor derecho	1.5	0.2194	2
Motor izquierdo	1.4	0.2488	2.1

Regulación. La prueba consiste en generar entradas escalón de 5 segundos cada una, que permitan actuar al controlador y ajustar a cada motor a la velocidad deseada. Las velocidades referencia se observan en la Tabla 23.

Tabla 23

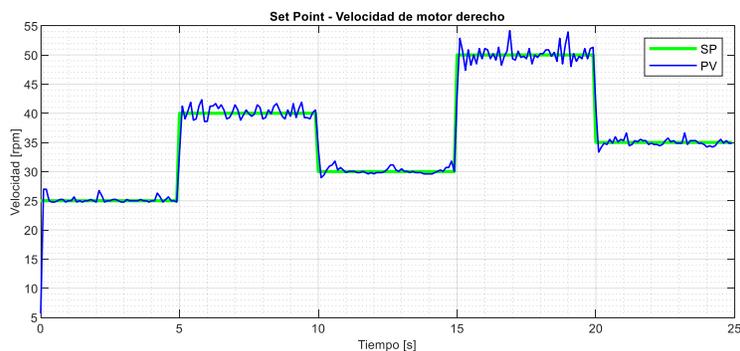
Velocidades referencia para prueba de regulación

Velocidad					
Valor [rpm]	25	40	30	50	35

En la Figura 71 se observa la gráfica de las entradas dadas al controlador y el valor de la velocidad leída por los encoders del motor derecho.

Figura 71

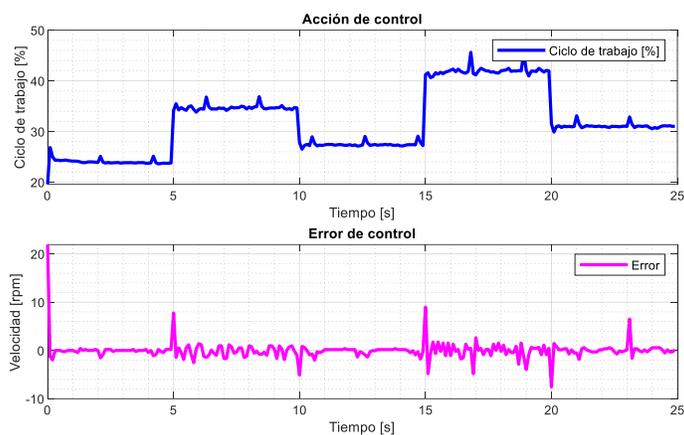
Set Point - Velocidad de motor derecho (Regulación)



Como se puede observar, el controlador permite que el motor se ajuste a las velocidades seteadas mediante el cálculo de la acción de control necesaria. Las gráficas de la acción de control dada al motor y el error generado se observan en la Figura 72.

Figura 72

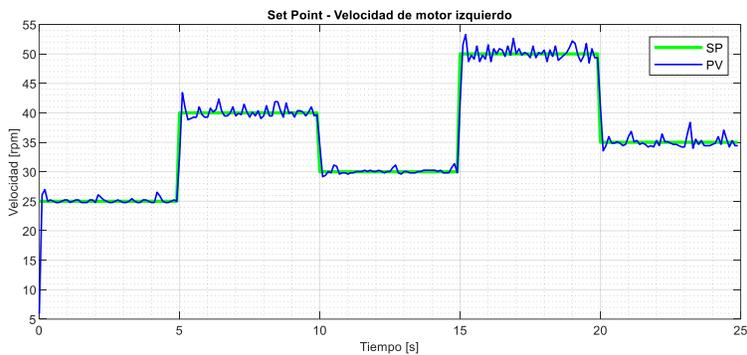
Acciones y error de control para regulación del motor derecho



Las entradas de velocidad dadas al motor izquierdo y su desempeño ajustándose a dichas velocidades se observan en la Figura 73.

Figura 73

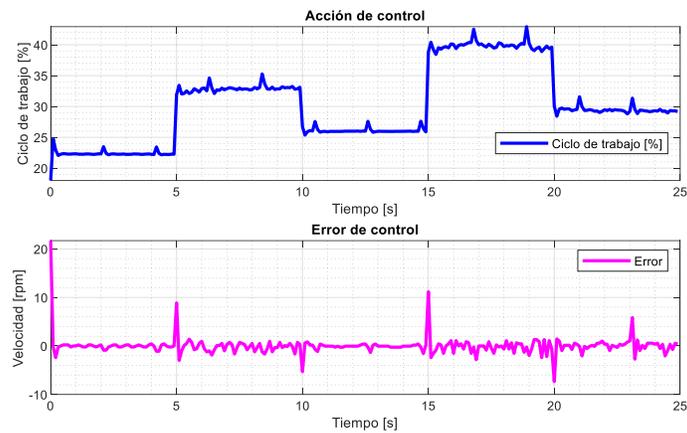
Set Point - Velocidad de motor derecho (Regulación)



El error y las acciones de control determinadas se observan en la Figura 74.

Figura 74

Acciones de control y error para regulación del motor izquierdo

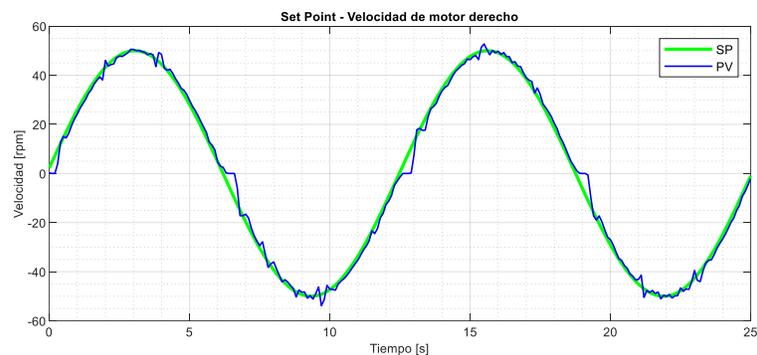


Seguimiento. La tarea de seguimiento permite evaluar el desempeño del controlador PID discreto para referencias variables. La prueba consiste en generar una curva senoidal de velocidades, lo que permitirá visualizar el desempeño del controlador para seguimiento. Las velocidades para el seguimiento se determinarán en el tiempo en base a la ecuación (75):

$$\omega_{ref} = 50 \sin\left(\frac{t}{2}\right) \quad (75)$$

Figura 75

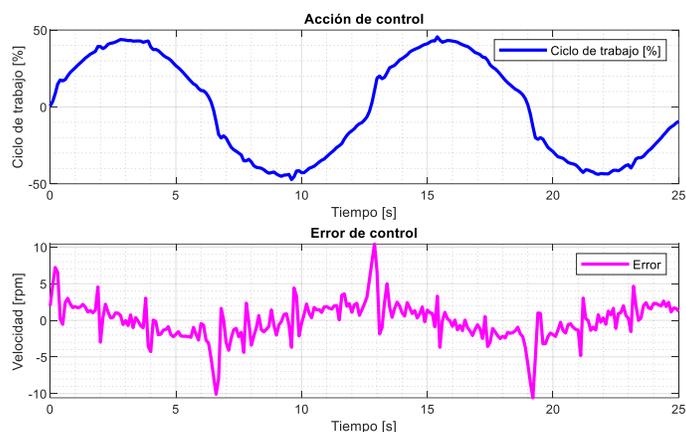
Set Point - Velocidad de motor derecho (Seguimiento)



La Figura 76 muestra el ciclo de trabajo utilizado para accionar los motores y el error que se genera, el cual tiende a oscilar en las cercanías a cero.

Figura 76

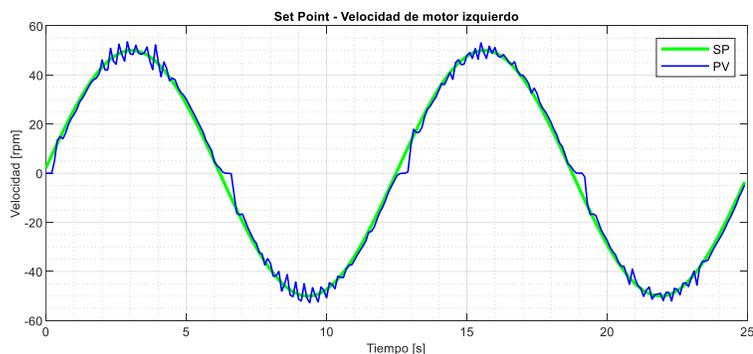
Acciones y error de control para seguimiento de controlador de motor derecho



La Figura 77 se evidencia el desempeño del motor izquierdo para la tarea de seguimiento de velocidad. En la gráfica se aprecia un leve comportamiento oscilatorio en las crestas de la función.

Figura 77

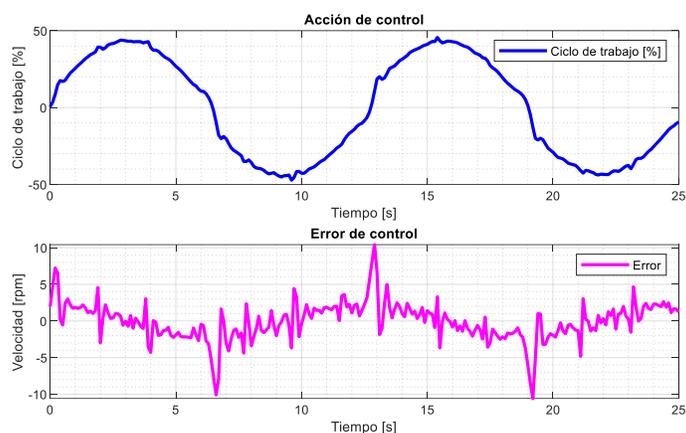
Set Point - Velocidad de motor izquierdo (Seguimiento)



Las acciones de control para generar la tarea de seguimiento del motor izquierdo, al igual que los errores calculados se muestran en la Figura 78.

