

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
ESCUELA DE POSGRADO



**PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ**

**“DISEÑO MECATRÓNICO Y SIMULACIÓN DE UNA SILLA DE
RUEDAS MULTIFUNCIONAL PARA NIÑOS ENTRE 6 A 12
AÑOS”**

Tesis para optar el grado de Magister en Ingeniería Mecatrónica

AUTOR

Giancarlo Bravo Anlas

ASESOR

Mg. Roberto Sumiyoshi Furukawa Fukuda

JURADO

Dr. Dante Angel Elias Giordano

Dr. Jorge Hernan Alencastre Miranda

**LIMA – PERÚ
2017**



© 2017, Giancarlo Bravo Anlas

Se autoriza la reproducción total o parcial,
Con fines académicos a través de cualquier
Medio o procedimiento, incluyendo la cita
Bibliográfica del documento.

Resumen

En el presente trabajo se muestra el diseño de una silla de ruedas mecatrónica multifuncional. Este trabajo se enfoca a niños entre 6 – 12 años que presenten el desorden llamado Distrofia Muscular de Duchenne (DMD), aunque podrá ser utilizada por otros niños que cumplan con los requerimientos de uso.

Se realizó el diseño una silla de ruedas mecatrónica multifuncional la cual es controlada mediante un joystick y diversos códigos, ingresados mediante de un teclado y un joystick, que permiten elegir la funcionalidad deseada.

Las características técnicas de la silla de ruedas son: Peso de la silla 30 kg, peso máximo del usuario 20 kg, dimensiones 866 x 746 x 1237 mm, velocidad máxima 5.4 km/h, distancia máxima 10 km, pendiente máxima 12°, controlador Arduino Mega 2560 y usará 2 baterías de 50Ah,

Finalmente, se obtuvo un precio estimado de fabricación de \$2110; si bien este precio no representa el costo final de comercialización, nos da una idea de la factibilidad su comercialización debido a que este precio está muy por debajo del valor mínimo de sillas de ruedas comerciales que ofrezcan funciones similares (\$6900).

< Pagina extra para el documento de aprobación de temario de tesis >





Dedicado a mis padres por su apoyo a lo largo de mi vida

AGRADECIMIENTOS

A todas las personas que me apoyaron personalmente y académicamente para lograr esta tesis: mis padres Jorge y Gladys, mi asesor R. Furukawa, a mis compañeros. Así como, a la institución del estado CONCYTEC por el gran apoyo brindado mediante la beca para cubrir los gastos de la maestría.



ÍNDICE DE CONTENIDO

	Pág.
Resumen	i
ÍNDICE DE CONTENIDO	v
ÍNDICE DE TABLAS	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	viii
LISTA DE SÍMBOLOS	xi
INTRODUCCIÓN	1
I. ESTADO DEL ARTE	3
1.1 Modelos comerciales	3
1.2 Investigaciones	11
II. METODOLOGÍA DEL DISEÑO	21
2.1 Lista de exigencias	23
2.2 Estructura de funciones para el cambio de funcionalidad	25
2.3 Matriz morfológica para el cambio de funcionalidad	26
2.4 Conceptos de solución	28
2.5 Análisis de conceptos de solución	32
III. COMPONENTES MECÁNICOS	35
3.1 Componentes utilizados del trabajo previo	36
3.2 Componentes mecánicos	38
3.3 Funcionalidades	44
3.4 Mecanismos para la realización de las diversas funcionalidades	47
3.5 Selección de actuadores lineal	56
3.6 Análisis de estabilidad de la silla	80
3.7 Cálculos de los elementos más críticos	82
3.8 Lista de planos	97
IV. COMPONENTES ELECTRÓNICOS	99
4.1 Tarjeta electrónica	100
4.2 Componentes electrónicos	104
4.3 Diagrama de flujo de programa	132

V.	SISTEMA DE CONTROL	142
5.1	Control de los motores	143
5.2	Control de los actuadores lineales.....	147
VI.	COSTO	152
6.1	Costo total	153
6.2	Parte electrónica.....	154
6.3	Parte mecánica	155
	RESULTADOS Y OBSERVACIONES	156
	RESULTADOS	156
	RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DEL PROGRAMA	158
	OBSERVACIONES	164
	CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	165
	BIBLIOGRAFÍA	168
	ANEXOS	
	Anexo A: Planos mecánicos	
	Anexo B: Tarjeta electrónica	
	Anexo C: Componentes electrónicos	
	Anexo D: Diagrama de flujo del programa	
	Anexo E: Código del programa en C	
	Anexo F: Control de actuador lineal 3	
	Anexo G: Calculo del centro de masa	
	Anexo H: Simulaciones	

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Comparación entre modelos comerciales.....	4
Tabla 1.2 Especificaciones técnicas de las sillas de ruedas comerciales.....	6
Tabla 2.3 Lista de exigencias	24
Tabla 2.4 Matriz morfológica.....	26
Tabla 2.5 Evaluación de conceptos de solución.....	34
Tabla 3.6 Movimientos requeridos por cada tipo de funcionalidad	47
Tabla 3.7 Características de los actuadores lineales seleccionados.....	56
Tabla 4.8 Especificaciones técnicas del Arduino Mega 2560[22]	105
Tabla 4.9 Especificaciones técnicas del módulo regulador de voltaje [23].....	106
Tabla 4.10 Códigos para activar las funcionalidades de la silla.....	107
Tabla 4.11 Pines de la pantalla LCD	108
Tabla 4.12 Mensajes mostrados por la pantalla LCD.....	109
Tabla 4.13 Especificaciones técnicas del joystick [28]	110
Tabla 4.15 Especificaciones técnicas del motor [35]	124
Tabla 4.16 Especificaciones técnicas del relé [36].....	125
Tabla 4.17 Pines del relé [36].....	126
Tabla 4.18 Especificaciones técnicas del Módulo Bluetooth [37]	127
Tabla 4.19 Especificaciones técnicas de la batería [38]	130
Tabla 5.20 Control del Puente H	145
Tabla 5.21 Especificaciones del encoder incremental.....	146
Tabla 5.22 Control del Puente H	150
Tabla 6.23 Costo total de la silla	153
Tabla 6.24 Costo de la parte electronica.....	154
Tabla 6.25 Costo de la parte mecánica.....	155
Tabla 7.26 Especificaciones técnicas de la silla de ruedas.....	156

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Funcionalidad silla de ruedas - F5 CORPUS VS	8
Figura 1.2 Funcionalidad camilla - F5 CORPUS VS	9
Figura 1.3 Funcionalidad camilla - F5 CORPUS VS	10
Figura 1.4 Componentes de la parte mecánica.....	11
Figura 1.5 Silla de ruedas vista frontal (izq.) y sistema de transmisión (derecha) [4]	12
Figura 1.6 Diagrama de bloques del sistema de control utilizado generalmente [10]	15
Figura 1.7 Diagrama de bloques del control de velocidad [5]	15
Figura 1.8 Diagrama de bloques de un sistema de control de lazo abierto.....	16
Figura 1.9 Diagrama de bloques de un sistema de control de lazo cerrado	17
Figura 1.10 Diagrama de bloques del controlador PID [11].....	20
Figura 2.11 Concepto de solución 1.....	29
Figura 2.12 Concepto de solución 2.....	30
Figura 2.13 Concepto de solución 3.....	31
Figura 3.14 Estructura. Vista superior(a) lateral (b) isométrica(c)	38
Figura 3.15 Transversales para la unión de los actuadores. Actuador lineal 3(a) Actuador lineal 4(b)	39
Figura 3.16 Asiento. Vista lateral(a) inferior (b) isométrica(c)	39
Figura 3.17 Espaldar. Vista trasera(a) lateral (b) isométrica(c).....	40
Figura 3.18 Mando de control (a) Vista lateral, (b) Vista frontal, (c) Vista isométrica	41
Figura 3.19 Apoyapié. Vista lateral(a) frontal (b) isométrica(c)	42
Figura 3.20 Caja sin tapa lateral vistas isométricas (a) (b) Caja con tapa lateral vistas isométricas (a) (b)	43
Figura 3.21 Función silla de ruedas – (a) Vista superior (b) Vista frontal.....	44
Figura 3.22 Función camilla - – (a) Vista superior (b) Vista frontal	45
Figura 3.23 Función bipedestación - – (a) Vista frontal (b) Vista superior	46
Figura 3.24 Pieza de unión espaldar/asiento/actuador lineal Vista Frontal (a) Isométrica (b)	48
Figura 3.25 Giro del espaldar - Vistas isométrica de la posición inicial y final	48
Figura 3.26 Giro del espaldar - Vista frontal de la posición inicial y final.....	48
Figura 3.27 Giro del espaldar - Vista inferior de la posición inicial y final	49
Figura 3.28 (a) (b) Pieza de unión del actuador lineal/ Pieza L Vistas frontal e isométrica, (c) (d) Pieza L de unión del asiento/apoyapié/ actuador lineal Vistas frontal e isométrica.....	50
Figura 3.29 Giro del apoyapié - Vista isométrica de la posición inicial y final.....	51
Figura 3.30 Giro del apoyapié - Vista frontal de la posición inicial y final.....	51
Figura 3.31 Giro del apoyapié - Vista inferior de la posición inicial y final	51
Figura 3.32 Soporte de unión actuador lineal giro asiento/asiento Vistas Superior(a) Lateral (b) Isométrica(c), Pieza que une eje de giro del asiento / estructura Vista Lateral (a) Frontal (e) Isométrica (f)	52
Figura 3.33 Giro del asiento - Vista isométrica, (b) Vista frontal.....	53
Figura 3.34 Soporte de unión actuador lineal giro asiento/asiento Vista Frontal (a) Isométrica (b)	54
Figura 3.35 Levantamiento del asiento Vista isométrica, (b) Vista frontal	55

Figura 3.36 DCL Asiento/Espaldar - posición inicial.....	58
Figura 3.37 DCL Asiento/Espaldar - posición final.....	58
Figura 3.38 Asiento/Espaldar distribución geométrica posición inicial	60
Figura 3.39 Asiento/Espaldar longitud del actuador lineal posición inicial	60
Figura 3.40 Asiento/Espaldar distribución geométrica posición final	60
Figura 3.41 Asiento/Espaldar longitud del actuador lineal posición final	60
Figura 3.42 DCL Asiento/Apoyapié posición inicial.....	63
Figura 3.43 DCL Asiento/Apoyapié posición final	63
Figura 3.44 Asiento/Apoyapié distribución geométrica posición inicial.....	65
Figura 3.45 Asiento/Apoyapié longitud del actuador lineal posición inicial.....	65
Figura 3.46 Asiento/apoyapié Distribución geométrica posición final.....	66
Figura 3.47 Asiento/Apoyapié longitud del actuador lineal posición final	66
Figura 3.48 DCL Asiento Posición silla	70
Figura 3.49 DCL Asiento Posición camilla	71
Figura 3.50 DCL Asiento Posición bipedestación	73
Figura 3.51 Giro del asiento - longitudes posición inicial	75
Figura 3.52 Giro del asiento - Triangulo A-B1-B2.....	76
Figura 3.53 Giro del asiento - Triangulo auxiliar	76
Figura 3.54 Giro del asiento - Triangulo A-B1-B3.....	76
Figura 3.55 Longitud actuador lineal 4. (a) Posición inicial (b) Posición final	78
Figura 3.56 Distribución del peso - Bipedestación	80
Figura 3.57 (a) Lugar de aplicación de la fuerza en el actuador (b) Ubicación del cordón de soldadura	82
Figura 3.58 Sección transversal	82
Figura 3.59 DCL tubo transversal.....	83
Figura 3.60 Cordones de soldadura- Tubo transversal.....	87
Figura 3.61 Ubicación del eje de giro del asiento.....	91
Figura 3.62 DCL eje.....	92
Figura 3.63 Ubicación de los cordones de soldadura.....	94
Figura 3.64 DCL Asiento.....	94
Figura 3.65 DCL cordón de soldadura.....	94
Figura 4.66 Unión de los niveles (Imagen de referencia) [21]	100
Figura 4.67 Tarjeta electrónica - Nivel 1	101
Figura 4.68 Tarjeta electrónica - Nivel 2	103
Figura 4.69 Microcontrolador Arduino Mega 2560[22].....	104
Figura 4.70 Modulo regulador de voltaje [23].....	105
Figura 4.71 Teclado matricial(a) [24] Arreglo interno (b) [25].....	107
Figura 4.72 Pantalla LCD (a) [26], Pines de la pantalla LCD (b) [27].....	108
Figura 4.73 Joystick [28]	110
Figura 4.74 Actuador lineal [29].....	111
Figura 4.75 Partes de un actuador lineal [30]	112
Figura 4.76 Cableado de actuadores lineales FIRGELLI [33].....	112
Figura 4.77 Cableado de actuadores lineales LINAK [31].....	112
Figura 4.78 Potenciómetro lineal [34]	113
Figura 5.79 Movimiento 1	114
Figura 4.80 Triangulo O4A´O3	114
Figura 4.81 Triangulo B´A´O3	114
Figura 4.82 Movimiento 2	115
Figura 4.83 Triangulo O4AO3.....	115
Figura 4.84 Triangulo B´A´O3	116

Figura 4.85 Motor DC [35]	118
Figura 4.86 DCL Silla de ruedas	119
Figura 4.87 DCL rueda	120
Figura 4.88 Relé [36]	125
Figura 4.89 Pines del relé [36]	126
Figura 4.90 Modulo Bluetooth [37]	127
Figura 4.91 Batería [38]	129
Figura 4.92 Diagrama de flujo - Función Principal	132
Figura 4.93 Diagrama de flujo - Función Loop	133
Figura 4.94 Diagrama de flujo - Función TeclaPresionada	134
Figura 4.96 Diagrama de flujo - Función VerificarCondicionesDesplazamiento....	136
Figura 4.98 Diagrama de flujo - Función ArrancarMotor.....	138
Figura 4.97 Diagrama de flujo - Función CalculoVelocidad.....	139
Figura 4.98 Diagrama de flujo - Función PID	139
Figura 4.99 Diagrama de flujo - Función ArrancarActuador.....	140
Figura 4.100 Diagrama de flujo - Función DetenerActuador	140
Figura 4.101 Diagrama de flujo - Función InterrupcionTimer1	141
Figura 5.102 Bloque de control de los motores	143
Figura 5.103 Puente H- Diagrama Esquemático.....	144
Figura 5.104 Onda PWM	145
Figura 5.105 Bloque de control de los actuadores lineales	147
Figura 5.106 Control por relés- Diagrama Esquemático	149
Figura 5.107 Sensor de posición – Conexiones	151
Figura 5.108 Sensor de posición – potenciómetro lineal	151
Figura 6.109 Simulación (a) Teclado matricial (b) Pantalla LCD (c) Actuadores lineales (d) Joystick.....	159
Figura 6.110 Simulación (a) Motores (b) Arduino Mega 2560	160

LISTA DE SÍMBOLOS

\emptyset :	Diámetro
P_m :	Potencia del motor
f_r :	Coefficiente de fricción
M :	Masa total
g :	Aceleración de la gravedad
v :	Velocidad máxima
n :	Eficiencia
P_e :	Potencia eléctrica
K_m :	Constante del motor
τ :	Constante de tiempo del motor
K_T :	Constante de torque electromecánico del motor
K_b :	Constante eléctrica del motor
J :	Momento de inercia del eje del motor
K_d :	Constante derivativa del controlador PID
K_p :	Constante proporcional del controlador PID
K_i :	Constante integral del controlador PID
$e(t)$:	Señal de error
$u(t)$:	Señal de control
y_0 :	Distancia inicial del asiento (eje Y)
O_{3x} :	Distancia desde el origen hacia el punto O3 (Eje X)
O_{4x} :	Distancia desde el origen hacia el punto O4 (Eje X)
θ :	Angulo auxiliar
l_{aux} :	Longitud auxiliar
d_{AB} :	Distancia del punto A al B
l_0 :	Longitud inicial
α :	Angulo auxiliar
x_f :	Posición final del punto B (Eje X)
y_f :	Posición final del punto B (Eje Y)
δ :	Angulo auxiliar
l_f :	Longitud final del actuador lineal



INTRODUCCIÓN

La distrofia muscular de Duchenne es una enfermedad hereditaria la cual es causada por un gen defectuoso en el organismo, lo cual lleva a la no producción de distrofina (proteína muscular). Es debido a esto que este tipo de distrofia tiende a empeorar las estructuras musculares rápidamente hasta el punto que el niño a temprana edad, necesite una silla de ruedas para moverse. Se estima que 1 de cada 3600 infantes masculinos llega a presentar este desorden. Medline plus, 2014 [1]

En la actualidad no existe cura para la DMD, y los tratamientos que se realizan a los pacientes son con fines de mejorar su calidad de vida (fisioterapia, psicomotricidad, logopedia, terapia ocupacional y control de las complicaciones). Siguiendo esta línea, mediante esta tesis se busca diseñar y realizar una simulación del funcionamiento de una silla de ruedas mecatrónica la cual servirá para mejorar la calidad de vida de estas personas sirviéndoles como un medio para moverse, ofreciendo la posibilidad de funcionar como una camilla, así como la de posicionar a los usuarios verticalmente (bipedestación). La

funcionalidad bipedestación se logra poniendo al usuario en una posición vertical y los beneficios que se pueden obtener mediante esta funcionalidad son los siguientes: Mejora de la circulación sanguínea, mejora del funcionamiento de la vejiga, mejora del funcionamiento de los intestinos, reducción de contracturas, alivio de la presión, entre otros.