Figura 78

Acciones y error de control para seguimiento de controlador de motor izquierdo



Controlador de medio nivel

El controlador de medio nivel permite regular la posición del robot en el plano cartesiano mediante el controlador cinemático apoyado del controlador de bajo nivel, por tal motivo las pruebas se realizan para cada cuadrante con la finalidad de evidenciar el comportamiento de la silla para diferentes entradas de regulación.

Regulación de posición en el primer cuadrante. La prueba para este cuadrante se basa en los parámetros mostrados en la Tabla 24. Se considera que el lazo de control finaliza cuando el punto de control se haya aproximado un error aceptable a la referencia propuesta.

Tabla 24

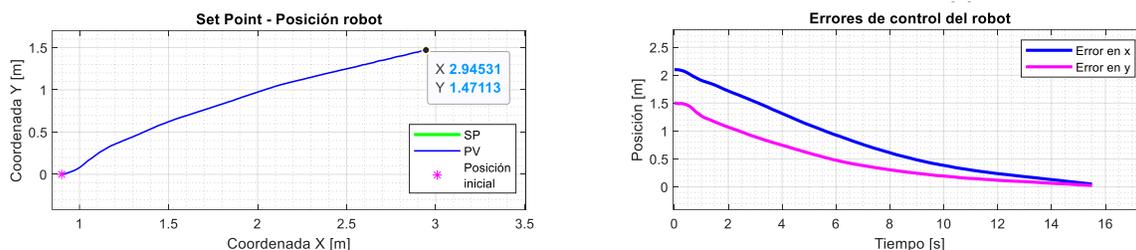
Parámetros para prueba de regulación de posición (1er cuadrante)

	X	Y
Set Point [m]	3	2
Posición inicial [m]	0	0.9
Error aceptado [m]	0.05	0.05

La Figura 79 muestra la trayectoria que realiza el robot para llegar del punto inicial al Set Point en el primer cuadrante. De la misma forma se evidencia como los errores de control en cada eje disminuyen y se aproximan a cero. El lazo de control finaliza cuando el punto de control ha cumplido un error con tolerancia de 5 cm.

Figura 79

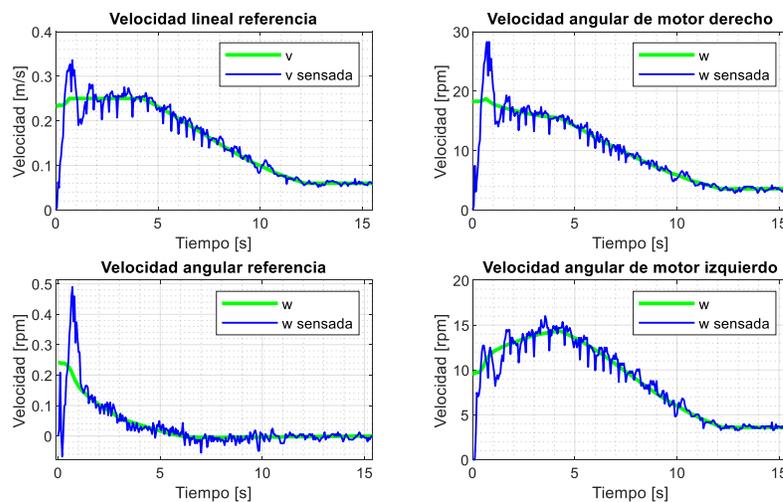
Trayectoria de regulación de posición y error de control (1er cuadrante)



Para lograr la tarea de regulación se generaron las acciones de control cinemático y de PID discreto mostradas en la Figura 80.

Figura 80

Acciones de control para tarea de regulación (1er cuadrante)



Nota. Acciones de control de velocidad lineal y velocidad angular del robot y de cada motor para regulación de posición en el primer cuadrante.

Regulación de posición en el segundo cuadrante. Los parámetros para la prueba del segundo cuadrante se muestran en la Tabla 25.

Tabla 25

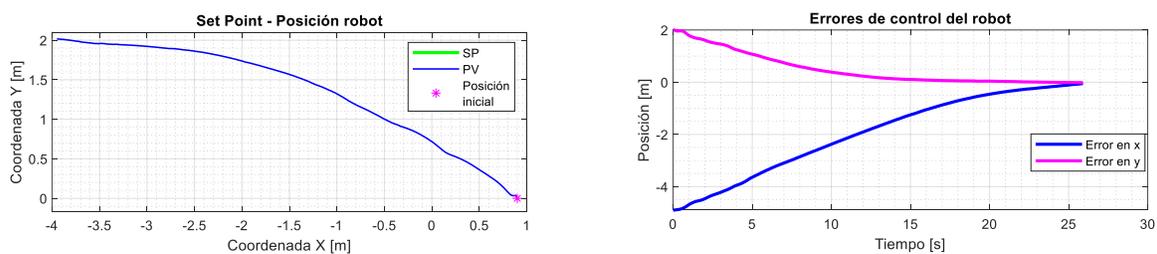
Parámetros para prueba de regulación de posición (2do cuadrante)

	X	Y
Set Point [m]	-4	2
Posición inicial [m]	0	0.9
Error aceptado [m]	0.05	0.05

La Figura 81 evidencia la trayectoria del punto de control para evolucionar desde la posición inicial a la posición final una vez alcanzado el error aceptable.

Figura 81

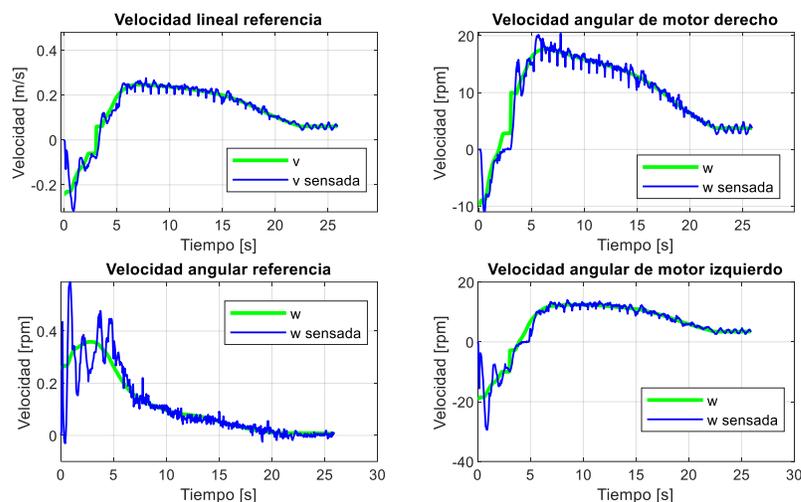
Trayectoria de regulación de posición y error de control (2do cuadrante)



Las acciones de control para ejecutar dicha tarea se observan en la Figura 82.

Figura 82

Acciones de control para tarea de regulación (2do cuadrante)



Regulación de posición en el tercer cuadrante. Los parámetros para la prueba de regulación de posición en el tercer cuadrante se muestran en la Tabla 26.

Tabla 26

Parámetros para prueba de regulación de posición (3er cuadrante)

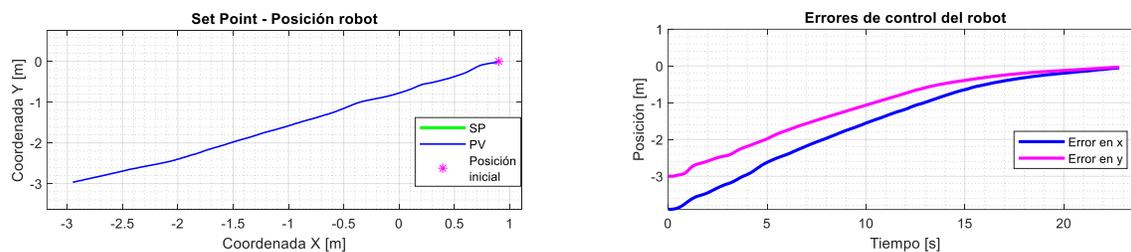
	X	Y
Set Point [m]	-3	-3
Posición inicial [m]	0	0.9
Error aceptado [m]	0.05	0.05

Nota. Parámetros de referencia, posición inicial y error permisible para la prueba de regulación de posición en el tercer cuadrante.

La Figura 83 muestra la trayectoria generada por el punto de control y el error en cada eje.

Figura 83

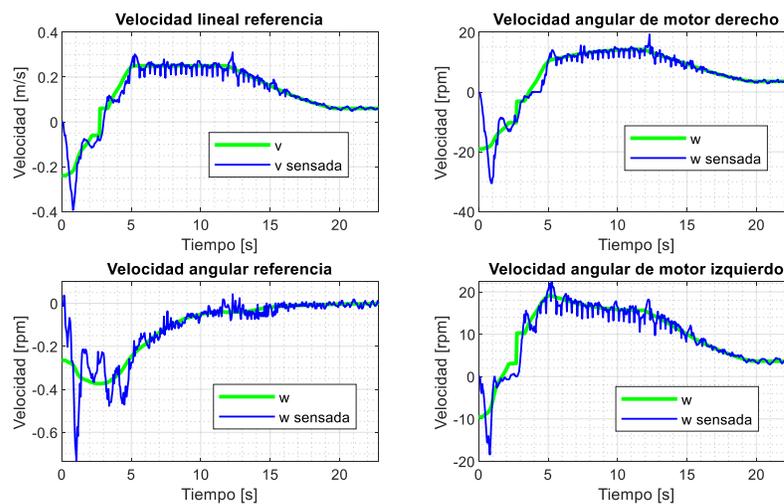
Trayectoria de regulación de posición y error de control (3er cuadrante)



La Figura 84 muestra las acciones de control generadas para la prueba en el tercer cuadrante.

Figura 84

Acciones de control para tarea de regulación (3er cuadrante)



Regulación de posición en el cuarto cuadrante. La Tabla 27 detalla los parámetros de Set Point, posición inicial y error aceptable para ejecutar la prueba de regulación de posición en el cuarto cuadrante.

Tabla 27

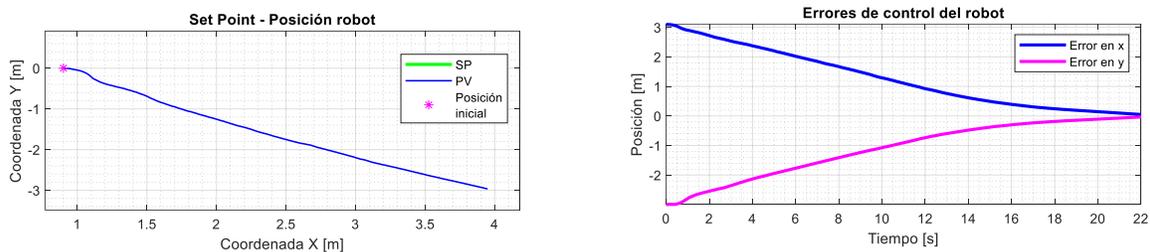
Parámetros para prueba de regulación de posición (3er cuadrante)

	X	Y
Set Point [m]	4	-3
Posición inicial [m]	0	0.9
Error aceptado [m]	0.05	0.05

La Figura 85 evidencia la trayectoria generada por el robot para alcanzar el punto de referencia, al igual que los errores de control que tienden a cero a medida que se regula la posición.

Figura 85

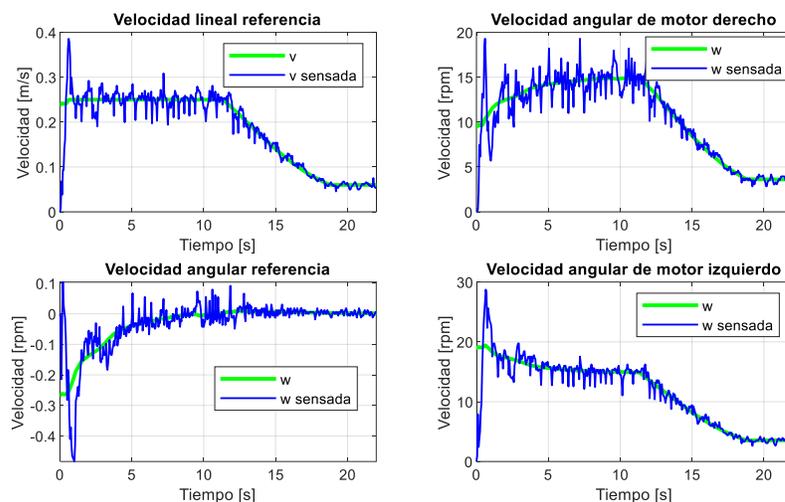
Trayectoria de regulación de posición y error de control (4to cuadrante)



La Figura 86 muestra las acciones de control calculadas para cumplir la tarea de regulación en el cuarto cuadrante. Como se puede observar, el controlador sigue a la referencia de las acciones de control.

Figura 86

Acciones de control para tarea de regulación (4to cuadrante)



Giro a la derecha. Para el comando de giro a la derecha se realiza una prueba de rotación en el propio eje con velocidad angular constante negativa, la cual genera el movimiento de rotación en el robot. Los parámetros de esta prueba se observan en la Tabla 28.

Tabla 28

Parámetros para prueba de regulación de orientación (giro a la derecha)

	X [m]	Y [m]	Phi [rad]
Set Point	-0.9	0	-3.14
Posición inicial	0	0.9	0
Error aceptado [rad]	-	-	0.05

La Figura 87 muestra la trayectoria generada por el punto de control, evidenciando una rotación alrededor del origen hasta alcanzar el punto de referencia, determinado por la evolución del ángulo de orientación del robot. Las acciones de control generadas se visualizan en la Figura 88.

Figura 87

Trayectoria de regulación de orientación y error de control (giro a la derecha)

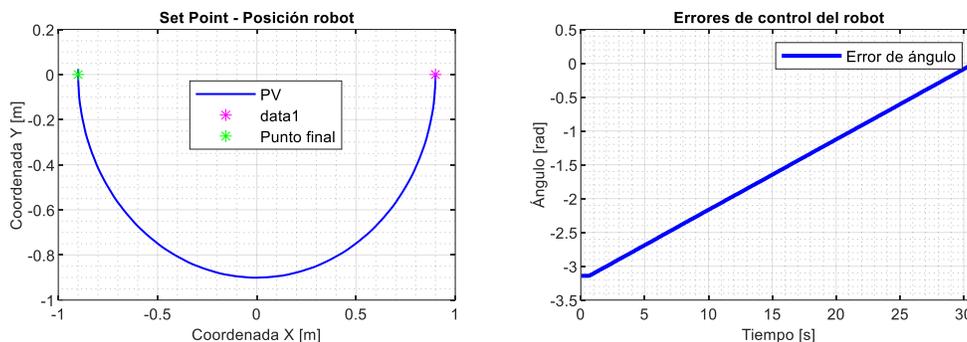
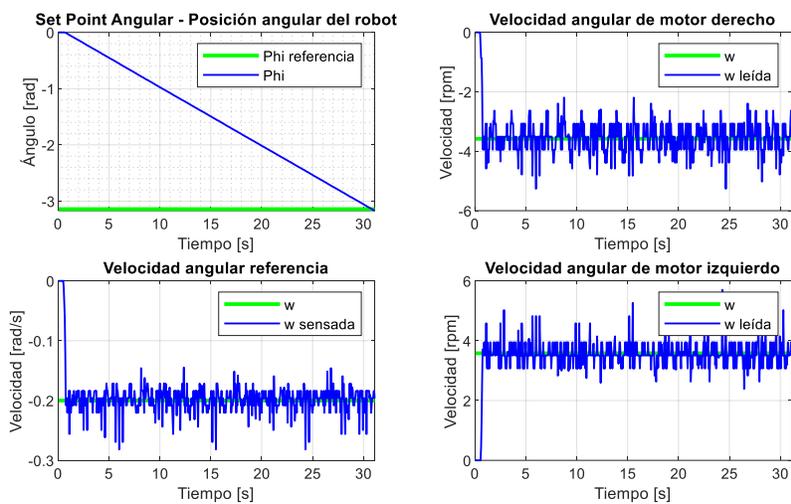


Figura 88

Regulación de orientación y acciones de control (giro a la derecha)



Giro a la izquierda. La Tabla 29 detalla los parámetros para realizar la prueba del control de regulación de rotación para el giro a la izquierda. El valor de regulación para este caso es el ángulo del robot.

Tabla 29

Parámetros para prueba de regulación de orientación (giro a la izquierda)

	X [m]	Y [m]	Phi [rad]
Set Point	-0.9	0	3.14
Posición inicial	0	0.9	0
Error aceptado [rad]	-	-	0.05

La Figura 89 muestra la trayectoria generada por el punto de control evidenciando una rotación en el mismo eje y llegando a la referencia deseada ya que el error de control disminuye con el tiempo y tiende a cero. Las acciones de control se observan en la Figura 90.

Figura 89

Trayectoria de regulación de orientación y error de control (giro a la izquierda)

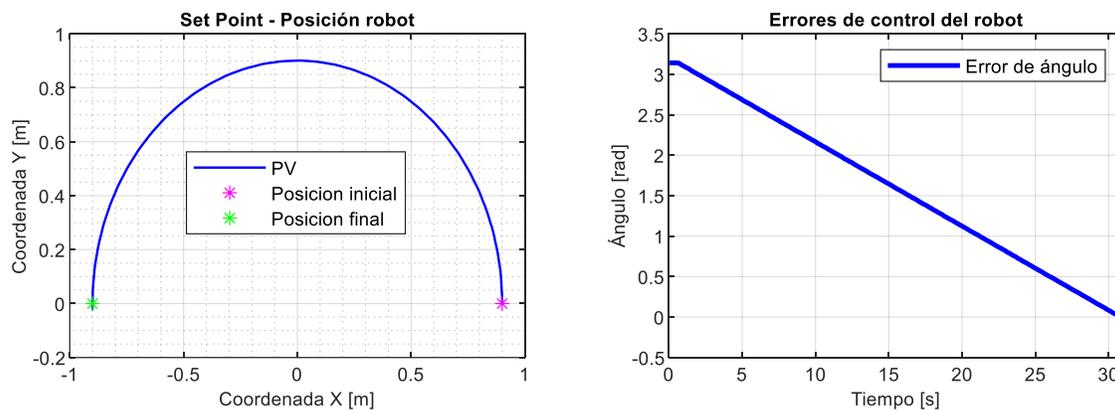
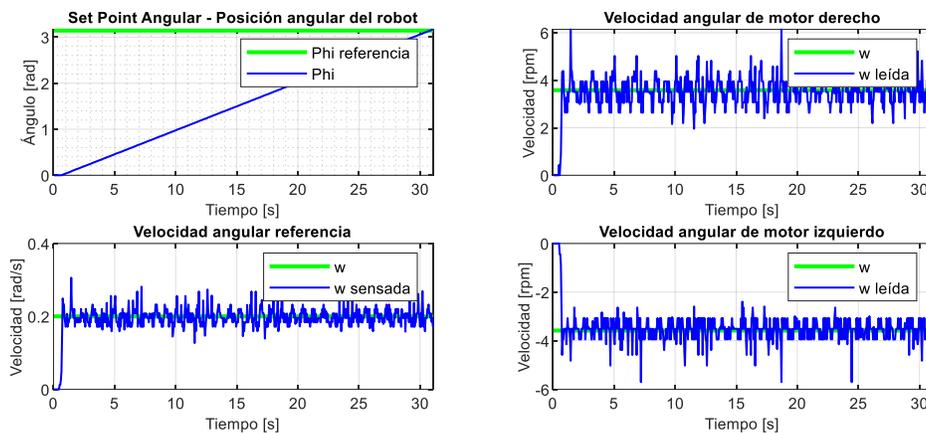


Figura 90

Regulación de orientación y acciones de control (giro a la izquierda)



Controlador de alto nivel

Para las pruebas del controlador de alto nivel se determina una velocidad constante con la que el controlador debe dar seguimiento a la trayectoria. De la misma forma se redefine un perfil parametrizado que debe seguir el robot.