La gran mayoría de sillas de ruedas automatizadas en el mercado están diseñadas para personas adultas con un peso máximo de alrededor 100 kg; así como, solo cumplen con 1 o 2 funcionalidades; aquellas que si cumplen con varias funciones no ofrecen todas las funciones que se plantean obtener con esta silla y son muy costosas. Debido a esto, esta tesis busca diseñar una silla de ruedas eléctrica la cual posea las distintas funcionalidades que son requeridas por personas afectadas por DMD y además, que sea económicamente viable para las familias de estos niños. Adicionalmente, como un objetivo secundario se buscara obtener los conocimientos necesarios para el diseño de sillas de ruedas para poder realizar un diseño de una silla mecatrónica multifuncional para distintos tipos de usuarios.

Esta tesis se basa en un trabajo previo realizado por Roberto Furukawa, Dante Elías y Toshiro Tabuchi, 2014 [2] en el cual se realizó un diseño y fabricación de varios prototipos mecánicos de una silla de ruedas mecánica multifuncional. Se planea utilizar algunos elementos/mecanismos de forma similar a los que fueron utilizados en estos prototipos, así como realizar añadir elementos nuevos para poder lograr la realización de las diversas funcionalidades. Para el diseño de esta silla de ruedas, se utilizara la recomendación para el diseño de productos VDI 2225, 1997 [3].

Esta tesis se dividirá en 6 capítulos. En el capítulo 1, se detallarán los antecedentes de esta problemática, así como el estado del arte. En el capítulo 2 se detallara la metodología de diseño utilizada. En el capítulo 3,4 y 5 se detallarán las partes mecánicas, electrónicas y del sistema de control de la solución planteada. En el capítulo 6 se presenta el costo estimado de fabricación de la silla de ruedas. Posteriormente, se detallará las características finales de la silla obtenida, así como los resultados de las simulaciones realizadas. Finalmente se mencionan las conclusiones y trabajos futuros.



CAPITULO 1

ESTADO DEL ARTE

En el presente capítulo se expone una breve descripción del estado del arte de las sillas de ruedas comerciales que ofrezcan funciones similares a las que se desean obtener; así como se presentan artículos científicos publicados sobre este tema.

1.1 Modelos comerciales

En la actualidad existe una gran variedad de empresas dedicadas a la construcción de sillas de ruedas eléctricas, las cuales ofrecen algunas o todas las funcionalidades deseadas (función bipedestación, función camilla).

En la Tabla 1.1, se comparan algunos modelos comerciales de sillas de ruedas eléctricas las cuales ofrecen las 3 funcionalidades deseadas.

Tabla 1.1 Comparación entre modelos comerciales

Nombre	Compañía	Precio [US\$]	Peso usuario [kg]	Peso[kg]	Dimensiones [mm]
XO-202 Power Standing Wheelchair[12]	Karman Healthcare	8,950	113	82	1435,1 x 622 x 1016
XO-505 Power Standing Wheelchair[13]	Karman Healthcare	12,950	113,4	81,6	1435,1 x 711,2 x 1143
PHOENIX II[14]	LLOYD	6,900	100	100	650 x 1030 x 790
DRACO STANDING WHEELCHAIR[15]	LLOYD	9,300		130	620 x 1150 x 1435
F5 CORPUS VS[16]	Permobil	~\$30,000	150	186	1140 x 790 x 1170
Xeno power wheelchair[17]	ottobock	17,000	136	140	1220 x 640x 1100
LEVO combi[18]	LEVO	12,000+	120	170	660 x 1100 x 1040
LEVO combi Jr. [19]	LEVO	12,000+	120	170	660 x 1100 x 1040
LEVO C3[20]	LEVO	12,000+	140	185	630 X 1050 X 1000

Según lo visto en la Tabla 1.1, se obtienen las siguientes observaciones:

- El mínimo precio de estas sillas de ruedas eléctricas es de \$6900 (Phoenix II, marca LLOYD) llegando a costar más de \$30 000 en algunos casos según sea las características técnicas que se deseen. Cabe mencionar que estos precios no incluyen el envío hacia Perú, ya que ninguna de estas cuenta con un proveedor en Perú por lo que a este precio será mayor.
- Todas están diseñadas para soportar a un usuario de más de 80kg, debido a que generalmente las personas que utilizan este tipo de dispositivos son personas adultas.
- El peso de estas sillas se ubica en el rango de 80 – 185 kg, y la más pequeña tiene como dimensiones 650 x 1030 x 790mm (PHOENIX II, LLOYD); así como la más grande tiene como dimensiones 1435.1 x 711.2 x 1143mm (XO-505, Karman Healthcare). Estos 2 factores (peso y dimensiones) dificultan la movilidad y traspaso de estos equipos y hacia otros lugares.

1.1.1 Características técnicas

En la Tabla 1.2 se detallan algunos aspectos técnicos de las sillas de ruedas comerciales como que tipo de batería utilizan, que tipo de freno, la distancia máxima de viaje, su radio de giro y el controlador utilizado.

Tabla 1.2 Especificaciones técnicas de las sillas de ruedas comerciales

NOMBRE	BATERÍA	FRENO	DISTANCIA DE VIAJE	RADIO DE GIRO	CONTRO LADOR
XO-202 Power Standing Wheelchair	12V 36AH x2	EM	25 km	1100 mm	Shark II Controller
XO-505 Power Standing Wheelchair	12V 36AH x2	EM	40.2 km	635 mm	Dynamic DX2 Remote
PHOENIX II	12V36Ah X 2	EM	40,2 km	635 mm	Dynamic Controller (Shark)
DRACO STANDING WHEELCHAIR	12V36Ah X 2	EM	30 km	-	Controller (DX2)
F5 CORPUS VS	73 AH, 23 kg x2	EM	30 km	1140 mm	
Xeno power wheelchair	60 Ah C5 Gel	EM	25–35 km	1525 mm	enAble50
LEVO combi	24V 55AH	EM	35 km	750 mm	PGDT controller R-net
LEVO combi Jr.	24V 55AH	EM	35 km	1100 mm	PGDT controller R-net
LEVO C3	55 Ah	EM	35 km	1100 mm	VR2 control system

* EM = Electromagnético

Respecto a las características técnicas mencionadas en la Tabla 1.2, se concluye que:

- Todas las sillas de ruedas utilizan frenos electromagnéticos, debido a que estos se pueden controlar electrónicamente y no hay rozamiento entre partes mecánicas, lo que produce que el desgaste y mantenimiento sean mínimos.
- Se utilizan 1 o 2 baterías de 24/12 Voltios y 36 Amperios-Hora o más, dependiendo de la potencia de los motores, frenos electromagnéticos, controlador y demás componentes electrónicos.

- La distancia que pueden recorrer varía entre 25 a 40 km, la cual depende del peso del usuario, peso de la silla de ruedas, capacidad de la batería y la velocidad a la que funciona. Para el cálculo de esta distancia se utiliza a la silla solo para desplazar al usuario y no se utilizan las otras funciones.

Todas estas sillas de ruedas utilizan tracción trasera lo que hace más estable a la silla, permite que esta alcance altas velocidades, aunque genera un mayor radio de giro en comparación con la tracción delantera. Los valores del radio de giro se encuentran entre 653 – 1100 mm.

1.1.2 Funcionalidades

La silla de ruedas mecatrónica deberá de poder posicionarse en las funcionalidades de silla de ruedas, camilla y bipedestación. A continuación se explican cada una de estas funcionalidades.

1.1.2.1 Funcionalidad silla de ruedas

Esta funcionalidad permitirá a la silla de ruedas posicionarse como una silla de ruedas común, como se muestra en la Figura 1.1, permitiendo al usuario la capacidad de desplazamiento libre por sus alrededores mediante un par de motores eléctricos controlador por un joystick; así como ofrecerá la posibilidad de regulación del ángulo de inclinación del espaldar y del apoyapié.



Figura 1.1 Funcionalidad silla de ruedas - F5 CORPUS VS

1.1.2.1 Funcionalidad camilla

Esta funcionalidad permitirá a la silla de ruedas posicionarse como una camilla, mediante el giro del espaldar y apoyapié hacia una posición horizontal respecto al asiento como se muestra en la Figura 1.2. Adicionalmente, la silla permitirá que el usuario modifique la altura de esta respecto al suelo. En esta funcionalidad, los motores deberán de estar deshabilitados, por lo que no se permite el desplazamiento.

Esta funcionalidad se requiere debido a los siguientes motivos:

- Permitir al usuario descansar en la silla de ruedas
- Facilidad de traslado del usuario hacia una cama.



Figura 1.2 Funcionalidad camilla - F5 CORPUS VS

1.1.2.1 Funcionalidad bipedestación

Esta funcionalidad permitirá a la silla de ruedas posicionarse como verticalmente, permitiendo al usuario esta, mediante el giro del espaldar y apoyapié hacia una posición horizontal respecto al asiento; así como un giro y traslación vertical del asiento. Esta funcionalidad se muestra en la Figura 1.3.

En esta funcionalidad, los motores están habilitados pero la velocidad máxima de desplazamiento se reduce con el fin de garantizar la estabilidad de la silla de ruedas.

Los beneficios que se logran mediante el posicionamiento del paciente en la posición bipedestación en una silla de ruedas se pueden separar en beneficios físicos y psicológicos.

1.1.2.1.1 Beneficios físicos

- Mejorar el alcance funcional de la persona, permitiéndole ser parte de actividades de la vida cotidiana (aseo, coger cosas de lugares elevados, cocinar, etc.)
- Mejorar la independencia y productividad del usuario.
- Mante
- Reducir el riesgo de infecciones a las vías urinarias.
- Mantener la densidad de los huesos.
- Mejorar la circulación
- Reducción de la espacidad muscular.
- Mejora de la actividad intestinal
- Evitar las contracciones en los músculos.
- Reducir las llagas debidas a la presión.

1.1.2.1.2 Beneficios psicológicos

- Incrementar la independencia
- Incremento de cognición
- Reducción de la fatiga
- Mejora de la salud psicológica



Figura 1.3 Funcionalidad camilla - F5 CORPUS VS

1.1.3 Realización de las funcionalidades

Todas las sillas de ruedas eléctricas comerciales utilizan actuadores lineales para la realización de los movimientos/giros de los componentes de la silla, principalmente debido a que estos equipos ocupan poco espacio, poseen una larga vida útil, requieren poco mantenimiento, ofrecen buena precisión, entre otras características.

Mediante la combinación de giros del espaldar, apoyapié, asiento y elevación de la altura de la silla, las sillas de ruedas se pueden posicionar en las diversas funciones deseadas.

1.2 Investigaciones

A continuación se detalla las partes mecánicas, electrónicas y de control de las sillas de ruedas utilizadas/ diseñadas en diversas publicaciones científicas.

1.2.1 Parte mecánica

Las componentes que conforman la parte mecánica de las sillas de ruedas electrónicas se detallan en la Figura 1.4.

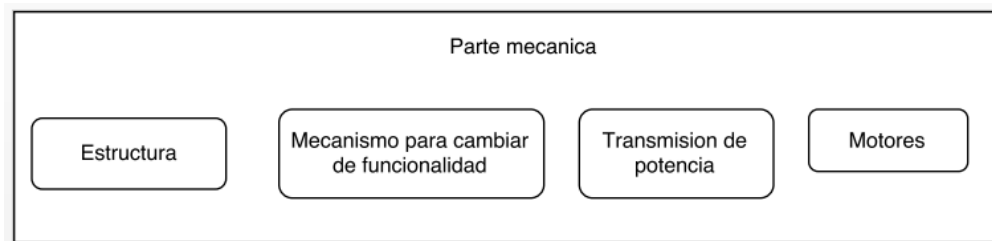


Figura 1.4 Componentes de la parte mecánica

En las investigaciones encontradas, muchos adaptan la parte mecánica de una silla de ruedas manual, agregándole motores, actuadores lineales, baterías y otros componentes electrónicos para lograr adaptar estas sillas manuales en sillas de ruedas eléctricas. Así como, utilizan tracción trasera ya que este tipo de tracción ofrece más estabilidad y permite que esta alcance altas velocidades, aunque genera un mayor radio de giro en comparación con la tracción delantera.

H. Salmin *et al.* [4] utilizaron una silla de ruedas comercial tipo X la cual posee un diseño del marco de la estructura distinto a lo normal la cual posee una forma de X con el fin de ofrecer la capacidad de compactibilidad. Utilizan 2 ejes para cada rueda y para la transmisión de potencia utilizan una cadena conectada al motor. Eliminan la funcionalidad de compactibilidad y sueldan varios tubos a la estructura para mejorar su estabilidad y para que se puedan montar los componentes electrónicos (tarjeta, baterías). Utilizan baterías de 12V 30Ah y motores DC de 24V. La silla de ruedas logra una velocidad de desplazamiento de 7 km/h, pesa 41kg y puede soportar un usuario de 120 kg. (Figura 1.5).



Figura 1.5 Silla de ruedas vista frontal (izq.) y sistema de transmisión (derecha) [4]

S. Kakoty *et al.* [5] explican el proceso de selección de la parte de potencia en una silla de ruedas en la cual utilizan un control de velocidad mediante un joystick, explican el diseño realizado del controlador de los motores y el cálculo de la potencia del motor. También realizan un diseño de un mecanismo para la elevación de una silla de ruedas. Presentan varios conceptos e solución y finalmente escogen un sistema hidráulico tipo tijera para la elevación de la silla.

D. Jones *et al.* [9] realizan un análisis comparativo entre el uso de joysticks con detección de posición contra uno con detección de fuerza el cual fue diseñado por ellos y utiliza galgas extensiométricas para detectar la fuerza del usuario. Se desarrolló un circuito que los usuarios debían de recorrer utilizando sillas de ruedas equipadas con joystick con detección de fuerza y con detección de posición y se evalúa el tiempo y efectividad de movimiento. Si bien los resultados fueron similares en ambos casos, 80% de los usuarios mostraron su preferencia hacia los joystick con detección de fuerza.

1.2.1.1 Sistema de transmisión

El sistema de transmisión es necesario puesto que este tipo de vehículos requiere alto torque y bajas velocidades de movimiento y los motores comerciales, en general, presentan velocidades elevadas, así como bajo torque. Es por esto que se necesita un sistema de transmisión acoplado al eje del motor para poder reducir la velocidad del motor y aumentar el torque que este pueda ofrecer.

1.2.1.2 Calculo de la potencia del motor

En [5] utilizan la siguiente ecuación para el cálculo de la potencia mecánica de los motores:

$$P_m = \frac{f_r M g v}{2} \quad (1.1)$$

Con f_r = coeficiente de fricción

M = masa total

g = aceleración de la gravedad

v = velocidad máxima

A esta potencia mecánica calculada, se le divide entre la eficiencia de la transmisión de poder, y se obtiene la potencia eléctrica que el motor necesitara:

$$P_e = \frac{P_m}{n} \quad (1.2)$$

1.2.2 Parte Electrónica

Los principales componentes electrónicos que utilizan en las diversas publicaciones son:

- Joystick: Estándar joystick magnético, el cual utiliza sensores de efecto Hall para medir el desplazamiento del agarrador.
D. Jone *et. Al* [9] compara el funcionamiento de un joystick común contra el de un forcé-sensing joystick, el cual fue diseñado por ellos y utiliza galgas extensiométricas para detectar la fuerza del usuario.
- Microcontrolador: Es un circuito integrado programable, el cual permite ejecutar la lógica de control. Es el encargado de la activación de los actuadores lineales, así como de leer los datos de las diversos tipos de entradas que sean requeridas por la silla de ruedas (botones, sensores, comunicación serial, comunicación bluetooth, etc.).
- Sistema de reconocimiento de voz: Chips para el reconocimiento de voz, el cual debe ser entrenado previamente para la detección de ciertos comandos. El sistema obtiene las señales de voz mediante un micrófono y compara estas señales con las señales previamente configuradas para saber si es que debe de ejecutar una acción o no.
- DAC: Conversor Digital / Análogo, usualmente viene dentro del microcontrolador. Dispositivo que permite convertir señales analógicas a digitales.
- ADC: Conversor Análogo/Digital, usualmente viene dentro del microcontrolador. Dispositivo que permite convertir señales digitales a analógicas.
- Puente-H: Circuito eléctrico que permite a un motor DC girar en ambos sentidos mediante un arreglo de transistores. Se diseña según la corriente, la forma de controlar el giro y los tipos de transistores a usarse.
- Encoder: Sensor de velocidad angular del motor, utilizado para el lazo cerrado de control.
- Fuente de alimentación: Se utilizan baterías eléctricas para la alimentación de los diversos componentes debido a que estas pueden proporcionar la carga eléctrica requerida y se pueden trasladar de un lugar a otro. El voltaje de estas baterías dependerá del voltaje al cual puedan trabajar los componentes electrónicos.