Comando hacia adelante. El perfil que debe seguir el robot se define mediante las ecuaciones paramétricas (76):

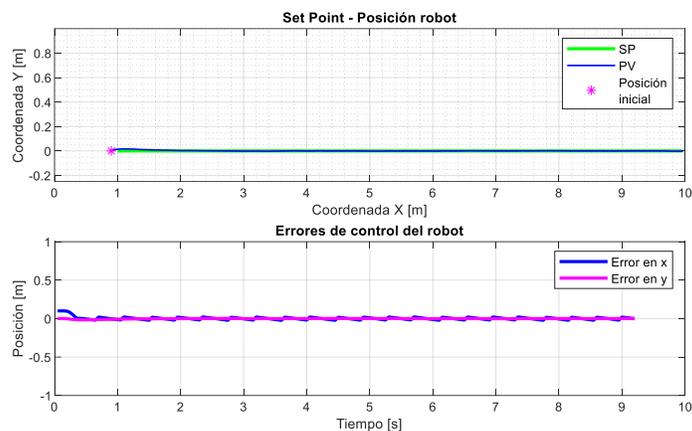
$$\begin{aligned}xr &= t \\ yr &= 0\end{aligned}\tag{76}$$

Con $t \in [0.9, 10]$ y una velocidad de seguimiento de $0.2 \frac{m}{s}$.

La Figura 91 muestra la trayectoria generada por el robot para el movimiento hacia adelante, evidenciando que se da seguimiento a una línea recta. Los errores de control se encuentran enclavados en cero.

Figura 91

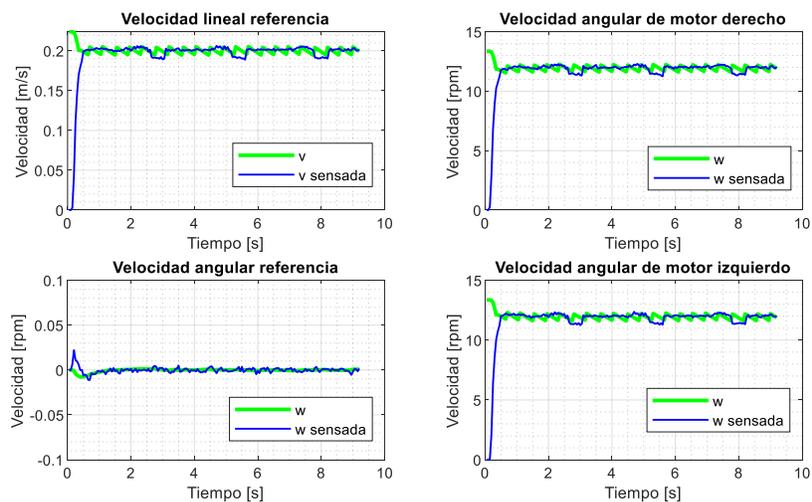
Trayectoria y errores de control (hacia el frente)



La Figura 92 evidencia las acciones de control de velocidad lineal y velocidad angular tanto del robot como de cada rueda.

Figura 92

Acciones de control de seguimiento de camino (hacia el frente)



Comando hacia atrás. El perfil que debe seguir el robot para este comando se define mediante las ecuaciones paramétricas (77):

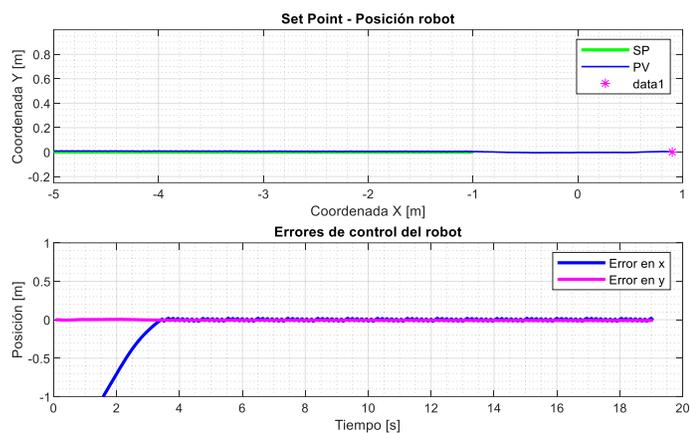
$$\begin{aligned}xr &= -t \\ yr &= 0\end{aligned}\tag{77}$$

Con $t \in [0.9, -10]$ y una velocidad de seguimiento de $-0.1 \frac{m}{s}$.

La Figura 93 muestra la trayectoria generada por el robot al igual que los errores de control de cada eje, los cuales evidencian que el robot sigue de forma adecuada el perfil requerido.

Figura 93

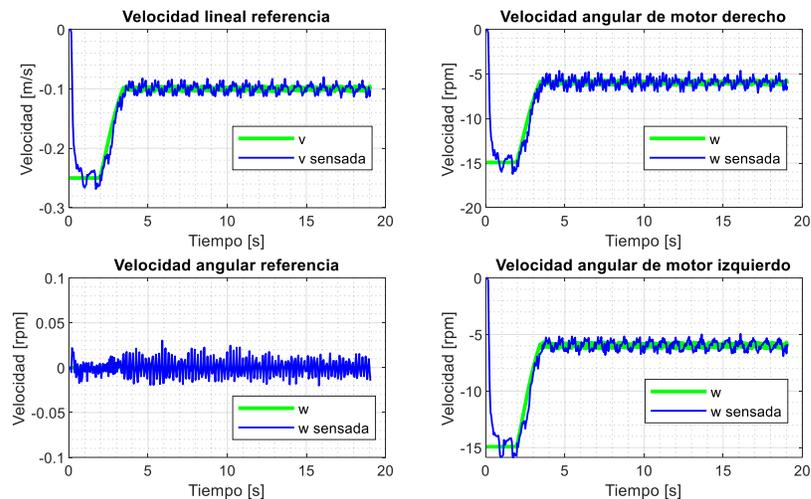
Trayectoria y errores de control (hacia atrás)



La Figura 94 muestra las acciones de control para la tarea de seguimiento del perfil hacia atrás.

Figura 94

Acciones de control de seguimiento de camino (hacia atrás)



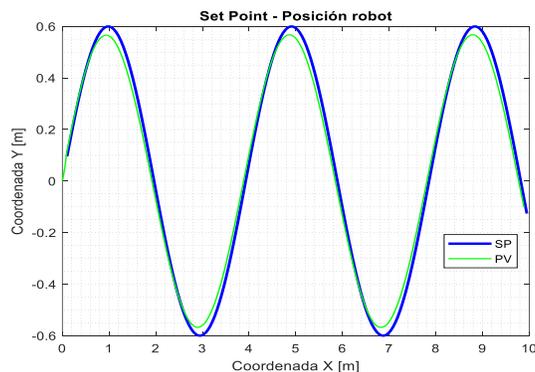
Adicionalmente se generan trayectorias paramétricas para evaluar el desempeño de seguimiento de camino del controlador cinemático.

Trayectoria senoidal. La trayectoria parametrizada que se requiere ejecutar se define en las ecuaciones (78):

$$\begin{aligned} x_r &= 0.5t \\ y_r &= 0.6 \sin(0.8t) \end{aligned} \quad (78)$$

Figura 95

Trayectoria deseada - Trayectoria realizada (Senoidal)



La Figura 95 muestra la trayectoria generada y la trayectoria deseada, demostrando que el controlador puede seguir perfiles parametrizados.

Finalmente se evalúa el desempeño del controlador de camino con ecuaciones paramétricas que generan una trayectoria en forma de infinito.

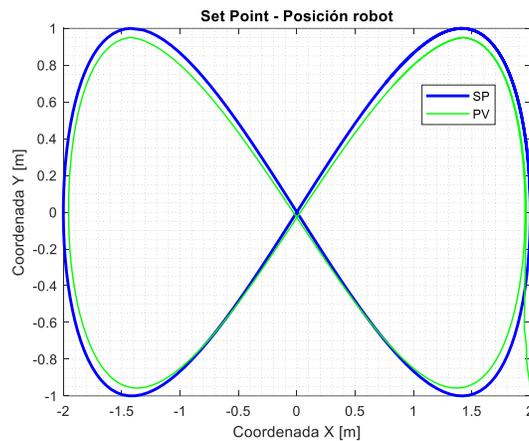
Trayectoria Infinito. Las ecuaciones paramétricas de la trayectoria Infinito se muestran en las ecuaciones (79).

$$\begin{aligned}xr &= 2 \cos(0.5t) \\ yr &= \sin(t)\end{aligned}\tag{79}$$

La Figura 96 muestra la trayectoria deseada y la trayectoria generada, por lo que se puede concluir que el controlador permite seguir diferentes perfiles parametrizados de forma adecuada.

Figura 96

Trayectoria deseada - Trayectoria realizada (Infinito)



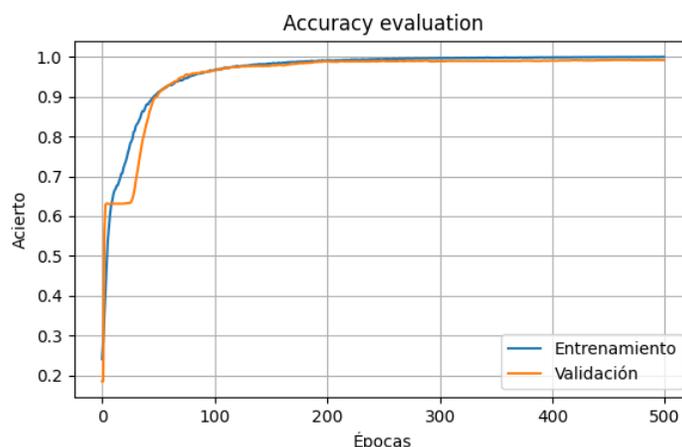
Sistema de reconocimiento de la palabra clave

El modelo de reconocimiento de voz de una palabra clave recibe como parámetros de entrada los coeficientes cepstrales de frecuencias Mel y luego ingresa a una arquitectura de redes neuronales convolucionales para clasificar mediante la asignación de 500 épocas de entrenamiento, tamaño de lote de 1000 muestras y una tasa de aprendizaje de 0.00001 con la función de optimización de ADAM.

A la salida de la red neuronal descrita en la Figura 67 está implementada la función de activación Softmax que entrega los valores en un rango de $[0, 1]$ y en la Figura 97 se evidencia una falta de ajuste del modelo (Underfitting) antes de la época 50 y en las siguientes épocas la función de precisión en el entrenamiento y validación tiende a converger a 1.

Figura 97

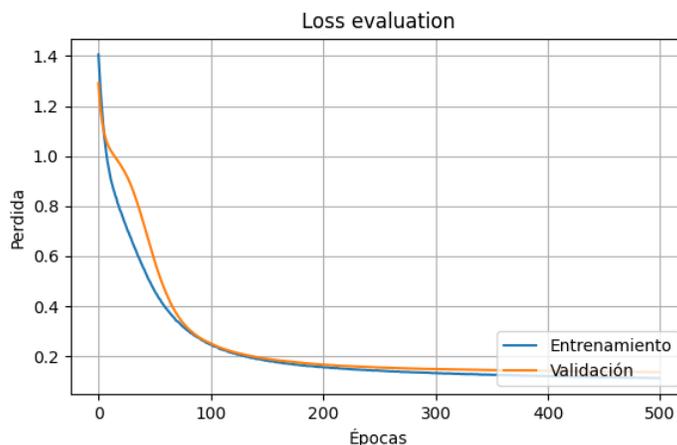
Desarrollo de las funciones de acierto en el entrenamiento y validación.



En la Figura 98, se evidencia una falta de ajuste del modelo (Underfitting) antes de la época 80, pero para las épocas posteriores la función de pérdida en el entrenamiento y validación tiende a converger a 0, garantizando que el modelo sea correcto y no se evidencie presencia de sobre entrenamiento (Overfitting).

Figura 98

Desarrollo de las funciones de pérdida en el entrenamiento y validación.



Matriz de Confusión

A continuación, la Figura 99 muestra la matriz de confusión generada con el conjunto de datos de prueba, en donde se evidencia que las categorías “MARA” y “Vacío” tienen una precisión y sensibilidad del 100%, mientras que la categoría “Detente” tiene una precisión del 99.65% pero una sensibilidad del 99.90%, por lo tanto, el modelo de inteligencia artificial tiene un nivel de acierto en las predicciones del 99.93% con respecto a los datos de prueba.

Figura 99

Matriz de confusión con el conjunto de datos de prueba.

Categorías Verdaderas	MARA	301 18.81%	0 0.00%	0 0.00%	100.00%
	DETENTE	0 0.00%	288 18.00%	0 0.00%	100.00%
	VACÍO	0 0.00%	1 0.06%	1010 63.12%	99.90%
		100.00%	99.65%	100.00%	Acierto 99.93%
		MARA	DETENTE	VACÍO	
		Categorías Predecidas			

A continuación, en la Figura 100 se muestra la matriz de confusión generada con el conjunto de datos de validación, en donde se evidencia que las categorías “MARA”, “Detente” y “Vacío” tienen una precisión del 100% y una sensibilidad del 100%, por lo tanto, el modelo de inteligencia artificial tiene un nivel de acierto en las predicciones del 100% con respecto a los datos de validación.

Figura 100

Matriz de confusión con el conjunto de datos de validación.

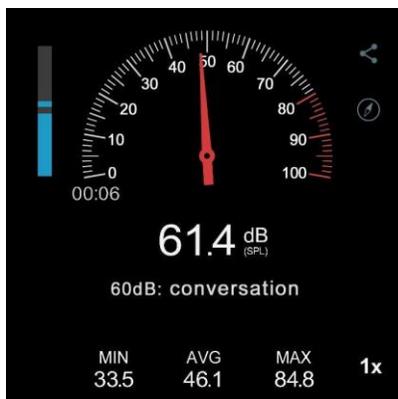
Categorías Verdaderas	MARA	287 17.93%	0 0.00%	0 0.00%	100.00%
	DETENTE	0 0.00%	303 18.93%	0 0.00%	100.00%
	VACÍO	0 0.00%	0 0.00%	1010 63.12%	100.00%
		100.00%	100.00%	100.00%	Acierto 100.00%
		MARA	DETENTE	VACÍO	
		Categorías Predecidas			

Ensayo de reconocimiento de la palabra clave

En este ensayo pretende evaluar las habilidades comunicativas del usuario, la recepción de información y clasificación de las categorías “MARA”, “Detente” y “Vacío” por parte de la inteligencia artificial. En la Figura 101 se evidencia el nivel de presión sonora generado por el usuario al momento de comunicar de forma verbal los comandos de voz, en donde se evidencia un valor máximo de 84.8 dB y un valor mínimo de 33.5 dB.

Figura 101

Rango de presión sonora al momento de establecer los comandos de voz.



En la Figura 102, se evidencia que el robot bajo condiciones normales de funcionamiento genera un nivel de presión sonora de 31.6 a 38.7 dB y se asume como el rango base de funcionamiento del equipo.

Figura 102

Rango de presión sonora del robot en condiciones normales.



En la Tabla 30, se verifica la robustez del reconocimiento de palabras aisladas en tiempo real por el concepto de 50 iteraciones por cada una de las categorías “MARA”, “Detente” y “Vacío” en condiciones variables de presión sonora y ruido.

Tabla 30

Pruebas del reconocimiento de la palabra clave de la categoría Detente.

Rangos de presión sonora [dB]	Aciertos de la categoría “MARA”	Aciertos de la categoría “Detente”	Aciertos de la categoría “Vacío”	Porcentaje de acierto	Porcentaje de error
30-40	50	50	50	100.00%	0.00%
40-50	49	50	50	99.33%	0.66%
50-60	47	48	50	96.66%	3.33%
60-70	41	43	40	82.66%	17.33%

Ensayo del reconocimiento de comandos de voz

En este ensayo se pretende evaluar la recepción de información y categorización de los comandos de voz en las diferentes acciones de movimiento del robot. Por lo tanto, en este ensayo se procede a evaluar 50 veces cada comando de voz para verificar que lo que el usuario dice realmente entiende el robot y lo realiza.

Tabla 31

Resultados obtenidos en el reconocimiento de comandos de voz.

Comando de voz	Número de ensayos	Iteraciones asertivas	Porcentaje de acierto	Porcentaje de error
Girar a la derecha	50	47	94%	6%
Girar a la izquierda	50	47	94%	6%
Hacia el frente	50	48	96%	4%
Hacia atrás	50	46	92%	8%
Coordenadas XY	50	45	90%	10%

Comando de voz	Número de ensayos	Iteraciones asertivas	Porcentaje de acierto	Porcentaje de error
Información	50	46	92%	8%
Hola	50	46	92%	8%
Apágate	50	45	90%	10%
Reiníciate	50	46	92%	8%

De acuerdo con los resultados obtenidos en la Tabla 31, se evidencia que la conversión de voz a texto mantiene como mínimo un porcentaje de acierto del 90% para valores de ruido que no superen los 40 dB. Pero como todo sistema de reconocimiento de voz, para valores de ruido elevados el porcentaje de acierto disminuye considerablemente.

Resultados del usuario

Para la evaluación del prototipo se realizan pruebas de funcionamiento con José Luis Gavilanes, paciente con tetraplejia del Patronato Municipal Amparo Social de Latacunga, quien pone a prueba todas las funcionalidades de la silla inteligente. Con la ayuda y coordinación del Mg. Carlos López, las pruebas se realizaron en las instalaciones del patronato, con la finalidad evaluar el desempeño del robot en el ambiente en el que el paciente se desenvuelve para cumplir sus sesiones de fisioterapia. La encuesta completa se detalla en el Anexo 14 y los resultados se evidencian en la Tabla 32.

Una vez finalizada la prueba con todos los comandos, movimientos e interacciones que permite la silla inteligente, se procede a evaluar mediante una encuesta la opinión del usuario y la opinión del fisioterapeuta para evidenciar el apoyo que el dispositivo brinda para mejorar la movilidad de una persona con tetraplejia. La encuesta incorpora preguntas que permiten evaluar de forma cualitativa la experiencia del usuario en cuanto a estabilidad de movimientos, sensación de seguridad al utilizar la silla de ruedas, cuán útil son los comandos que el prototipo

dispone para moverse y el apoyo que puede brindarle utilizar este equipo para su día a día.

La escala de calificación tiene un rango del 0 al 3, con las siguientes ponderaciones:

- Malo
- Regular
- Bueno
- Excelente

Tabla 32

Resumen de la encuesta realizada.