1.2.3 Control

El control que normalmente se utiliza es el de velocidad de la silla de ruedas. Este control se divide en 3 etapas: adquisición, control y potencia, como se puede apreciar en la Figura 1.6. Se adquieren las señales, ya sea por medio del joystick o por un sistema de reconocimiento de voz como utilizan Y. Kheng *et al.* [7]; éstas son interpretadas por el controlador, el cual controla la potencia aplicada a los motores para realizar el movimiento deseado.

Se utilizan ondas PWM para variar la velocidad de los motores mediante un puente-H (2 MOSFET-N y 2 MOSFET-P) para accionar los motores. La señal PWM es conectada a los MOSFET-N debido a que estos tienen mayor velocidad de conmutación y menor resistencia, el diagrama de bloques para el control de la velocidad se muestra en la Figura 1.7.

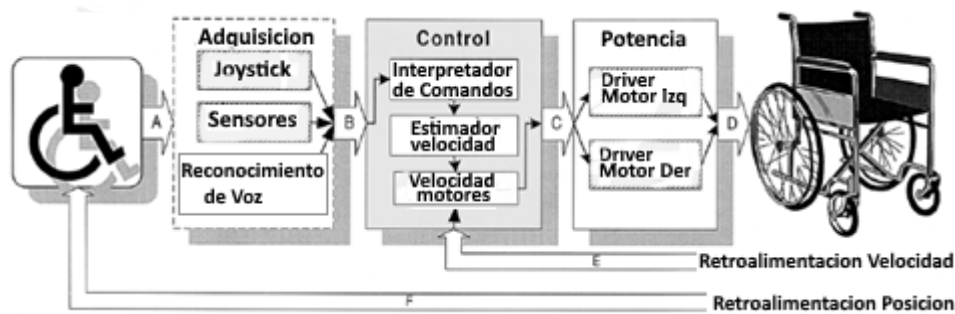


Figura 1.6 Diagrama de bloques del sistema de control utilizado generalmente [10]

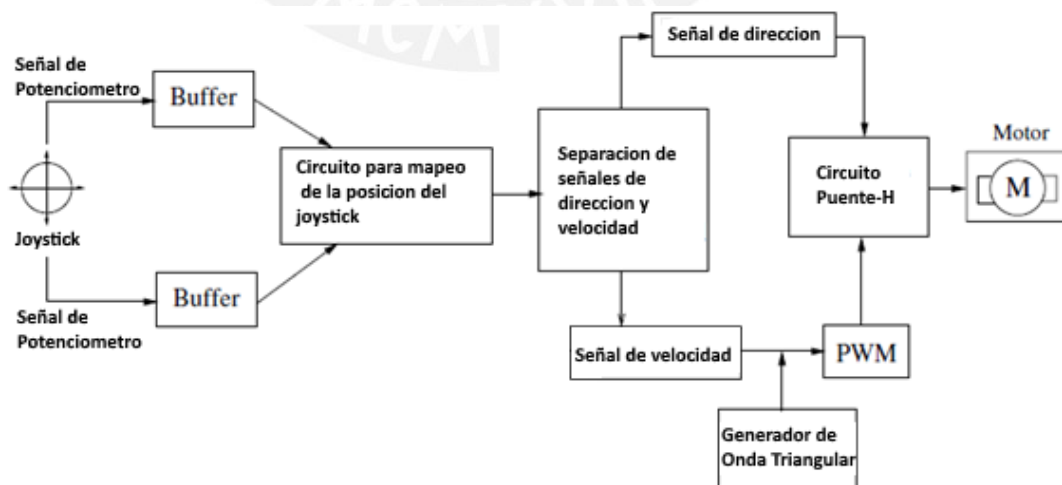


Figura 1.7 Diagrama de bloques del control de velocidad [5]

1.2.3.1 Sistema de control de lazo abierto

Sistema de control en la que la señal de control es independiente de la salida del proceso, por lo que no existe retroalimentación entre las variables y no se modifica la señal de control en función de la salida.

La ventaja de este tipo de sistema de control es la sencillez de su implementación, pero presenta varias desventajas como la inestabilidad frente a perturbaciones y el error presente en la salida.

El diagrama de bloques de este tipo de sistemas se muestra en la Figura 1.8.



Figura 1.8 Diagrama de bloques de un sistema de control de lazo abierto

1.2.3.2 Sistema de control de lazo cerrado

Sistema de control en la que la señal de control es dependiente de la señal de salida mediante una retroalimentación proporcionada por un sensor, por lo que la señal de control dependerá del error entre la entrada de referencia y el valor actual de la salida. Este tipo de control se utiliza cuando la tarea es muy difícil de regular manualmente y/o se busca más precisión en el control.

La ventaja de este tipo de sistema de control es la eliminación del error en la salida, mejor estabilidad frente a perturbaciones, aunque son más complejos de implementar.

El diagrama de bloques de este tipo de sistema se muestra en la Figura 1.9.

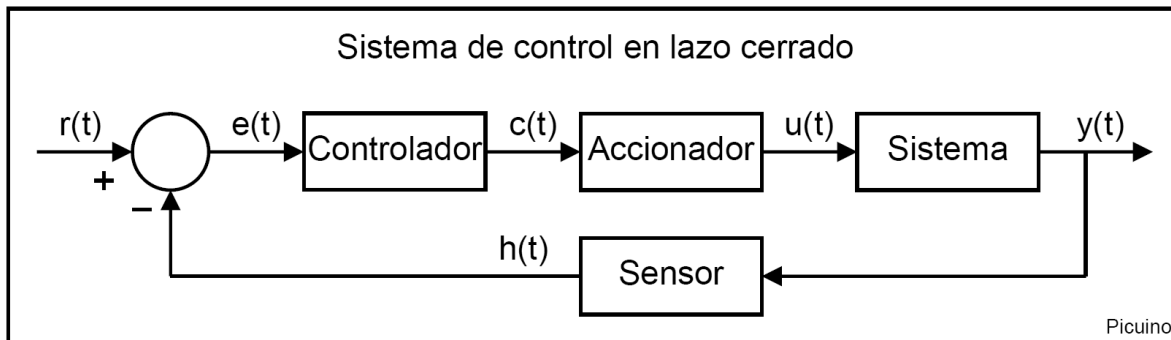


Figura 1.9 Diagrama de bloques de un sistema de control de lazo cerrado

1.2.3.3 Tipos de controlador

Existen una gran variedad de algoritmos de control los cuales presentan ventajas y desventajas frente a determinada aplicación. Algunos ejemplos de estos algoritmos se mencionan a continuación.

- Control proporcional
- Control integral
- Control derivativo
- Control PID
- Control por lógica difusa
- Redes neuronales

En nuestro caso, para el control de velocidad de los motores se utilizará el algoritmo de control PID, el cual se detalla a continuación

1.2.3.4 Control PID

El algoritmo de control PID es uno de los más utilizados en sistemas de control industrial, consiste en el cálculo continuo del valor del error entre la variable deseada y la real, minimizando este error en el tiempo.

1.2.3.4.1 PID continuo

La señal de control del algoritmo PI en tiempo continuo es la siguiente:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t)dt + K_d \frac{de(t)}{dt}$$

La cual está formada por 3 términos:

$$\textit{proporcional} = K_p e(t)$$

Este término produce una señal de control proporcional al valor del error actual según la ganancia K_p

$$\textit{integral} = K_i \int_0^t e(t)dt$$

El término integral produce una señal de control que permite incluir los errores pasados de la señal del error.

Permite acelerar el tiempo de respuesta del proceso y elimina el error en estado estable, aunque a veces puede causar sobreimpulsos debido a una gran acumulación de errores pasados.

$$\textit{derivativo} = K_d \frac{de(t)}{dt}$$

El término derivativo produce una señal de control que depende de los posibles valores futuros del error.

Permite predecir el comportamiento del sistema, mejorando la estabilidad y el tiempo de respuesta.

1.2.3.4.2 Control PID discreto

El uso de un control PID en un microcontrolador se logra discretizando el algoritmo PID discreto previamente mencionado, el resultado de esta discretización se muestra a continuación:

Para cada iteración, cada cierto tiempo dt :

$$proporcional = K_p \text{ errorActual}$$

$$integral = integral + K_d * \text{errorActual} * dt$$

$$derivativo = K_d \frac{\text{errorActual} - \text{errorPasado}}{dt}$$

Para la implementación de este algoritmo en el microcontrolador, se crearán 4 variables:

errorActual: Valor del error actual, se calcula en esa iteración.

errorPasado: Valor del error en una iteración antigua. Luego de finalizar la iteración actual, se asigna como valor el error actual.

integral: Se almacena todos los valores de la parte integral del PID de cada iteración.

dt: Tiempo que paso entre cada llamada a la función PID, en este case será constante debido a que la función PID se llamara constantemente cada cierto tiempo por una interrupción generada por un timer.

1.2.3.4.3 Controlador PID para el motor

En la Figura 1.10 se muestra el diagrama de bloques del controlador PID que utiliza M. Dechrit *et al*, 2011 [11]. El modelo que se presenta es una aproximación que se realizó para que la plantan quede de 1er orden. Los parámetros del motor normalmente son proporcionados por el proveedor o se puede hallar empíricamente.

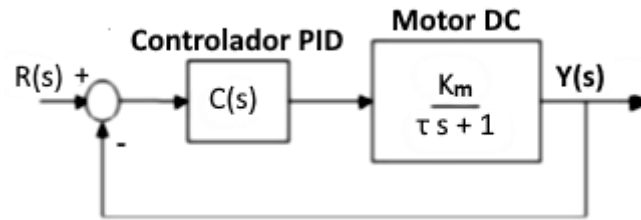


Figura 1.10 Diagrama de bloques del controlador PID [11]

$$F.T(s) = \frac{(K_D s^2 + K_P s + K_I) K_m}{(K_D K_m + \tau) s^2 + (1 + K_P K_m) s + K_I K_m} \quad (1.4)$$

$$\text{Con, ganancia } K_m = \frac{K_T}{R_a B + K_b K_T} \quad (1.5)$$

$$\text{Constante de tiempo } \tau = \frac{R_a J}{R_a B + b K_T} \quad (1.6)$$

1.2.3.5 Tipos de control

Otros tipos de control aplicados a las sillas de ruedas son: control de velocidad, control de la tracción, control de la suspensión y control de la estabilidad [6].

- **Control de la velocidad:** Este tipo de control es el más aplicado en las sillas de ruedas eléctricas. Para la operación de la silla el usuario genera señales de comando mediante un joystick o algún otro dispositivo; posteriormente un controlador electrónico ajusta el voltaje de alimentación a los motores de proporcionalmente a la señal de comando.
- **Control de la suspensión:** Las sillas de ruedas que no poseen un control de suspensión pueden exponer al usuario a golpes traumáticos y vibraciones excesivas lo cual puede causar fatiga mental y física pudiendo empeorar el estado del usuario. Lo que se busca con el control de suspensión es evitar todos estos problemas mediante un mecanismo de suspensión que permita variar sus parámetros según la superficie en la que se encuentre y el peso del paciente.
- **Control de la estabilidad:** Lo que busca este tipo de control es garantizar la estabilidad de la silla de ruedas con el fin de evitar caídas o volcaduras.

CAPITULO 2

METODOLOGÍA DEL DISEÑO

En el presente capítulo se presenta la metodología basada en la recomendación europea VDI 2225 “Métodos de ingeniería de diseño” utilizada para la selección del mejor concepto de solución para la parte mecánica. Para el diseño de la silla de ruedas, se tomara como base un diseño mecánico previo [2]; y utilizando la metodología se obtendrán diversos conceptos de solución, los cuales se evaluarán mediante criterios técnicos/económicos para obtener una solución óptima.

La metodología se divide en los siguientes pasos:

Lista de exigencias

Se realiza una lista con los requerimientos que la solución a plantear requiere, indicando si son exigencias o deseos según la importancia de estos para el cliente/usuario.

Estructura de funciones

Basándose en los requerimientos previamente descritos, se crean diversos portadores de funciones que describirán tareas que la silla de ruedas deberá de realizar para cumplir con las funcionalidades requeridas.

Matriz morfológica

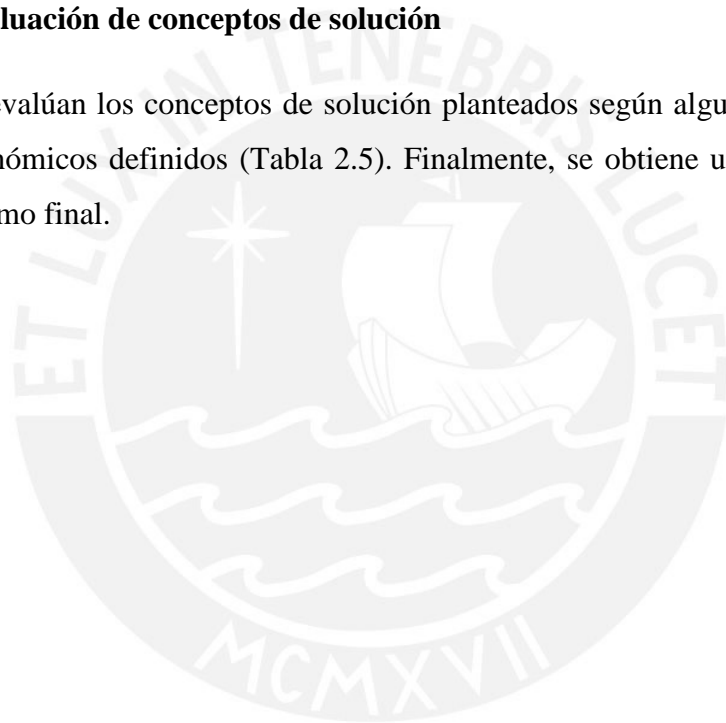
Se elaborarán tablas para cada dominio de la solución, en las cuales se presentan diversas soluciones a las funciones previamente definidas (Tabla 2.4)

Conceptos de solución

Se escogen soluciones para cada función de la matriz morfológica; y combinándolas, se generan los conceptos de solución. En las Figuras 2.11, 2.12, 2.13 se pueden observar bocetos de dichos conceptos de solución.

Evaluación de conceptos de solución

Se evalúan los conceptos de solución planteados según algunos criterios técnicos y económicos definidos (Tabla 2.5). Finalmente, se obtiene un concepto de solución óptimo final.



2.1 Lista de exigencias

Esta lista se realiza a partir de una solicitud o un pedido concreto de un cliente para la fabricación de un sistema técnico, en la cual se documentan una serie de exigencias debidamente clasificadas y cuantificadas. En este caso, la lista se construyó con los objetivos planteados en el plan de tesis.

Esta lista de requerimientos se dividirá en exigencias y deseos, a continuación se explica el significado de cada uno de estos:

Exigencias: Son los requerimientos que se deberán cumplir bajo cualquier circunstancia.

Deseos: Son aspiraciones que de no ser alcanzadas no deberán generar algún problema con el correcto funcionamiento del sistema.

En la Tabla 2.3 se puede apreciar la lista de exigencias realizada

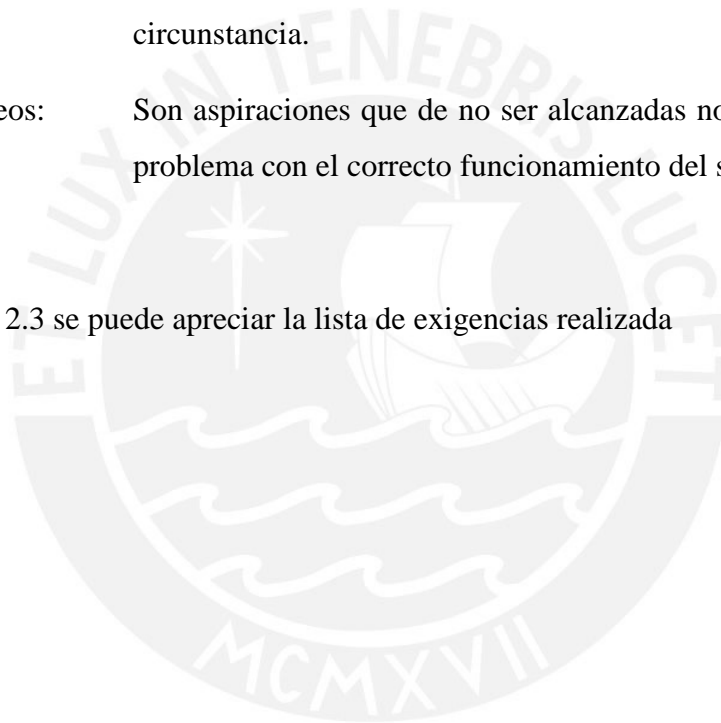


Tabla 2.3 Lista de exigencias

D/E*	REQUERIMIENTOS
E	<p>FUNCIÓN PRINCIPAL Silla de ruedas multifuncional para niños de hasta 12 años que sufran de distrofia muscular de Duchenne con un peso máximo de 20 kg. Las funciones que cumplirá son 4: Silla de ruedas, camilla y bipedestación.</p>
D	<p>FUNCIONALIDAD DESEADA Compactibilidad de la silla de ruedas para que sea posible el traslado de esta hacia otros lugares de una forma sencilla.</p>
E	<p>ERGONOMÍA Diseño mecánico de silla deberá contemplar aspectos ergonómicos como al correcta altura del asiento, los apoyabrazos, inclinación del espaldar, ubicación de las almohadillas en el espaldar, cabeza y pies.</p>
E	<p>ENERGÍA Componentes electrónicos alimentados por 2 baterías de 12V, debido al voltaje de alimentación de los actuadores lineales y motores.</p>
E	<p>SEGURIDAD Deberá contar con mecanismos de seguridad que permitan evitar la volcadura de la silla o la caída de la persona al realizar cualquiera de sus funciones. Así como, protecciones eléctricas para evitar algún accidente en caso de falla de los equipos electrónicos.</p>
E	<p>CONTROL La silla de ruedas se controlara mediante un joystick ubicado al lado derecho de la silla de ruedas; así como mediante un teclado matricial, el cual permitirá seleccionar la funcionalidad deseada.</p>
D	<p>CONTROL Adicionalmente, se desea que la silla de ruedas y sus funcionalidades se controlen mediante un dispositivo móvil a través de una aplicación para dispositivos Android, mediante el cual se simule un teclado y un joystick virtual para la selección de las funcionalidades de la silla y el movimiento de sus actuadores</p>
E	<p>PRESUPUESTO El objetivo es que el precio final de la silla de ruedas sea asequible, por lo que deberá de ser sustancialmente menor que el de las sillas comerciales, que ofrezcan funcionalidades similares (\$ 6900, Tabla 1.1).</p>
D	<p>FABRICACIÓN En caso se logre realizar la fabricación de esta silla de ruedas, se tratara de emplear materiales y equipos que se encuentren disponibles, en el mercado nacional.</p>

*D/E: Deseos (D) o Exigencias (E)

2.2 Estructura de funciones para el cambio de funcionalidad

Se definieron 4 acciones que la silla de ruedas deberá realizar para que mediante la combinación de estas se pueda llegar a cumplir con las funcionalidades deseadas, las acciones definidas son: Girar al espaldar, girar el apoyapié, girar el asiento y trasladar el asiento.

2.2.1 Girar el espaldar

Rotación del espaldar de la silla de ruedas respecto a un punto de apoyo ubicado en el asiento. Este giro permitirá posicionar el espaldar horizontalmente o verticalmente según sea la función requerida; así como, graduar el ángulo de inclinación del espaldar según lo desee el usuario.

2.2.2 Girar el apoyapié

Rotación del apoyapié de la silla de ruedas respecto a un punto de apoyo ubicado en el asiento. Este giro permitirá posicionar el apoyapié horizontalmente o verticalmente según sea la función requerida; así como, graduar el ángulo de inclinación del apoyapié según lo desee el usuario.

2.2.3 Girar el asiento

Rotación del asiento y sus todos los componentes unidos a este (espaldar, apoyapié, actuadores, almohadillas, etc.) de la silla de ruedas respecto a un punto de apoyo ubicado en la estructura. Este giro es necesario principalmente para ubicar a la silla en la posición bipedestación, pero también servirá para que el usuario gradúe la inclinación del asiento según su preferencia.

2.2.4 Trasladar el asiento

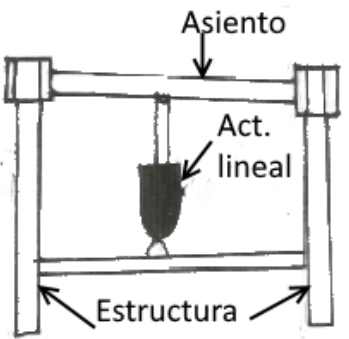
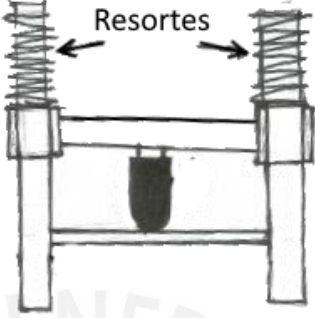
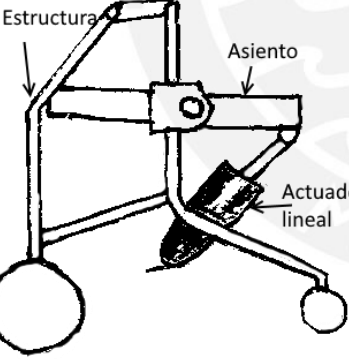
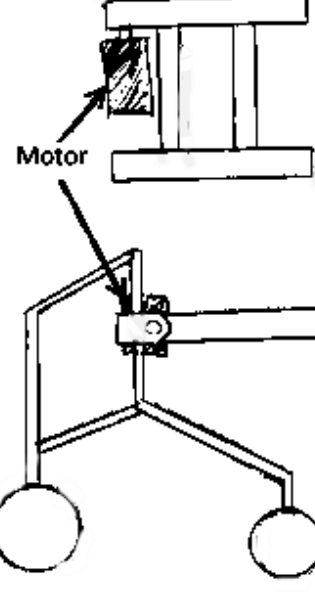
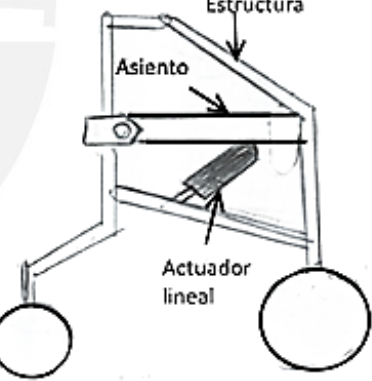
Traslación vertical del asiento para subir o bajar la altura del usuario respecto al suelo. Esta translación es necesaria principalmente para subir la altura de la silla antes de llegar a la posición bipedestación, pero también servirá para que el usuario gradúe la altura de la silla según su preferencia.

2.3 Matriz morfológica para el cambio de funcionalidad

Se realizó la matriz morfológica, mostrada en la Tabla 2.4, para las acciones definidas previamente; las cuales son mecanismos que permitirán la realización de las funciones deseadas.

Tabla 2.4 Matriz morfológica

Acciones	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Giro del espaldar	<p>Actuador lineal ubicado en el asiento</p>	<p>Motor ubicado al costado del asiento</p>	<p>Actuador lineal ubicado en la estructura</p>
Giro del apoya-pies	<p>Actuador lineal ubicado en el asiento</p>	<p>Motor ubicado al costado del asiento</p>	<p>Actuador lineal ubicado en la estructura</p>

<p>Levantamiento de la silla</p>	<p>Actuador lineal ubicado en la estructura</p>  <p>Asiento Act. lineal Estructura</p>	<p>Actuador lineal ubicado en la estructura con resortes de soporte</p>  <p>Resortes</p>	
<p>Giro del asiento</p>	<p>Actuador lineal ubicado en la estructura</p> <p>Concepto 1</p>  <p>Estructura Asiento Actuador lineal</p>	<p>Motor ubicado en el asiento</p> <p>Concepto 2</p>  <p>Motor</p>	<p>Actuador lineal ubicado en la estructura(II)</p> <p>Concepto 3</p>  <p>Estructura Asiento Actuador lineal</p>

2.4 Conceptos de solución

Uniendo las distintas acciones de la matriz morfológica se obtuvieron 3 conceptos de solución para la realización del cambio de funcionalidad de la silla de ruedas, los cuales se muestran a continuación.

Estos conceptos de solución utilizan una estructura de soporte similar a la previamente realizada en el diseño mecánico [2], pero con modificaciones para que pueda aguantar el peso y fuerza ejercida por los actuadores lineales encargados del levantamiento y del giro del asiento y el peso adicional de todos los componentes electrónicos. Adicionalmente se incluirá una caja en la parte inferior (cerca de las ruedas posteriores) en la que se ubicarán las baterías, las tarjetas electrónicas. Se añadirán tubos rectangulares transversales, los cuales permitirán unir y soportar a los actuadores lineales y a la caja electrónica.

2.4.1 Concepto de solución 1

En este concepto de solución se coloca la unión de la estructura con la silla en medio del asiento, con el fin de realizar el giro de la silla mediante una contracción del actuador lineal 3, el cual se conecta al asiento en la zona cercana al apoyapié. En esta opción el centro de gravedad de la silla se ubicara cerca al centro de gravedad de la estructura, por lo que se la estabilidad de la silla no será un problema. Se utilizarán actuadores lineales para la realización de todos los movimientos deseados. En la Figura 2.11 se puede apreciar el concepto de solución.

Se ubican los actuadores lineales, según la función que realizan, de la siguiente forma:

- Giro del espaldar: Se utiliza un actuador lineal (1) soportado por el asiento.
- Giro del apoyapiés: Se utiliza un actuador lineal (2) soportado por el asiento.
- Giro del asiento: Se utiliza un actuador lineal (3) soportado por la estructura.
- Levantamiento: Se utiliza un actuador lineal (4) soportado por la estructura.

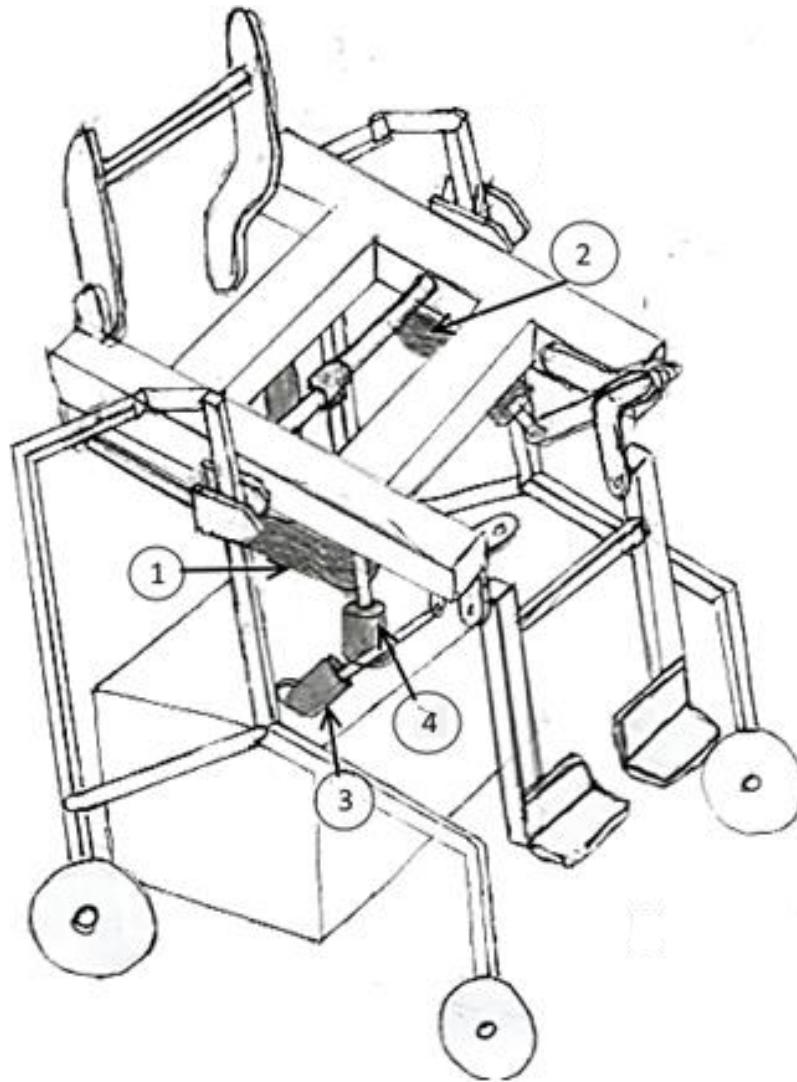


Figura 2.11 Concepto de solución 1

2.4.2 Concepto de solución 2

En este concepto de solución, al igual que el anterior, se coloca la unión de la estructura con la silla en medio del asiento, con el fin de realizar el giro de la silla mediante una extensión del actuador lineal 3, el cual se conectará al asiento en la zona cercana al espaldar. Se utilizarán actuadores lineales y motores para la realización de los movimientos deseados. En la Figura 2.12 se puede apreciar el concepto de solución.

Se ubican los actuadores, según la función que realizan, de la siguiente forma:

- Giro del espaldar: Se utilizó un motor (1) soportado por el asiento.
- Giro del apoyapiés: Se utilizó un motor (2) soportado por el asiento.
- Giro del asiento: Se utilizó un motor (3) soportado por la estructura.
- Levantamiento: Se utilizó un actuador lineal (4) soportado por la estructura.

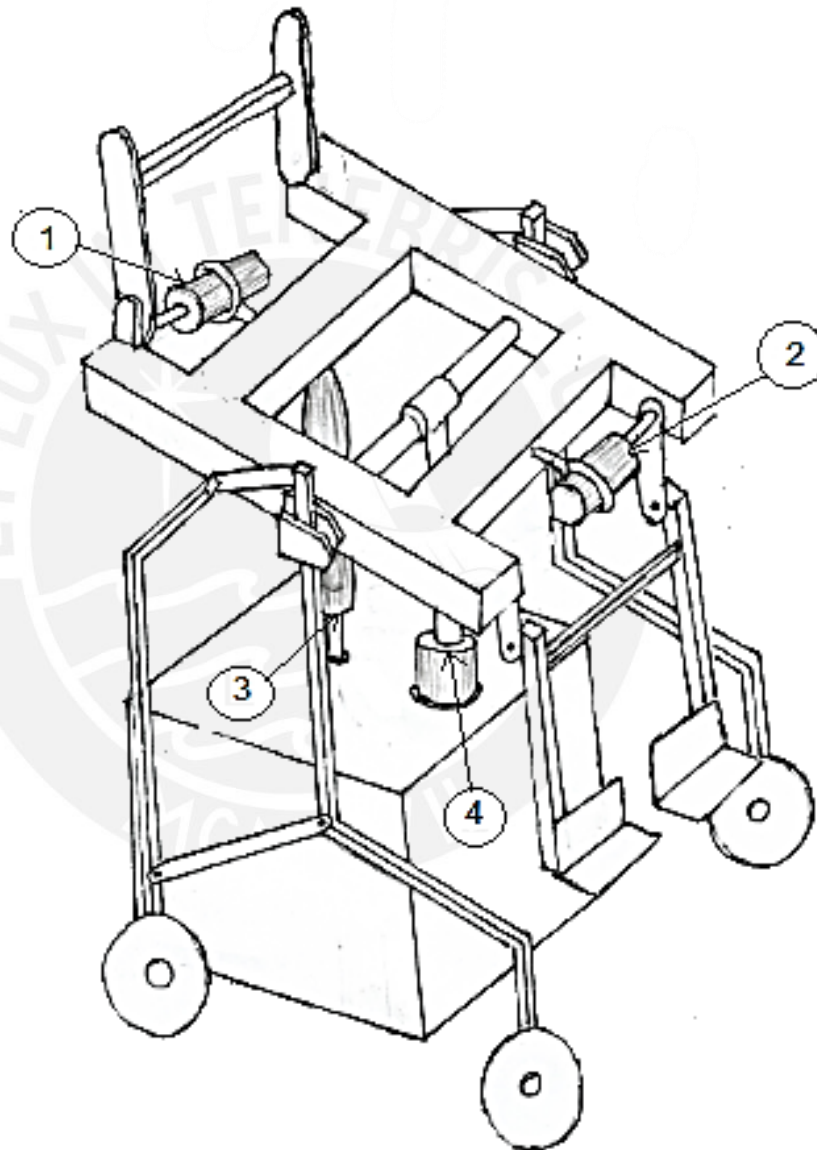


Figura 2.12 Concepto de solución 2

2.4.3 Concepto de solución 3

En este concepto de solución se coloca la unión de la estructura con la silla en el extremo más cercano al apoyapiés, con el fin de poder realizar el giro de la silla mediante una extensión del actuador lineal 3. El centro de gravedad de la silla puede ubicarse cercano a la ubicación de las reacciones en las ruedas, por lo que se deberá de analizar bien esto en caso se decida por esta solución. Se utilizarán actuadores lineales para la realización de los movimientos deseados. En la Figura 2.13 se puede apreciar el concepto de solución.

Se ubican los actuadores lineales, según la función que realiza, de la siguiente forma:

- Giro del espaldar: Se utilizó un actuador lineal (1) soportado por el asiento.
- Giro del apoyapiés: Se utilizó un actuador lineal (2) soportado por el asiento.
- Giro del asiento: Se utilizó un actuador lineal (3) soportado por la estructura.
- Levantamiento: Se utilizó un actuador lineal (4) soportado por la estructura.