Pregunta	Paciente	Fisioterapeuta
¿El prototipo ayuda a moverse de forma autónoma?	3	3
¿Cómo calificas la estabilidad de los movimientos?	3	3
¿Cómo calificas la comodidad de la silla?	3	3
¿Qué sensación de seguridad te da utilizar la silla?	3	3
¿Cómo calificas la velocidad al moverte hacia el frente?	3	3
¿Cómo calificas la velocidad al moverte hacia atrás?	3	3
¿Cómo calificas la experiencia al dar los comandos de giro?	2	2
¿Cómo calificas la reacción del equipo a obstáculos?	2	2
¿Qué tan fácil te resulta maniobrar el equipo?	2	2
¿Cómo calificas el reconocimiento de los comandos?	3	2
¿Cómo calificas la interacción con MARA?	3	3
¿Cómo calificas la detección del comando "MARA" y "detente"?	3	3
¿Qué nivel de utilidad percibes en los comandos de voz que incorpora MARA?	3	3

Pregunta	Paciente	Fisioterapeuta
¿Cómo calificas tu nivel de satisfacción al utilizar la silla de ruedas inteligente?	3	2
Total	39	37
Promedio	2.78	2.64

Los resultados de la encuesta se muestran en la Tabla 28, la cual resume las respuestas del paciente y el fisioterapeuta en cuanto a aspectos de movilidad, seguridad, estabilidad y experiencia en el uso de la silla de ruedas robótica. La puntuación obtenida en la encuesta tiene un promedio superior a 2.5, con lo que se puede evidenciar que el prototipo efectivamente ayuda a personas en estas condiciones a moverse.

Capítulo VIII

Conclusiones y Recomendaciones

Conclusiones

Se diseñó y construyó una silla de ruedas inteligente con un sistema embebido que permite aislar los comandos de voz y convertirlos en valores deseados para el controlador robótico mediante la cinemática móvil de un robot diferencial para contribuir en la autonomía móvil de una persona tetrapléjica.

La investigación sobre el estado actual de la robótica asistencial enfocada a personas con discapacidad permite concluir que es un área cuyas bases de desarrollo se encuentran sentadas en proyectos como el brazo robótico para ayudar en la comunicación de personas sordociegas, o prototipos que implementan sensores que captan ondas cerebrales para movilizar una silla de ruedas que permitiría asistir a personas con discapacidad.

La investigación de los trabajos relacionados con robótica asistencial para personas con discapacidad física permitió figurar la propuesta de diseño, la cual consiste en un equipo robótico que permite generar movilidad autónoma mediante la implementación de un sistema de reconocimiento de voz, lo que aprovecha las facultades mentales y lingüísticas de una persona tetrapléjica.

Se investigó los parámetros de diseño a partir de las limitaciones físicas de personas con tetraplejía y como la robótica asistencial en combinación de equipos mecatrónicos puede subsanar las dificultades motrices para mejorar la calidad de vida física y emocional de las personas con discapacidad.

Se diseñó el sistema mecánico de la silla de ruedas en base a las medidas antropométricas del usuario y la normativa ISO 7176-5 para definir las dimensiones externas del equipo, en donde se selecciona el material de acuerdo con los cálculos mecánicos con un

factor de seguridad superior 2 y se establece zonas seguras contra el volcamiento a partir de un análisis estático en planos inclinados.

Los elementos seleccionados para la implementación del circuito eléctrico de control y de potencia, como el dimensionamiento de motores y la selección de controladores permitieron generar los movimientos básicos que permiten dar autonomía móvil a una persona tetrapléjica. La selección de dispositivos embebidos posibilitó construir una arquitectura distribuida para el reconocimiento de voz y la ejecución del algoritmo de control.

El sistema de control basado en el comportamiento inverso de la planta permitió ejecutar movimientos automáticos y controlados mediante la implementación de un algoritmo de control de regulación, para posicionamiento de la silla en un punto específico en el plano y para regulación de orientación; y un algoritmo de seguimiento de camino, el cual permite seguir trayectorias predefinidas y con ello, asegurar que la silla de seguimiento a tramos rectilíneos en movimientos longitudinales de forma automática y estable.

Se desarrolló el sistema de reconocimiento de voz con dos niveles, el primero permite la activación por medio de una palabra clave mediante la conversión del sonido a coeficientes cepstrales de frecuencias Mel a través de un interfaz de adquisición de audio, entrenamiento y exportación de un modelo de inteligencia artificial, la segunda etapa es la conversión de voz a texto que busca los comandos de movimiento por medio de kit de herramientas de VOSK y que permite la interacción del paciente con la silla de ruedas.

Las pruebas experimentales permitieron evidenciar la asistencia que representa el prototipo en la movilidad autónoma de un paciente con tetraplejia, el cual califica el desempeño de la silla de ruedas inteligente como una experiencia segura, estable y funcional que le permite recuperar gran parte de su movilidad autónoma al comandar los movimientos por medio de una interfaz de voz e independizándose de una tercera persona para trasladarse.

Recomendaciones

Al trabajar con motores de corriente continua se recomienda controlarlos con una frecuencia de ciclo de trabajo superior al 10 KHz ya que valores inferiores generan un sonido audible al oído humano incómodo.

El sistema de localización del robot se basa en el conteo de pulsos del encoder, el cual no distingue deslizamiento y tampoco considera superficies desniveladas, por lo que la estimación de posición es eficiente solo en superficies planas, por tal motivo es importante considerar otro tipo de sensores para estimar la posición, como unidades de medición inercial o acelerómetros.

En la implementación de un algoritmo de inteligencia artificial es necesario conectar TensorFlow con la tarjeta gráfica mediante la instalación de los drivers de Nvidia, las herramientas de CUDA y cuDNN para aumentar la velocidad de procesamiento durante el entrenamiento de la red neuronal.

Es importante verificar que al tener una función de activación Softmax a la salida de una red neuronal, la gráfica resultante del nivel de acierto de las funciones de validación y entrenamiento deben converger a 1 de forma unánime para garantizar que el modelo sea correcto y no se evidencie presencia de sobre entrenamiento (Overfitting).

La silla de ruedas inteligente permite dar autonomía móvil al ser desarrollada para un usuario con tetraplejía, pero es de suma importancia que el uso del equipo sea supervisado por una persona y/o familiar para evitar comprometer la integridad física y/o patrimonial.

Punto de Vista sobre el Equipo Robótico

Una vez finalizadas todas las pruebas de la silla de ruedas inteligente, se le solicitó la opinión al fisioterapeuta Mg. Carlos López Sandoval, como parte médica en el desarrollo del proyecto; y a José Luis Gavilanes, paciente con tetraplejia que fue la persona que evaluó el

desempeño de la silla. El testimonio de la parte especialista y el usuario final permiten evidenciar el aporte de este proyecto para mejorar la calidad de vida de personas tetraplégicas.

Aporte del Mg. Carlos López Sandoval:

“Soy el Mg. Carlos López Sandoval, soy fisioterapeuta del Patronato Municipal de Latacunga por 20 años, estoy a cargo del caso de José Luis Gavilánez, quien tiene una tetraplejía espástica, esta lesión lo limitó a una silla de ruedas por más de algunos años y fue esperanzador desde el inicio escuchar que los chicos Joel Veintimilla y Pablo Taboada tenían el deseo de generar un proyecto que le permitiera independizarse, mediante una lluvia de ideas con los conocimientos de ellos y la tutoría de la Ing. Patricia Constante han desarrollado este proyecto en conjunto con nosotros para que pueda tener autonomía e independencia, como bien lo dijo la silla de mecatrónica, el proyecto “MARA”, permite que José Luis pueda desplazarse y venir a sus terapias para continuar con un proceso de mantenimiento. El objetivo va más allá, quiero felicitar a los jóvenes y futuros ingenieros Joel Veintimilla y Pablo Taboada por el esfuerzo plasmado en este proyecto, felicitar a la ESPE, a la carrera de mecatrónica y a la Ing. Patricia Constante”.

Aporte de José Luis Gavilánez:

“Mi nombre es José Luis Gavilanes y soy paciente de fisioterapia del Patronato Municipal Amparo Social de Latacunga. Sufrí un accidente de tránsito en el que me fracturé las cervicales C3 y C4, a consecuencia de eso quedé tetraplégico. Gracias a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, al área de Mecatrónica y a los estudiantes que han podido crear esta silla para poder independizarme, ya que es manejada mediante comando de voz y anteriormente tenía que apoyarme de mis familiares y una silla de ruedas manual. Agradezco a los estudiantes que han pensado en esta idea, ya que al utilizar la silla puedo movilizarme a través de la voz y ser más independiente. Que esto sea base para futuros proyectos”.

Trabajos Futuros

Optimizar el algoritmo de control de la silla de ruedas que permita generar movimientos más específicos y de esta forma, mejore la maniobrabilidad al usuario. Por ejemplo, el controlador de camino se puede utilizar para generar trayectorias predefinidas en base a puntos interpolados, con lo que la silla de ruedas podría dar seguimiento a cualquier trayectoria, inclusive formulada por comandos de voz. Adicionalmente, se puede mejorar el algoritmo de evasión de obstáculos, lo que permite tener mayor libertad de navegación autónoma.

La experiencia del usuario se puede mejorar implementando funciones de entretenimiento como lectura de libros electrónicos, reproducción de música, aprovechando las prestaciones de la tarjeta Raspberry Pi 4 Model B. Para mejorar la interacción del usuario con el medio físico, la silla de ruedas puede conectarse a un sistema IoT de una casa inteligente para encendido de luces, abrir y cerrar puertas, activación de artefactos como aire acondicionado, etc.

El objetivo de este proyecto a largo plazo es de ser pionero en mejorar la situación de vida de miles de personas en estado de discapacidad, al desarrollar un robot asistencial que puedan mejorar la autonomía e independencia móvil y en un futuro tengan igualdad de posibilidades para una reinserción progresiva en el campo laboral.