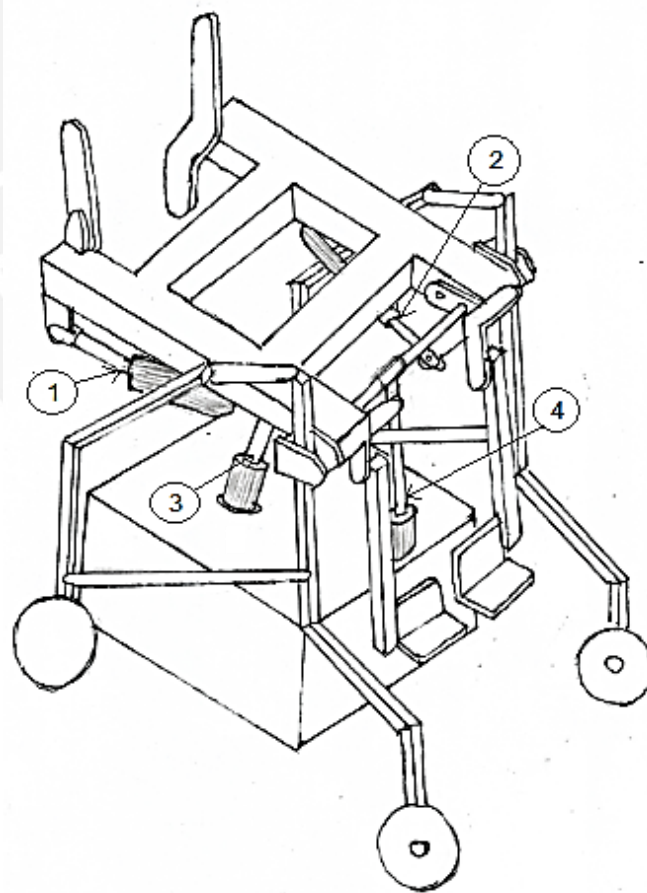


Figura 2.13 Concepto de solución 3

2.5 Análisis de conceptos de solución

El análisis de los conceptos de solución se realizó mediante la definición de diversos criterios técnicos y económicos que permitan evaluar los conceptos de solución definidos. A cada concepto de solución se le fue asignado un valor por cada criterio (1-5, mayor valor significa que cumple mejor con el concepto), así como, se definió 2 pesos por cada criterio (usuarios y técnico) para finalmente, obtener una suma ponderada final. El concepto de solución que obtenga el mayor valor será el elegido.

En la Tabla 2.5 se muestra la evaluación realizada.

2.5.1 Definición de los pesos

Mayor peso significa que es de mayor importancia para el correcto funcionamiento de la silla de ruedas. Se asignaron 2 tipos de pesos según la importancia que representa para los usuarios y los especialistas. A continuación se explica cómo se obtuvieron estos pesos

Usuarios: Se preguntó a familiares de niños que padezcan este síndrome sobre cuáles de estos criterios serían los más importantes y en base a esto se asignaron los pesos según relevancia.

Técnico: Basados en la opinión de especialistas en rehabilitación (doctores, licenciados y técnicos) acerca de cuáles serían los criterios más importantes a la hora de realizar el diseño para asegurar que la silla cumpla con la lista de exigencias previamente definida.

2.5.2 Criterios técnicos

A continuación se listan los criterios técnicos definidos; así como, se realiza una breve explicación de estos.

Estabilidad: Se evaluó los riegos de volcadura de la silla de ruedas según como se distribuye el peso en cada concepto de solución.

Sistema de control: En este punto se evaluó la simplicidad del sistema de control necesario para lograr el funcionamiento de la silla de ruedas.

- Mecanismos adicionales:** En este punto se evaluó la simplicidad de los mecanismos adicionales que se requieren para poder sujetar los componentes electrónicos (caja electrónica, motores, actuadores lineares).
- Peso:** Se evalúa que solución presenta menor peso.
- Componentes extra:** Se evalúa la cantidad de componentes mecánicos y electrónicos extras necesarios respecto al diseño mecánico previo.
- Velocidad de acoplamiento:** Se evalúa que tan rápido se podrá realizar el acoplamiento/desacoplamiento de los componentes.
- Velocidad para funciones:** Se evalúa que tan rápido se podrán realizar las funciones deseadas (giros y traslaciones).

2.5.3 Criterios económicos

A continuación se listan los criterios económicos definidos; así como, se realiza una breve explicación de estos

- Adquisición de componentes:** Se evalúa la disponibilidad de los componentes a utilizar en el mercado peruano
- Costo de tecnología:** Se evalúa el costo de los componentes a utilizar en el mercado peruano
- Montaje:** Se evalúa la sencillez para la realización del montaje/desmontaje de los motores/actuadores lineales.
- Mantenimiento:** Se evalúa la sencillez de la realización del mantenimiento de los motores/actuadores lineales.

Tabla 2.5 Evaluación de conceptos de solución

No.	Criterios técnicos y económicos	Peso		Soluciones			
		Usuarios	Técnico	1	2	3	Ideal
1	Estabilidad	1	2	5	5	3	5
2	Sistema de control	2	1	5	3	5	5
3	Mecanismos adicionales	1	2	5	3	5	5
4	Peso	3	2	4	5	3	5
5	Componentes extra	1	1	4	2	5	5
6	Velocidad de acoplamiento	2	3	5	2	5	5
7	Velocidad para funciones	1	1	3	4	3	5
8	Adquisición de componentes	1	2	3	5	3	5
9	Costo de tecnología	3	3	3	5	3	5
10	Montaje	1	1	5	2	4	5
11	Mantenimiento	1	1	5	3	5	5
	SUMA TOTAL			47	39	44	55
			%	85.45	70.91	80	100
			Suma ponderada	134	130	124	165
			%	81.21	78.79	75.15	100

Según el análisis mostrado en la tabla 2.5 y considerando los pesos asignados a la importancia de cada criterio para los usuarios/ técnicos, el **concepto de solución 1** es el más adecuado debido a que logra obtener el mayor puntaje posible a comparación de los otros 2 conceptos de solución; por lo que será este el que se escoja para la realización del cambio de funcionalidad de la silla de ruedas.



CAPITULO 3

COMPONENTES MECÁNICOS

En el presente capítulo se detallan los componentes mecánicos que se utilizarán del trabajo previo realizado por Roberto Furukawa *et al*, 2014 [2], así como los demás componentes que forman la parte mecánica (estructura, asiento, espaldar, apoyapié y caja electrónica). También se mostrara a la silla en todas las funcionalidades definidas y se explicarán los elementos/mecanismos que hacen posible mover los componentes de la silla para que esta llegue a las funciones deseadas. A continuación, se detallarán los actuadores lineales escogidos, se realizara un análisis de la estabilidad de la silla y; finalmente, se analizarán los elementos mecánicos más críticos.

3.1 Componentes utilizados del trabajo previo

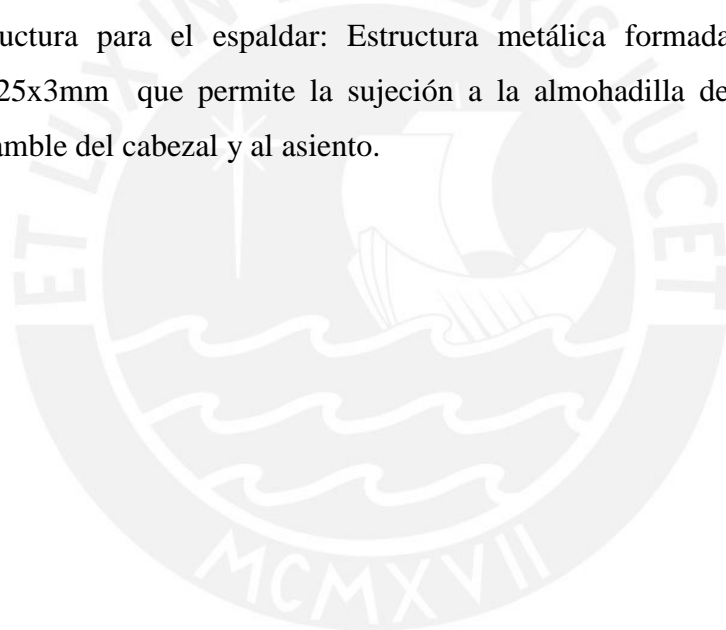
Como se mencionó anteriormente, para el desarrollo de la parte mecánica, se utilizaron algunas partes totalmente o modificadas de un diseño mecánico previo de una silla de ruedas mecánica multifuncional realizado por Roberto Furukawa, Dante Elías y Toshiro Tabuchi [2]. A continuación se nombrarán las piezas que se utilizaron, según haya sido su uso sin modificaciones o con modificaciones.

3.1.1 Uso sin modificaciones

- Unión de ruedas delanteras con estructura: Ensamble formado por un cilindro metálico, rodadura, perno y tuerca, el cual permite la unión de la rueda delantera con la pata delantera.
- Patas traseras: Tubo cuadrado 25x25x3mm que forma parte de la estructura. Este se encuentra doblado de una determinada forma geométrica para la unión con las patas delanteras. Así como, se unirá a los motores.
- Ensamble de tubo transversal: Tubo cuadrado 25x25x3mm unido por soldadura a unas placas metálicas para su unión, mediante pernos, con las patas traseras.
- Almohadilla para el cabezal: Almohadilla ubicada en el cabezal cuya función es brindar soporte y confort a la cabeza del usuario.
- Almohadilla para el espaldar: Almohadilla ubicada en el espaldar cuya función es brindar soporte y confort a la espalda del usuario.
- Estructura para el cabezal: Estructura metálica formada por tubos cuadrados 25x25x3 mm que permite la sujeción a la almohadilla y se une al espaldar.
- Ensamble para el apoyapié: Ensamble formado por una estructura metálica, tablas de madera, almohadillas y un soporte para los pies.

3.1.2 Uso con modificaciones

- Patas delanteras: Tubo cuadrado 25x25x3mm que forma parte de la estructura. Este se encuentra doblado de una determinada forma geométrica para la unión con las ruedas delanteras. Así como, se une mediante soldadura a otro tubo 25x25x3mm para poder unirse con los ensambles transversales para la unión de las patas delanteras/traseras y al ensamble transversal que soporta a uno de los actuadores lineales.
- Corredera: Pieza que permite la unión del asiento a la estructura.
- Almohadilla para el asiento: Almohadilla ubicada en el asiento cuya función es brindar soporte y confort a los glúteos y muslos del usuario.
- Estructura para el espaldar: Estructura metálica formada por tubos cuadrados 25x25x3mm que permite la sujeción a la almohadilla del espaldar y se une al ensamble del cabezal y al asiento.



3.2 Componentes mecánicos

Los elementos que conforman la parte mecánica son los siguientes: estructura, asiento, espaldar, apoyapié y caja para componentes electrónicos.

3.2.1 Estructura

La estructura está formada por una unión de tubos cuadrados, tubos rectangulares, ruedas frontales, ruedas traseras y los soportes de los actuadores lineales. Esta permitirá soportar a la silla (asiento, espaldar, apoyapié y actuadores lineales 1-2), caja electrónica y actuadores lineales 3-4; así como se conectará con los motores para la realización del movimiento. La estructura se puede apreciar en la Figura 3.14.

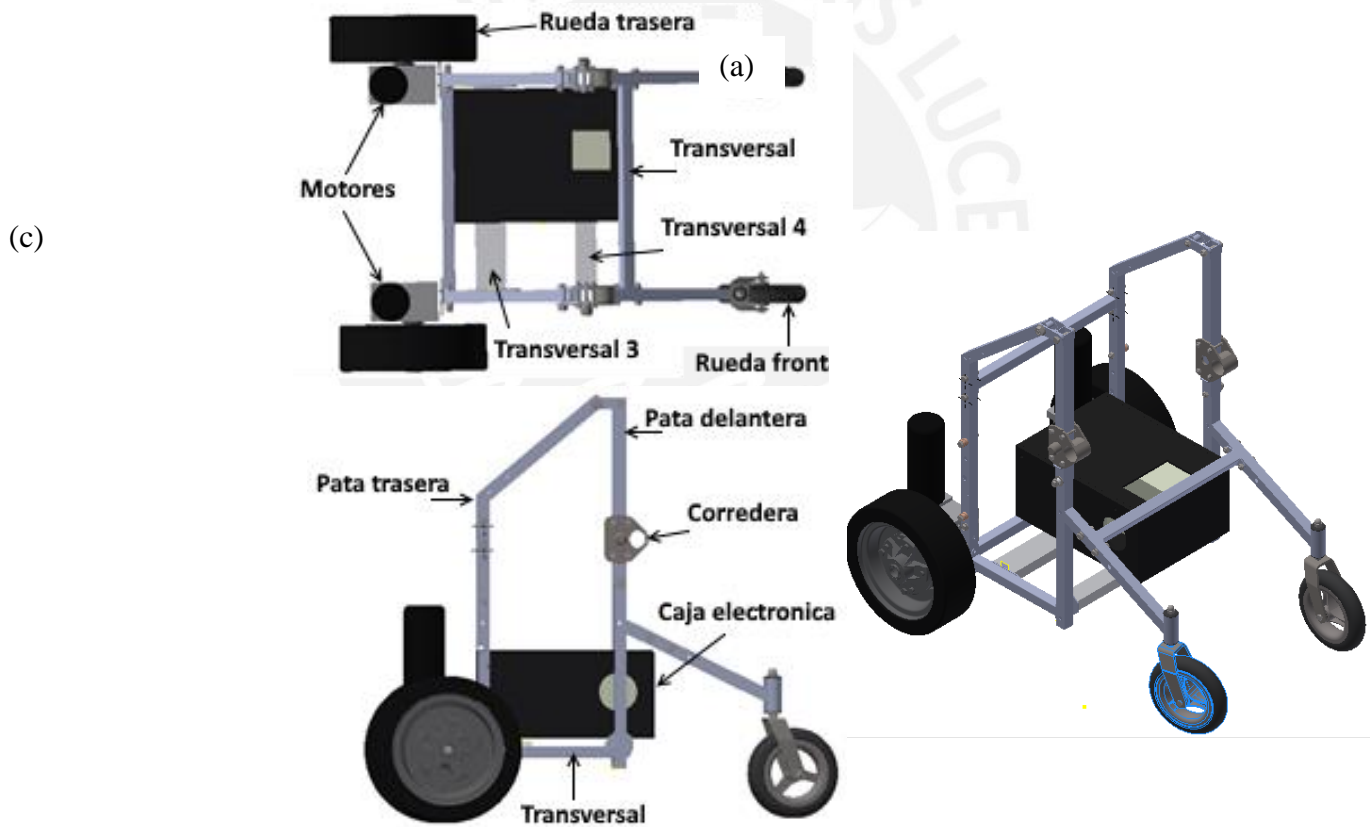


Figura 3.14 Estructura. Vista superior(a) lateral (b) isométrica(c)

Los elementos mostrados en la Figura 3.15 permitirán la conexión del actuador lineal 3, encargado del giro del asiento, y el actuador lineal 4, encargado del levantamiento de la silla, con la estructura.

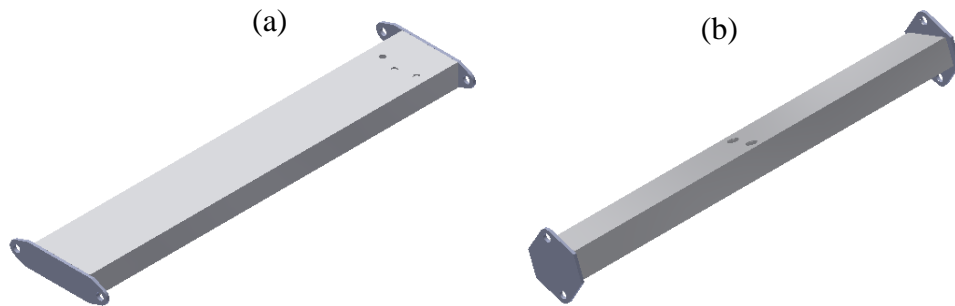


Figura 3.15 Transversales para la unión de los actuadores. Actuator lineal 3(a) Actuator lineal 4(b)

El plano de ensamble de la estructura se detalla en el Anexo A.2.6

3.2.2 Asiento

El asiento es el elemento que unirá la silla (espaldar, asiento y apoyapié) a la estructura, así como soportara a los actuadores lineales encargados del giro del espaldar y del apoyapié. En la Figura 3.16 se detalla los componentes del asiento.

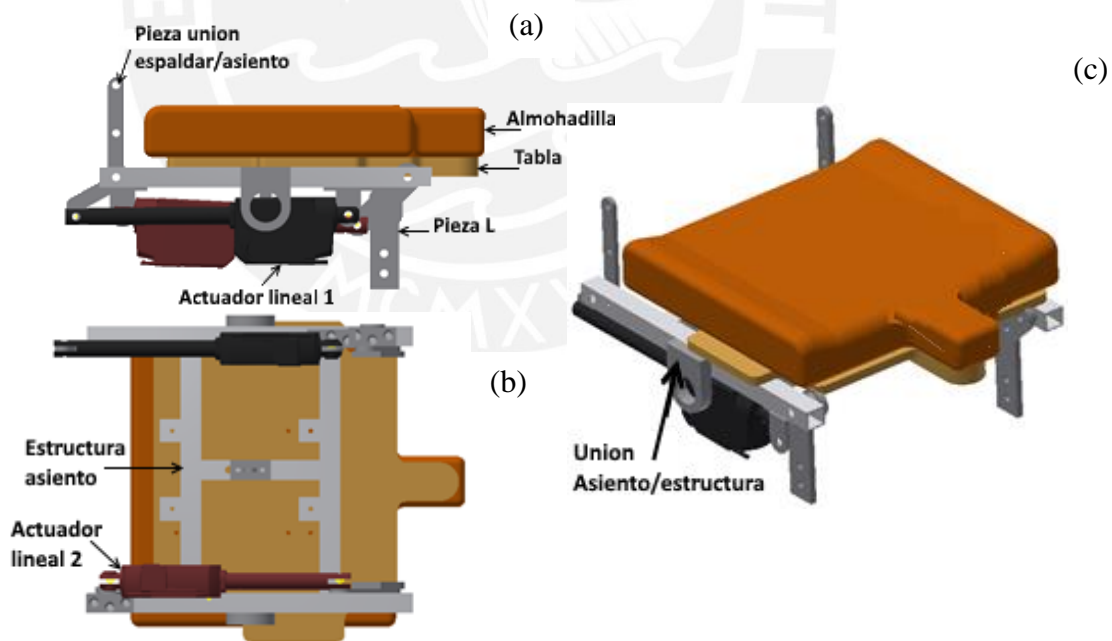


Figura 3.16 Asiento. Vista lateral(a) inferior (b) isométrica(c)

El plano de ensamble del asiento se detalla en el Anexo A.2.3.

3.2.3 Ensamble Superior

El ensamble superior está conformado por los elementos que soportarán la cabeza, la espalda del usuario y el joystick de control de la silla de ruedas. Los elementos que forman parte de este ensamble son el cabezal, el espaldar y el apoya-brazo sobre el cual se ubicara el mando de control (joystick, el teclado y la pantalla LCD). En la Figura 3.17 se muestra este ensamble.

Se puede regular manualmente la altura a la cual está ubicada la almohadilla del cabezal y del espaldar según la comodidad del usuario.

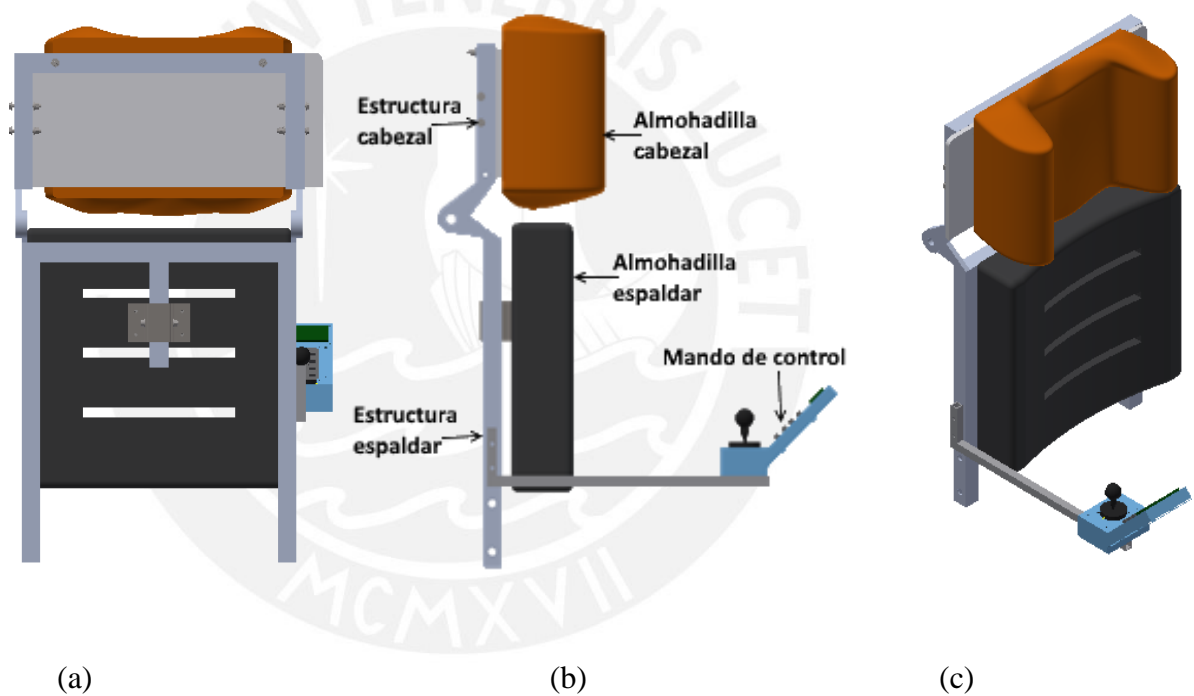


Figura 3.17 Espaldar. Vista trasera(a) lateral (b) isométrica(c)

El plano de ensamble del Ensamble Superior se detalla en el Anexo A.2.2.

3.2.3.1 Mando de control

El mando de control permitirá al usuario controlar el movimiento de la silla y cambiar de funcionalidad según se requiera, mediante el uso de un joystick, teclado matricial y una pantalla LCD. El control de la silla de ruedas se detalla más adelante en el capítulo 4 y 5.

En la Figura 3.18 se puede muestran los componentes en un a vista frontal, lateral e isométrica.

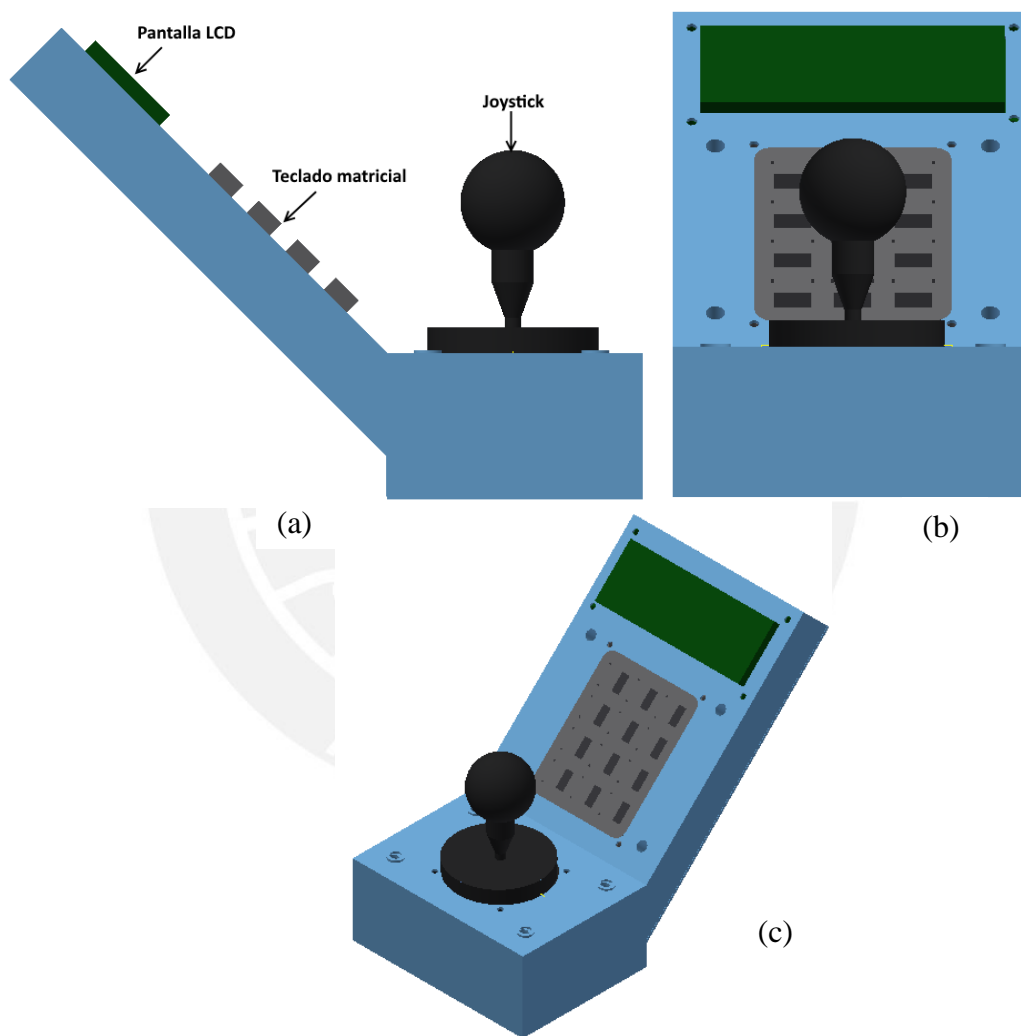


Figura 3.18 Mando de control (a) Vista lateral, (b) Vista frontal, (c) Vista isométrica

El plano de ensamble del mando de control se detalla en el Anexo A.2.9

3.2.4 Apoyapié

El apoyapié es el conjunto de elementos que permitirán soportar los pies del usuario. Se podrá modificar la distancia de la planta del pie del usuario respecto al asiento manualmente mediante el uso de pernos.

En la Figura 3.19 se muestra al apoyapié.

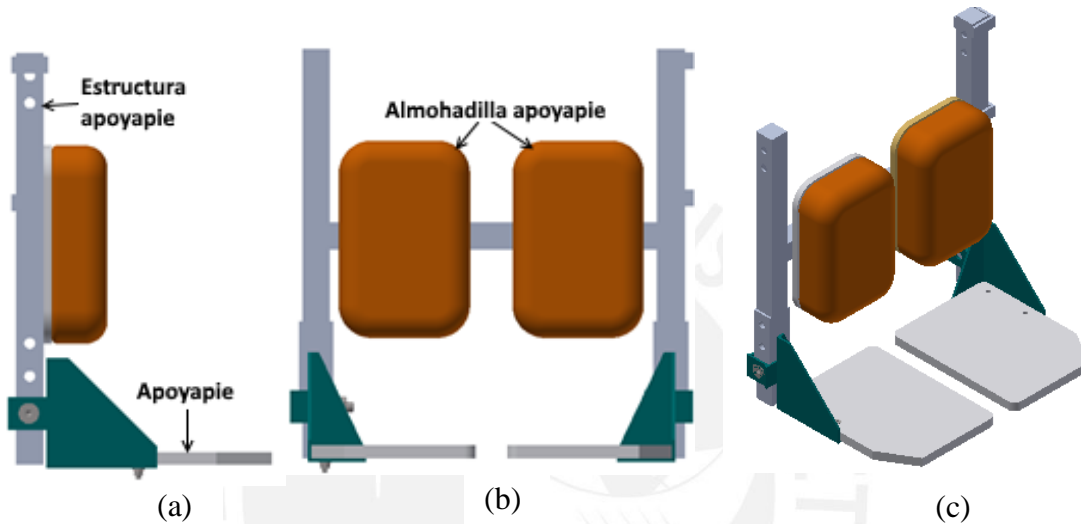


Figura 3.19 Apoyapié. Vista lateral(a) frontal (b) isométrica(c)

El plano de ensamble del apoyapié se detalla en el Anexo A.2.4

3.2.5 Caja para componentes electrónicos

Esta caja, mostrada en la Figura 3.20, soportará y protegerá los componentes electrónicos (baterías y tarjeta electrónica). Ira ubicada en la parte posterior e inferior de la estructura y se asegurará mediante pernos a esta.

Está diseñada para que permita el giro de los actuadores lineales en el rango necesario para que la silla pueda llegar a las posiciones deseadas.

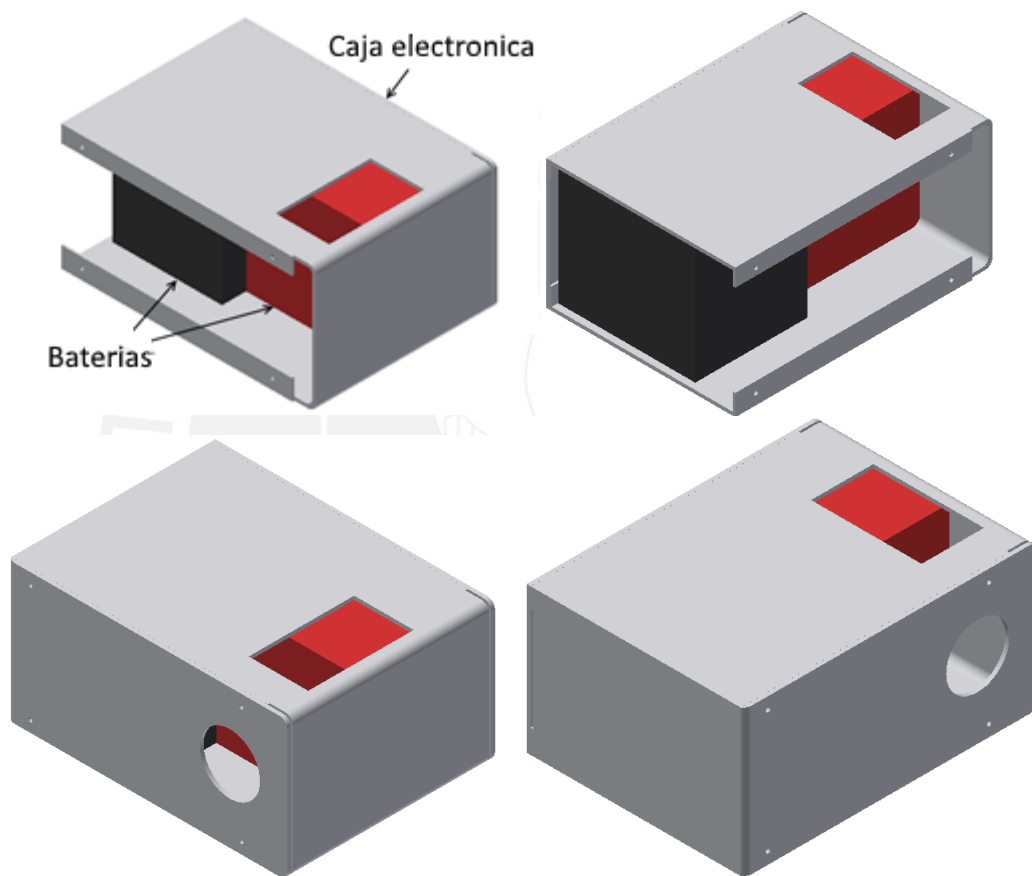


Figura 3.20 Caja sin tapa lateral vistas isométricas (a) (b) Caja con tapa lateral vistas isométricas (a) (b)

El plano de ensamble de la caja electrónica se detalla en el Anexo A.2.8

3.3 Funcionalidades

Como se detalló en los capítulos anteriores, la silla de ruedas contará con 3 funcionalidades: Silla de ruedas, camilla y bipedestación.

3.3.1 Funcionalidad Silla de ruedas

Función silla de ruedas normal, en la cual el asiento se encuentra alineado horizontalmente respecto al piso y el espaldar y el apoyapié se encuentran alineados verticalmente. Adicionalmente, esta funcionalidad permitirá al usuario regular el ángulo de inclinación del espaldar, apoyapié y elevación de la silla respecto al suelo según sea su preferencia.

En la Figura 3.21 se muestran las vistas superior, frontal e isométrica de esta funcionalidad.