Bibliografía

- Adamssen, J. (2020). *Inteligencia artificial cómo el aprendizaje automático, la robótica y la automatización han dado forma a nuestra sociedad* (Vol. 1).
- AEC. (2022, enero 1). *Batería recargable seca acido plomo 12 voltios 24 amperios 20 horas*. Distribuciones AEC. <https://distribuciones-aec.com/producto/bateria-recargable-seca-12-voltios-24-amperios/>
- Aguinaga, M., & Gómez, A. (2019). *Parlante inteligente basados en sistemas empotrados para el control de dispositivos electrónicos mediante voz para personas con incapacidad de movimiento* [Tesis de Pregrado, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE]. <http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/21088/1/T-ESPE-039871.pdf>
- Alpha Cephei. (2023). *VOSK Offline Speech Recognition API*. Alpha Cephei. <https://alphacephei.com/vosk/>
- Aracil, R., Balaguer, C., & Armada, M. (2008). Robots de servicio. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI*, 5(2), 6-13. [https://doi.org/10.1016/S1697-7912\(08\)70140-7](https://doi.org/10.1016/S1697-7912(08)70140-7)
- Aranda, E., Salgado, T., & Velasco, M. (2002). Control no Lineal Discontinuo de un Robot Móvil. *Computación y Sistemas, Especial(E)*, 42-49. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=61509907>
- Arumugam, R., & Shanmugamani, R. (2018). *Hands-On Natural Language Processing with Python* (Packt).
- Atienza, R. (2018). Convolutional Neural Network (CNN). En J. Gonsalves, I. Hough, K. Sonawane, & S. Editing (Eds.), *Advanced deep learning with TensorFlow 2 and Keras* :

apply DL, GANs, VAEs, deep RL, unsupervised learning, object detection and segmentation, and more (2.^a ed., Vol. 1, pp. 27-30). Packt.

Avila, R., Prado, L., & González, E. (2007). Medidas antropométricas de población laboral de 20 a 59 años. En E. López & V. Ramírez (Eds.), *Dimensiones antropométricas de la población latinoamericana : México, Cuba, Colombia, Chile* (2.^a ed., Vol. 1, pp. 201-202). Universidad de Guadalajara.

<https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/14486/2018sergioboh%C3%B3rquez4.pdf?sequence=6&isAllowed=y>

Bestcell. (2022, enero 1). *Micrófono razer seiren mini mercury ultra compact pink usb*. Bestcell.

<https://www.bestcell.com.ec/producto/microfono-razer-seiren-mini-mercury-pink>

Bosch. (2022). *Bateria N40 FE I S3*. <https://www.boschecuador.com/shop/producto?id=2332>

Castanier, D., & Mendiá, E. (2018). *Diseño, construcción e implementación de una silla de ruedas eléctrica plegable para una persona con problemas de movilidad* [Tesis de Pregrado, Universidad Politécnica Salesiana].

<https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/16102/1/UPS-CT007797.pdf>

Castillero, O. (2017, enero 30). *Tipos de discapacidad física (y características)*. Psicología y Mente. <https://psicologiymente.com/salud/tipos-de-discapacidad-fisica>

Clerk. (2023, enero 1). *Pride Mobility Jazzy Select 12V 35Ah*. Battery Clerk.

<https://batteryclerk.es/products/pride-mobility-jazzy-select-12v-35ah-bateria-de-reemplazo-de-scooter>

Computron. (2022, enero 1). *Audífono y micrófono Logitech H390 Usb*. Computron.

<https://www.computron.com.ec/producto/audifono-microfono-logitech-h390-usb-control-de-volumen/>

CONADIS. (2017). *Agenda Nacional para la Igualdad de Discapacidades 2017 - 2021*

(CONADIS, Ed.). [https://www.planificacion.gob.ec/wp-](https://www.planificacion.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2018/08/Agenda-Nacional-para-Discapacidades.pdf)

[content/uploads/downloads/2018/08/Agenda-Nacional-para-Discapacidades.pdf](https://www.planificacion.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2018/08/Agenda-Nacional-para-Discapacidades.pdf)

Corona Ramírez, L. G., Abarca Jiménez, G. S., & Mares Carreño, J. (2014). Sensores de nivel y proximidad. En *Sensores y actuadores: aplicaciones con Arduino* (1ra ed., pp. 142-149).

Grupo Editorial Patria.

Cytron. (2022). 20Amp 6V-30V DC Motor Driver (2 Channels). En *MDD20A*.

<https://www.cytron.io/p-20amp-6v-30v-dc-motor-driver-2-channels>

Dhaouadi, R., & Abu, A. (2013). Dynamic Modelling of Differential-Drive Mobile Robots using Lagrange and Newton-Euler Methodologies: A Unified Framework. *Advances in Robotics & Automation*, 2(2), 1-3. <https://doi.org/10.4172/2168-9695.1000107>

Díaz, H., & Aroche, F. (2020). Determinantes de la productividad laboral en México: una aproximación desde la teoría del crecimiento endógeno con redes neuronales artificiales. *Revista de La CEPAL No. 130, Abril 2020 - Economic Commission for Latin America and the Caribbean - Google Libros*, 1(130), 160-178.

Dipac. (2020). Tubo estructural redondo. *Catálogo General de Productos*, 24.

Direct Industry. (2023a, enero 1). *Motorreductor para silla de ruedas - 80ZY163-24*. Direct Industry. <https://www.directindustry.es/prod/zhejiang-dongzheng-motor-co-ltd/product-209469-2128469.html>

Direct Industry. (2023b, enero 1). *Motorreductor para silla de ruedas - JW ZY - Zhejiang*. Direct. <https://www.directindustry.es/prod/zhejiang-dongzheng-motor-co-ltd/product-209469-2128449.html>

- el Telégrafo. (2017, octubre 3). *Personas con discapacidad cuentan con más derechos*. El Telégrafo. <https://www.eltelegrafo.com.ec/noticias/sociedad/6/plan-estatal-atiende-a-grupo-con-discapacidad>
- Encoder Products. (2023, enero 29). *¿Cómo funciona un encoder? ¿Qué Es Un Encoder?* <https://www.encoder.com/article-que-es-un-encoder>
- Esneca. (2018, agosto 3). *Clasificación de los robots según su función*. Esneca. <https://www.esneca.com/blog/clasificacion-de-los-robots-segun-su-funcion/>
- Flores, R., & Fernández, J. (2008). *Las Redes Neuronales Artificiales* (Gesbiblo).
- Fouad, S. (2022). Reconocimiento de voz. En *Reconocimiento se Voz: Cómo el reconocimiento de voz va a causar interrupciones* (1.ª ed., Vol. 1, pp. 60-66). Mil Millones de Conocimientos.
- Fundación Juan XXIII. (2017, abril 6). *Robótica al servicio de la discapacidad*. Fundación Juan XXVII. <https://blog.fundacionjuanxxiii.org/noticias/robotica-al-servicio-de-la-discapacidad>
- García, I., Pellicer, M., Arcas, M., Piniangua, S., Galvez, D., & Leon, J. (2004). Dorsalgias, lumbalgias. En J. Pérez, E. Martos, M. Martínez, & J. León (Eds.), *Manual de Fisioterapia: Generalidades* (1.ª ed., Vol. 1, pp. 500-527). MAD.
- Genius. (2023). *SP-Q160 | Genius AES Website*. Genius. <https://aes.geniusnet.com/product/sp-q160/>
- Globa Medics. (2023). *Silla de Ruedas Eléctrica TITAN*. <https://www.globamedics.com/web/producto/item/silla-de-ruedas-electrica-titan>
- Gómez, L., Velásquez, S., Castaño, P., Valderrama, S., & Ruiz, M. (2018). La antropometría y la baropodometría como técnicas de caracterización del pie y herramientas que proporcionan criterios de ergonomía y confort en el diseño y fabricación de calzado: una

revisión sistemática. *Prospectiva*, 16(1), 10-11.

<https://doi.org/http://dx.doi.org/10.15665/rp.v16i1.901>

GoodYear. (2014). *Informe Race-GoodYear Neumático y asfalto. Juntos por tu seguridad.*

Gracia, L. (2008). Modelado cinemático y control de robots móviles con ruedas [Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Valencia]. En *Riunet*.

<https://doi.org/10.4995/THESIS/10251/1840>

Havit. (2022, enero 1). *Havit GK55 USB gaming microphone with mute button y led light for computer, PC, Laptop, Mac*. Prohabit. <https://www.prohavit.com/products/gk55-usb-gaming-microphone>

Havit. (2023). *Parlantes estéreo HAVIT SK205*. Havit. <https://www.havit.hk/products/sk205/>

Hernández, D., Eguibar, J., Cortés, C., & Reyes, J. (2017). Diseño, construcción y modelo dinámico de un robot móvil de tracción diferencial aplicado al seguimiento de trayectorias. *XXIII Congreso Internacional Anual de La SOMIM*, 1-4.

http://somim.org.mx/memorias/memorias2017/articulos/A3_189.pdf

Hitecnologia. (2017, noviembre 4). *¿Qué es el codificador?* Hi Tecnología.

<https://materiais.hitecnologia.com.br/blog/o-que-%C3%A9-encoder-para-que-serve-como-escolher-como-interfacear/>

IBM. (2021, agosto 17). *El modelo de redes neuronales*. IBM.