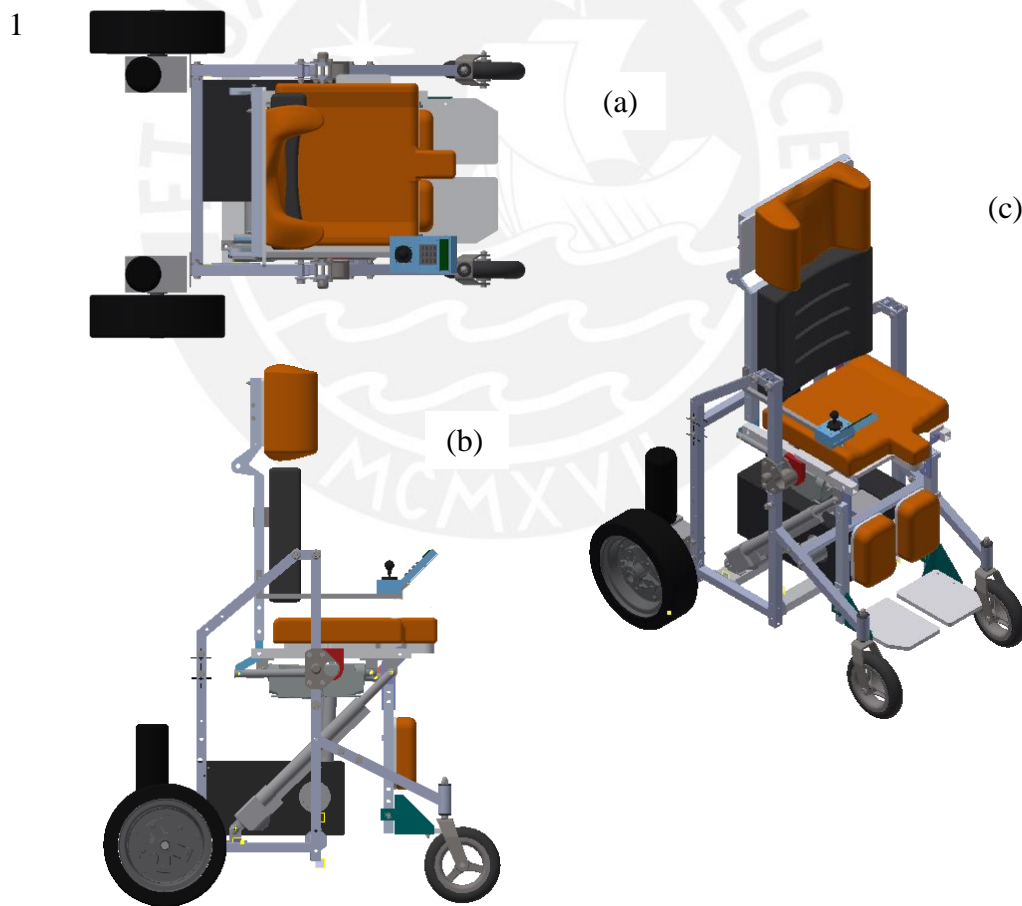


Figura 3.21 Función silla de ruedas – (a) Vista superior (b) Vista frontal

(c) Vista isométrica

3.3.2 Funcionalidad Camilla

Esta función posicionará a la silla de ruedas para que funcione como una camilla. El espaldar y el apoyapié deberán girar hasta ubicarse en una posición paralela al asiento. Adicionalmente, se permitirá que el usuario regule la elevación de la silla respecto al suelo según sea su necesidad.

En la Figura 3.22 se muestran las vistas superior, frontal e isométrica de esta funcionalidad.

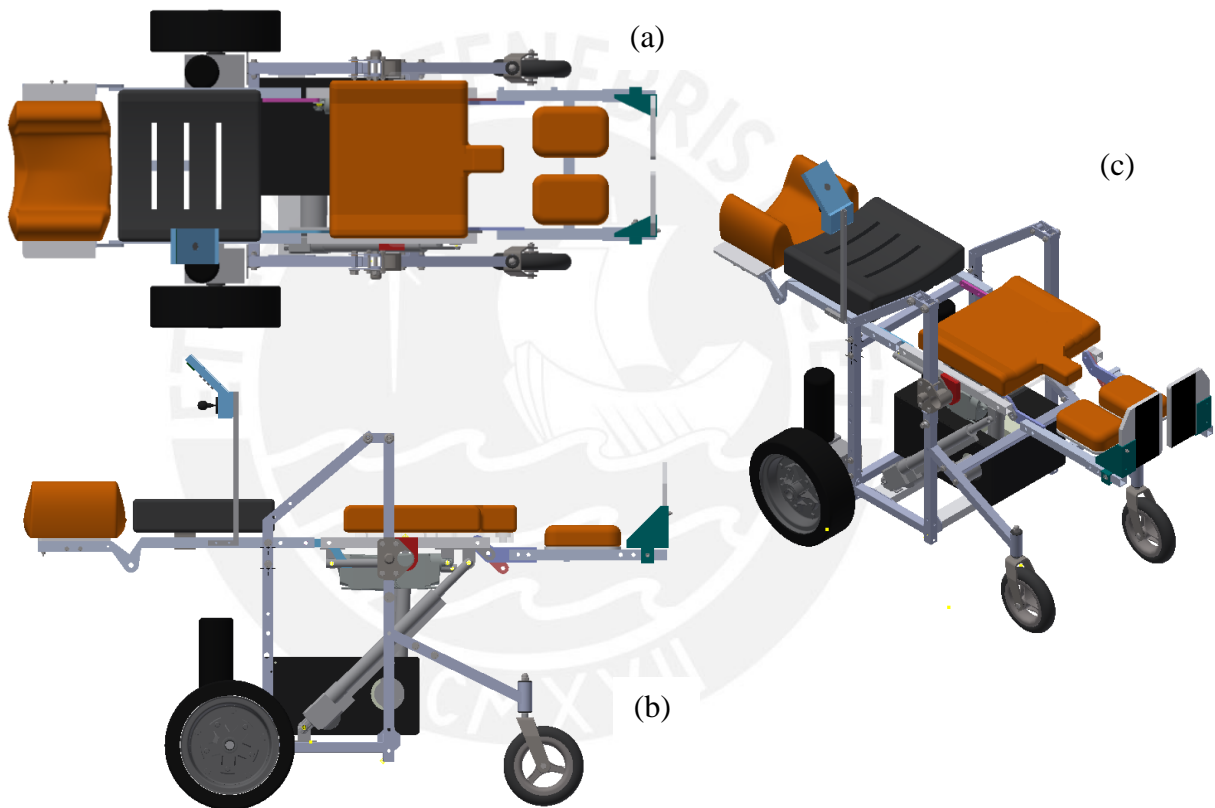


Figura 3.22 Función camilla - - (a) Vista superior (b) Vista frontal

(c) Vista isométrica

3.3.3 Funcionalidad Bipedestación

Esta función posicionará a la silla de ruedas para que se ubique en una posición casi vertical, con un ángulo de inclinación 10° respecto a la vertical, se determinó este ángulo de inclinación para evitar coaliciones entre los componentes de la silla de ruedas, así como para garantizar la seguridad del usuario. El espaldar y el apoyapié deberán girar hasta ubicarse en una posición paralela al asiento, así como el asiento deberá de girar respecto a su punto de apoyo hasta encontrarse en la posición vertical.

En la Figura 3.23 se muestran las vistas superior, frontal e isométrica de esta funcionalidad.

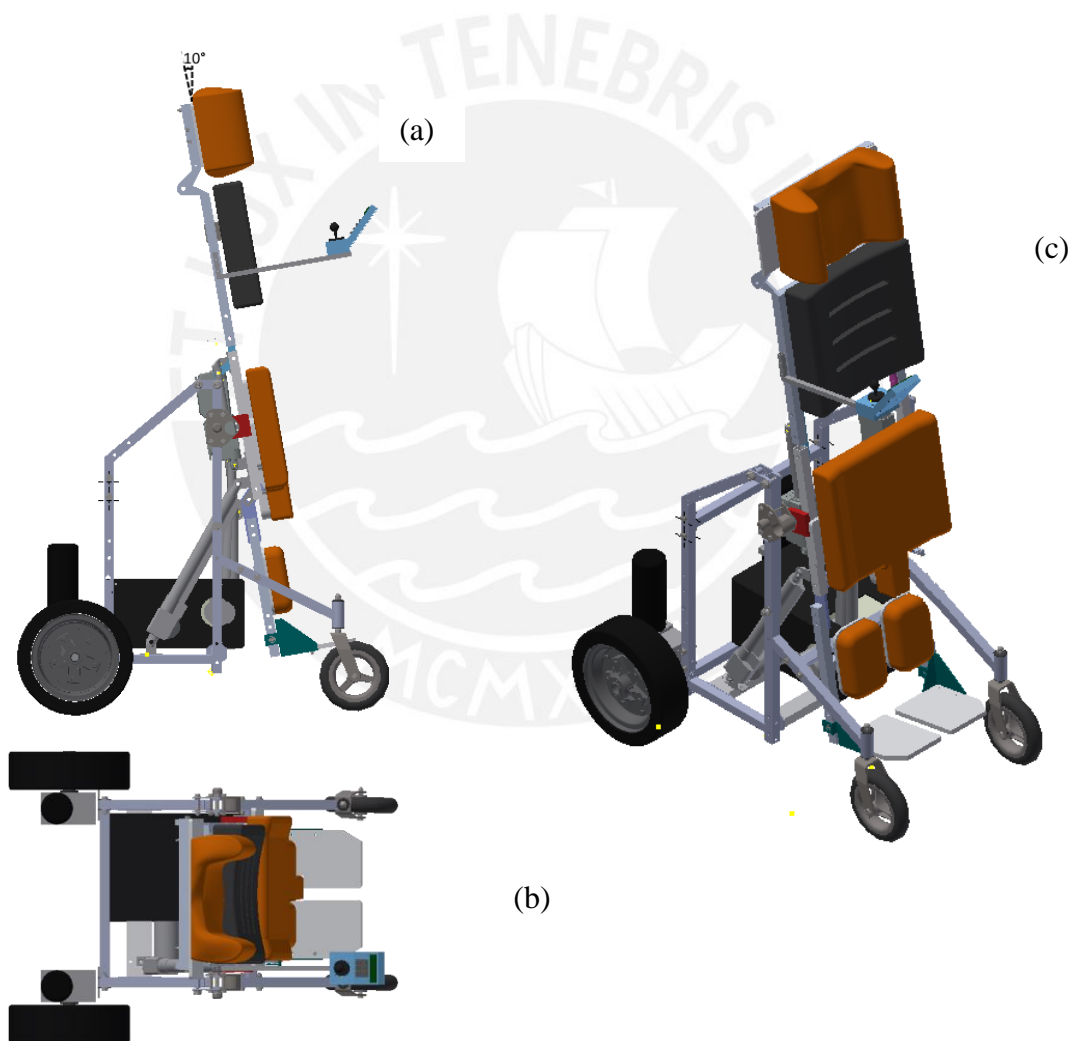


Figura 3.23 Función bipedestación -- (a) Vista frontal (b) Vista superior

(c) Vista isométrica

3.4 Mecanismos para la realización de las diversas funcionalidades

La silla de ruedas presentará 3 rotaciones (espaldar, apoyapié y asiento) y 1 translación (asiento) con el fin de poder posicionar sus elementos para llegar a las posiciones deseadas. En la Tabla 3.6 se muestra que movimiento es necesario para la realización de determinada funcionalidad.

Tabla 3.6 Movimientos requeridos por cada tipo de funcionalidad

FUNCIONALIDAD MOVIMIENTO	FUNCIÓN SILLA DE RUEDAS	FUNCIÓN CAMILLA	FUNCIÓN BIPEDESTACIÓN
Giro del espaldar	Regulable	SI	SI
Giro del apoyapié	Regulable	SI	
Giro del asiento	NO	NO	SI
Traslación del asiento	Regulable *	Regulable *	SI

SI: Necesita realizar este movimiento para llegar a la posición final desde una posición inicial (silla de ruedas)

NO: No necesita realizar este movimiento para llegar a la posición final desde una posición inicial (silla de ruedas)

Regulable *: El usuario podrá regular este movimiento según su preferencia.

A continuación se explican en detalle cada uno de estos movimientos.

3.4.1 Giro del espaldar

Este giro se realizará mediante la acción de un actuador lineal ubicado en el asiento, el cual estará unido a la pieza mostrada en la Figura 3.24 la cual permitirá unir el espaldar y el asiento. Con un punto de apoyo en el asiento, mediante un movimiento de translación proporcionado por el actuador lineal se podrá realizar el giro deseado.

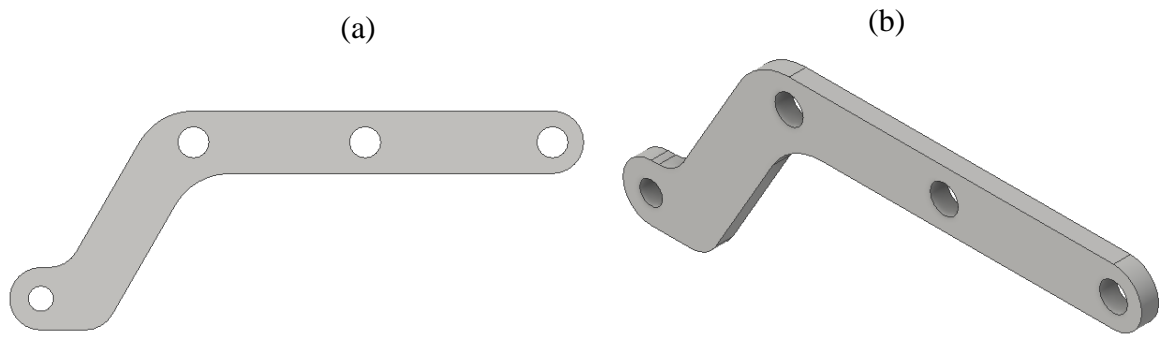


Figura 3.24 Pieza de unión espaldar/asiento/actuador lineal Vista Frontal (a) Isométrica (b)

A continuación se muestran las vistas isométricas (Figura 3.25), frontal (Figura 3.26) e inferior (Figura 3.27) del ensamble asiento/ espaldar en la posición inicial y final.

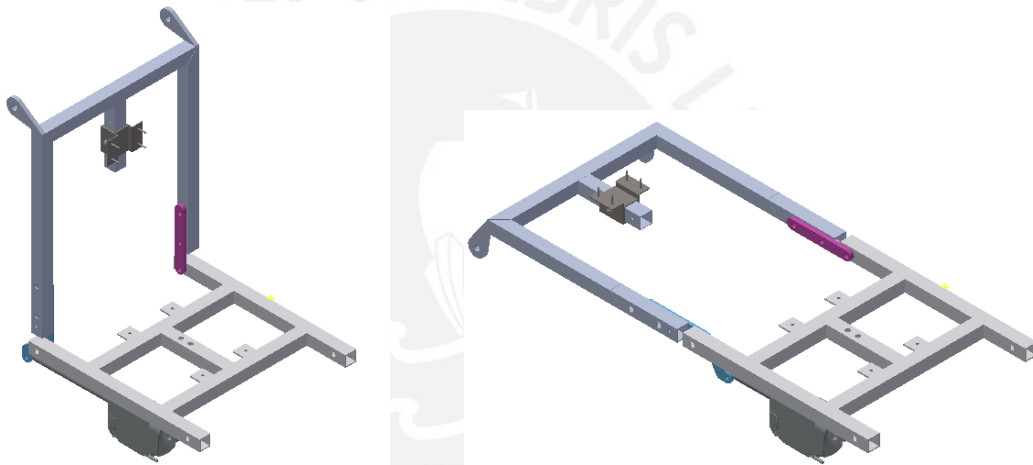


Figura 3.25 Giro del espaldar - Vistas isométrica de la posición inicial y final

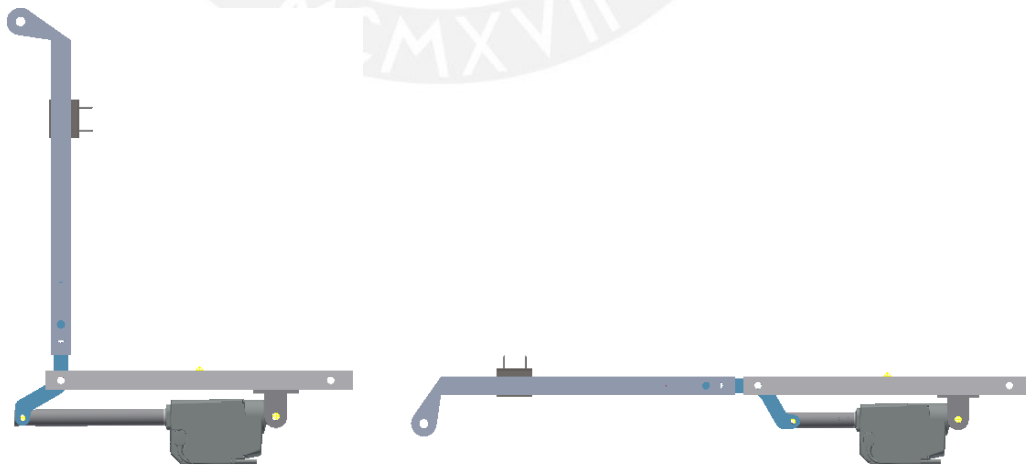


Figura 3.26 Giro del espaldar - Vista frontal de la posición inicial y final

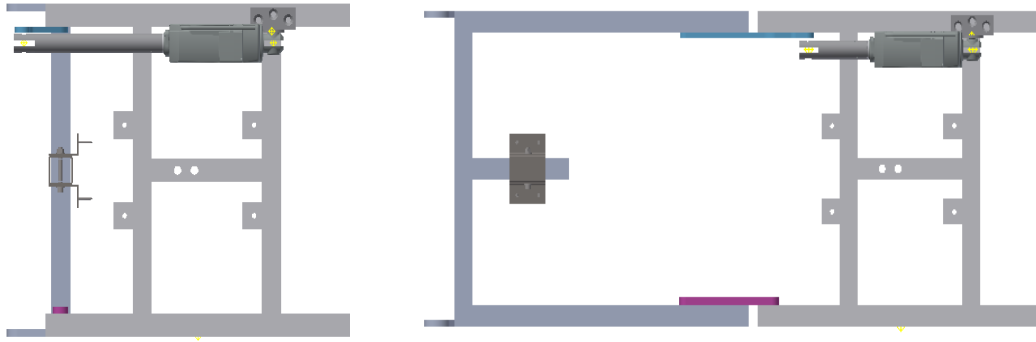


Figura 3.27 Giro del espaldar - Vista inferior de la posición inicial y final



3.4.2 Giro del apoyapié

Este giro se realizará mediante la acción de un actuador lineal ubicado en el asiento, el cual estará unido a la pieza mostrada en la Figura 3.28a, y esta ira unida a la pieza mostrada en la Figura 3.28b para unir el espaldar con el asiento. Con un punto de apoyo en el asiento, mediante un movimiento de traslación proporcionado por el actuador lineal se podrá realizar el giro deseado.