<https://www.ibm.com/docs/es/spss-modeler/saas?topic=networks-neural-model>

INEN. (2016). NTE INEN 2245. En *Accesibilidad de las personas al medio físico. Rampas* (pp. 2-3). <https://www.habitatyvivienda.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2018/06/NTE-INEN-2245-RAMPAS.pdf>

- ISO. (2008). *Wheelchairs — Part 5: Determination of dimensions, mass and manoeuvring space*. ISO 7176-5:2008. <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:7176:-5:ed-2:v1:en>
- Jaeger, R. (2006). Rehabilitation robotics research at the National Institute on Disability and Rehabilitation Research. *Guest Editorial*, 43(5), 17-20.
<https://doi.org/10.1682/jrrd.2006.05.0041>
- Keras. (s. f.). *Batch normalization layer*. Keras. Recuperado 1 de enero de 2023, a partir de https://keras.io/api/layers/normalization_layers/batch_normalization/
- Kinetshop. (2023). *Parlante De Computadora Nitron Yst-1046 – Kinetshop*. Kinetshop.
<https://kinetshop.com/products/parlante-de-computadora-nitron-yst-1046?variant=42749784391858>
- Kuo, B. C. (1996). *Sistemas de control automático* (Séptima, pp. 838-843).
- la Salle. (2023). *Robótica asistencial*. Salle Url. <https://www.salleurl.edu/es/robotica-asistencial>
- Lasluisa, N. (2015). *Diseño y construcción de una silla de ruedas autónoma accionada mediante ondas cerebrales, para la asociación de limitados pléjicos de Tungurahua (ASOPLIJICAT)* [Tesis de Pregrado, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE].
<http://repositorio.espe.edu.ec/xmlui/bitstream/handle/21000/10575/T-ESPEL-MEC-0069.pdf>
- LattePanda. (2023, enero 1). *LattePanda 3 Delta*. LattePanda.
<https://www.lattepanda.com/lattepanda-3-delta>
- Leena, M. (2018). *Extraction of Prosody for Automatic Speaker, Language, Emotion and Speech Recognition* (Springer).

- Lubinus, F., Rueda, C., Marconi, B., & Arias, Y. (2021). Redes neuronales convolucionales: un modelo de Deep Learning en imágenes diagnósticas. *Revista Colombiana de Radiología*, 1-8. <https://doi.org/10.53903/01212095.161>
- Macas, J., & Recalde, F. (2021). *Diseño y construcción de un robot móvil tipo diferencial didáctico para aplicación de técnicas de control basado en algoritmos tradicionales e inteligentes en el laboratorio de la carrera Ingeniería Mecatrónica de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE sede Latacunga* [Tesis de Pregrado, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE]. <http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/24344>
- Martínez, A., Vázquez, G., Cárdenas, J., Vázquez, C., López, A., & García, M. (2018). Manejo de Silla de Ruedas Eléctrica por Comandos de Voz Personalizado. *Aristas*, 6(12). <http://fcqi.tij.uabc.mx/usuarios/revistaaristas/numeros/N12/articulos/150-155.pdf>
- MEDECU. (2023). *Silla de ruedas aluminio – Adulto*. Medecu. <https://medecu.ec/productos/soluciones/cuidados-en-el-hogar-soluciones/silla-de-ruedas-aluminio-adulto/>
- Millán, J. (2022). Sonido digital. En *Instalaciones de megafonía y sonorización* (2.^a ed., Vol. 1, pp. 303-308). Paraninfo S.A.
- MiR. (2023). *MiR1350*. <https://www.mobile-industrial-robots.com/es/solutions/robots/mir1350/>
- Miralles, J. (2022). Proyectos de Inteligencia Artificial. En Independently published (Ed.), *Frameworks deep learning* (pp. 180-182).
- Reglamento de la ley orgánica de discapacidades, Pub. L. No. 109, Ley Orgánica de Discapacidades 1 (2017). https://www.gob.ec/sites/default/files/regulations/2020-12/Documento_Reglamento-a-la-Ley-Org%C3%A1nica-de-Discapacidades.pdf

- Moriello, S. (2008, diciembre 13). *Robots sociales, la nueva generación*. Tendencias.
https://tendencias21.levante-emv.com/robots-sociales-la-nueva-generacion_a2833.html
- MSP. (2018). La discapacidad. En Dirección Nacional de Normatización (Ed.), *Calificación de la discapacidad* (1.ª ed., Vol. 1, pp. 21-34). Ministerio de Salud Pública.
https://www.salud.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2018/12/Manual_Calificaci%C3%B3n-de_Discapacidad_2018.pdf
- Novatronic. (2023, enero 1). *Monster driver VNH3ASP30 30A 2 canales*. Novatronic.
<https://novatronic.ec.com/index.php/product/monster-driver-vnh3asp30-30a-2canales/>
- NVIDIA. (2023, enero). *Primeros pasos con el kit para desarrolladores de Jetson Nano*. NVIDIA.
<https://developer.nvidia.com/embedded/learn/get-started-jetson-nano-devkit>
- Olujinmi, T. (2022, noviembre 8). *Raspberry Pi Pico vs. ESP32: Which Microcontroller Is Right for You?* Makeuseof. <https://www.makeuseof.com/raspberry-pi-pico-vs-esp32-microcontroller/>
- OMS. (2021, noviembre 24). *Discapacidad y salud*. <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/disability-and-health>
- ONU. (2019). Política para todo el sistema de las Naciones Unidas sobre la inclusión de la discapacidad. En *Estrategia de las naciones unidas para la inclusión de la discapacidad* (1.ª ed., Vol. 1, Issue 1, pp. 1-9). ONU.
https://www.un.org/en/content/disabilitystrategy/assets/documentation/UN_Disability_Inclusion_Strategy_spanish.pdf
- OPS. (2006). Evolución del concepto de discapacidad. En A. Amate & A. Vásquez (Eds.), *Discapacidad: lo que todos debemos saber* (616.ª ed., Vol. 1, pp. 5-8). Organización

Panamericana de la Salud.

<https://iris.paho.org/bitstream/handle/10665.2/719/9275316163.pdf>

Ortiz, J. (2017). *Control de una silla de ruedas a través de ondas cerebrales* [Tesis de Posgrado, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo].

<http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/6061/1/20T00772.pdf>

Pérez, C., & Miguel, J. S. (2019). *Detección precoz de cáncer de piel en imágenes basado en redes convolucionales* (pp. 12-16).

https://repositorio.uam.es/bitstream/handle/10486/688935/perez_lorenzo_cristina_tfg.pdf?sequence=1

Predif. (2023). *Discapacidad física*. Predif. <https://www.predif.org/discapacidad-fisica/>

Raspberry. (2023, enero 1). *Raspberry Pi 4 Computer Model B*. Raspberry Pi; Raspberry Pi Trading Ltd. <https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-4-model-b/>

Reinoso, Ó., Jiménez, L., Gil, A., & Castello, L. (2022). Las redes neuronales convolucionales. En *Ejemplos prácticos de redes neuronales mediante MATLAB y PYTHON* (1.ª ed., Vol. 1, pp. 89-93). Universidad de Miguel Hernández de Elche.

Reyes, F., Cid, J., & Vargas, E. (2013). Sensores de posición. En M. Grillo & F. Rodríguez (Eds.), *Mecatrónica: Control y automatización* (1.ª ed., Vol. 1, pp. 129-134). Alfaomega.

Rouhiainen, L. (2018). *Inteligencia Artificial, 101 cosas que debes saber hoy sobre nuestro futuro* (Planeta S.A.).

Salcedo, D., & Teixeria, A. (2006). *Diseño de un sistema de reconocimiento del habla para controlar dispositivos eléctricos* (Universidad Católica Andrés Bello, Ed.).

Salcedo, F. (2007). Las bases de datos. En *Modelos ocultos de Markov: del reconocimiento de voz a la música* (1.ª ed., pp. 128-133). Lulu.

- SaluDigital. (2018, diciembre 29). *Una silla de ruedas con IA que se puede controlar con expresiones faciales*. Con Salud. https://www.consalud.es/saludigital/137/una-silla-de-ruedas-con-ia-que-se-puede-controlar-con-expresiones-faciales_57898_102.html
- SanDoRobotics. (2022, enero 1). *Controlador Puente H BTS7960 – 5V 43A* . SanDoRobotics. <https://sandorobotics.com/producto/hr0214-1/>
- Secretaría Nacional de Planificación. (2021). Ejes, objetivos y políticas para crear oportunidades. En *Plan de Creación de Oportunidades 2021-2025* (1.ª ed., Vol. 1, pp. 63-66). Secretaría Nacional de Planificación. <https://www.planificacion.gob.ec/wp-content/uploads/2021/09/Plan-de-Creacio%CC%81n-de-Oportunidades-2021-2025-Aprobado.pdf>
- Singh, R. (2021, julio 14). *A Step-by-Step Guide to Speech Recognition and Audio Signal Processing in Python*. Towards Data Science. <https://towardsdatascience.com/a-step-by-step-guide-to-speech-recognition-and-audio-signal-processing-in-python-136e37236c24>
- Sunrise Medical. (2018, octubre 31). *Tetraplejia: causas, tratamientos y cuidados*. Sunrise Medical. <https://www.sunrisemedical.es/blog/tetraplejia>
- TensorFlow. (2021, septiembre 1). *TensorFlow Lite*. <https://www.tensorflow.org/lite/guide>
- Tododisca. (2022, septiembre 5). *Día Internacional de la Lesión Medular 2022: niveles, causas y recuperación*. Todo Disca. <https://www.tododisca.com/lesion-medular-espinal/>
- Torres, J. (2020). Redes neuronales convolucionales. En F. Fábregas, A. Alberola, & R. Castillo (Eds.), *Python Deep Learning: Introducción práctica con Keras y TensorFlow 2* (1.ª ed., Vol. 1, pp. 146-179). Alfaomega Colombiana S.A.
- Tzafestas, S. (2014). Mobile robot kinematics. En *Introduction to Mobile Robot Control* (1.ª ed., Vol. 1, pp. 42-46). Elsevier.

Vives, J. (2021, marzo 9). *La evolución de la robótica, de robots industriales a la IA*. La Vanguardia. <https://www.lavanguardia.com/vida/junior-report/20210309/6263538/evolucion-robotica-robots-industriales-ia.html>

Anexos