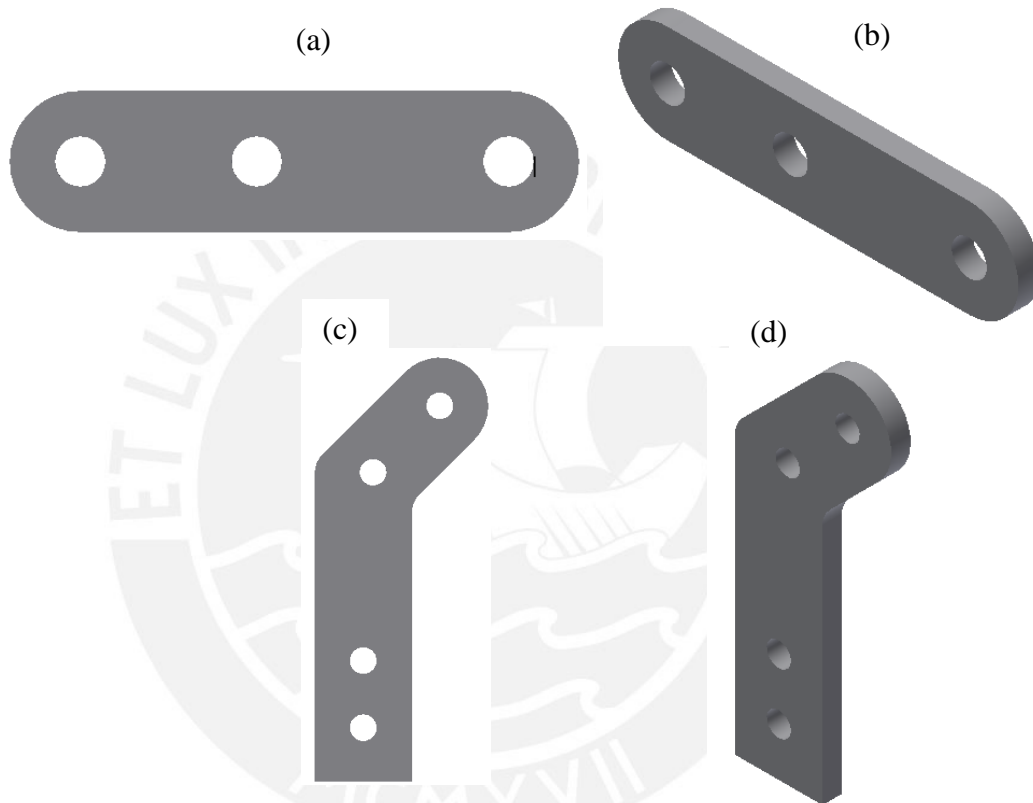


Figura 3.28 (a) (b) Pieza de unión del actuador lineal/ Pieza L Vistas frontal e isométrica, (c) (d) Pieza L de unión del asiento/apoyapié/ actuador lineal Vistas frontal e isométrica

A continuación se muestran las vistas isométricas (Figura 3.29), frontal (Figura 3.30) e inferior (Figura 3.31) del ensamble asiento/ apoyapié en la posición inicial y final.

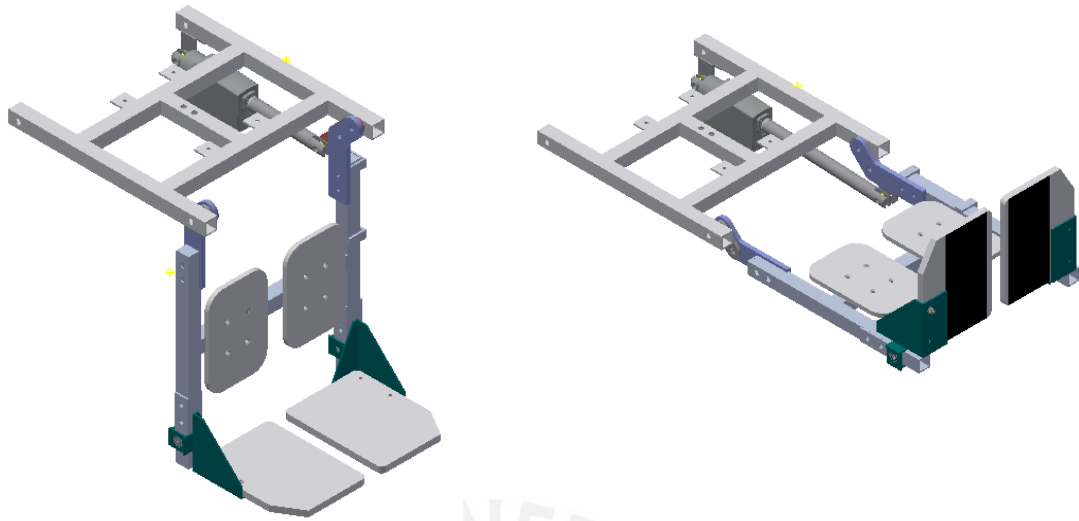


Figura 3.29 Giro del apoyapié - Vista isométrica de la posición inicial y final

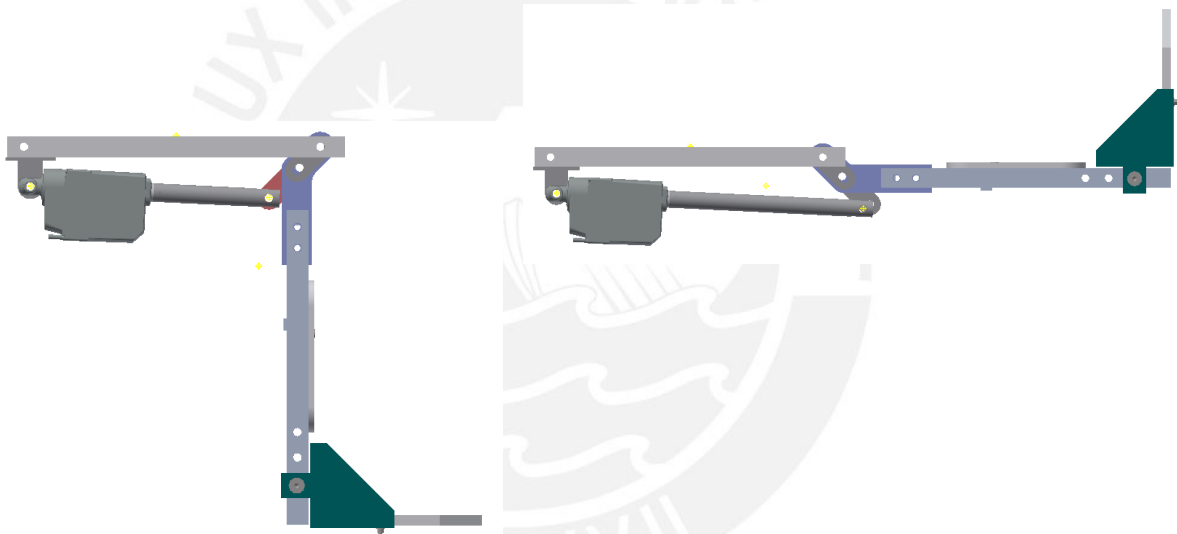


Figura 3.30 Giro del apoyapié - Vista frontal de la posición inicial y final

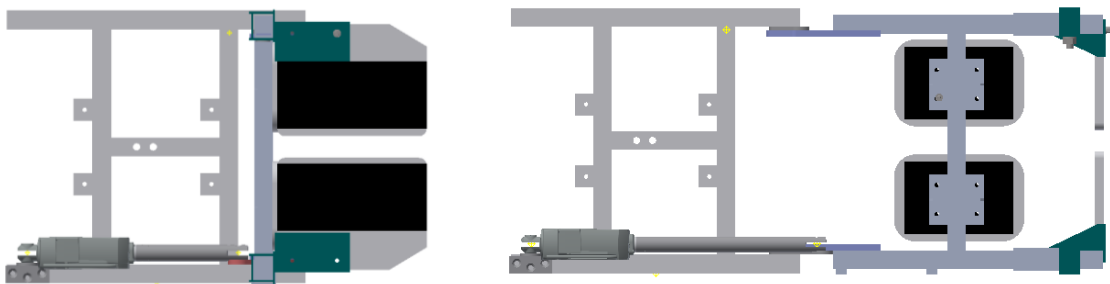


Figura 3.31 Giro del apoyapié - Vista inferior de la posición inicial y final

3.4.3 Giro del asiento

Este giro se realizará mediante la acción de un actuador lineal ubicado en la caja electrónica, el cual se unirá al asiento mediante el soporte mostrado en la Figura 3.32a. Con un punto de apoyo en el asiento, el cual estará soportado por un eje que conectará a la estructura y al asiento, y mediante un movimiento de traslación proporcionado por el actuador lineal se podrá realizar el giro deseado. La pieza que une el eje de giro del asiento con la estructura se muestra en la Figura 3.32b.

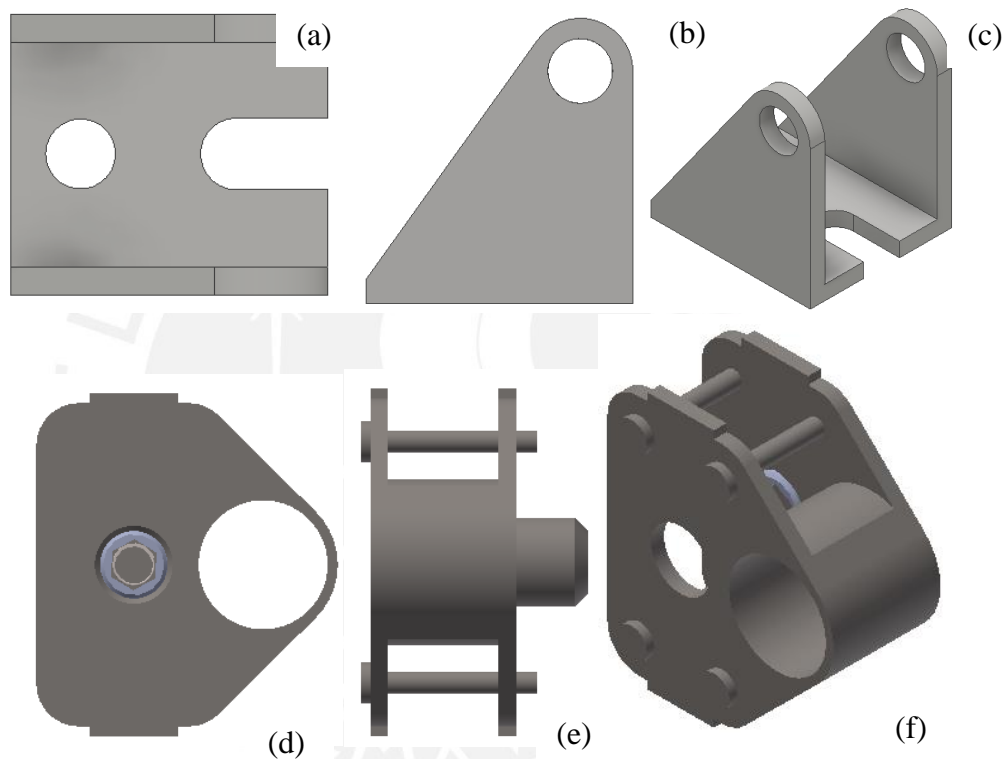


Figura 3.32 Soporte de unión actuador lineal giro asiento/asiento Vistas Superior(a) Lateral (b) Isométrica(c),
Pieza que une eje de giro del asiento / estructura Vista Lateral (a) Frontal (e) Isométrica (f)

A continuación, en la Figura 3.33 se muestran las vistas isométricas, frontal y superior del giro de la silla.

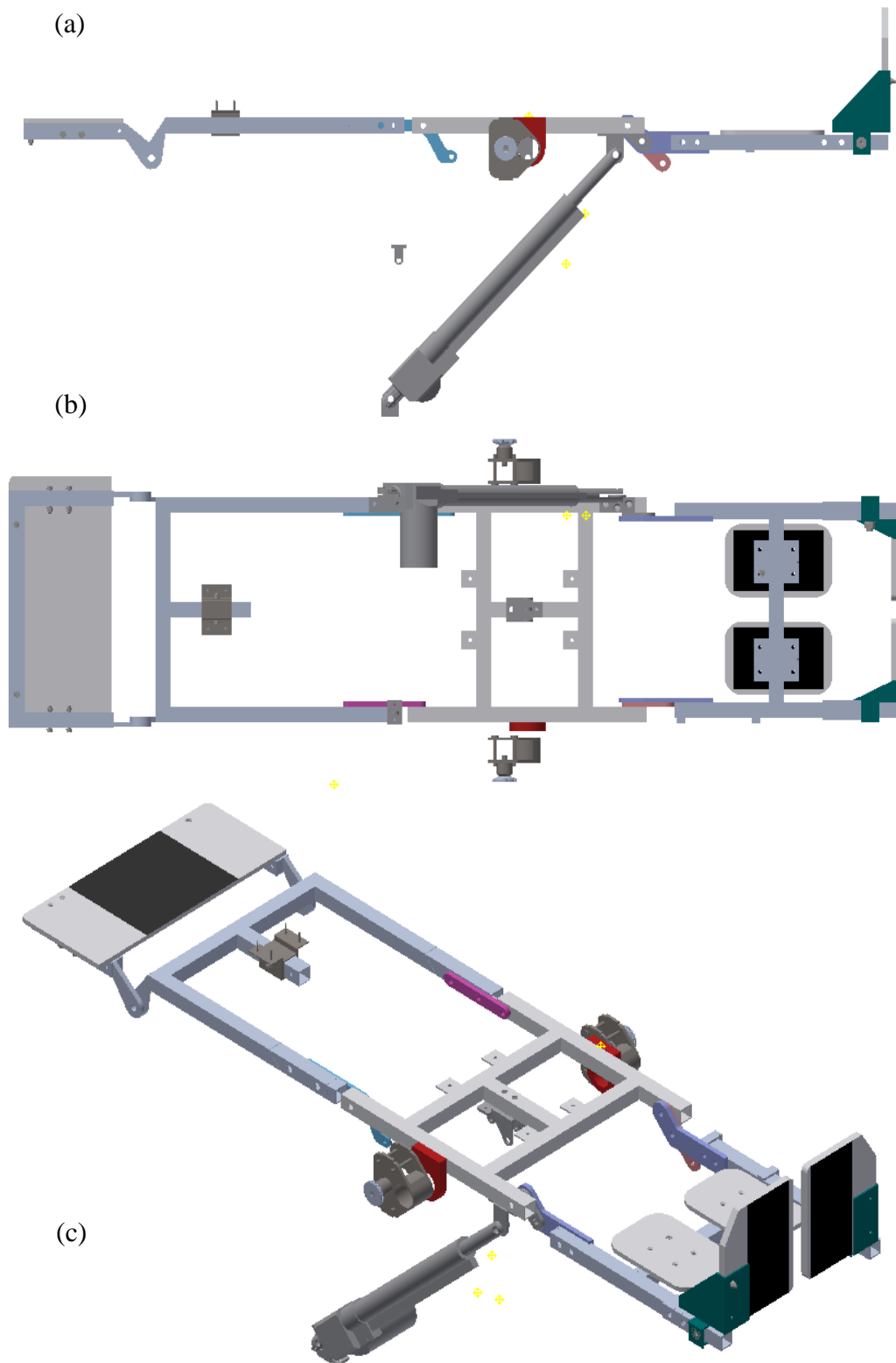


Figura 3.33 Giro del asiento - Vista isométrica, (b) Vista frontal

(c) Vista superior

3.4.4 Traslación de la altura del asiento

Esta traslación se realizará mediante la acción de un actuador lineal ubicado en la caja electrónica, el cual se unirá al asiento mediante el soporte mostrado en la Figura 3.34. Se asegurara que el eje de unión del soporte con el actuador lineal/asiento debe de ser el mismo eje de giro del asiento/estructura.

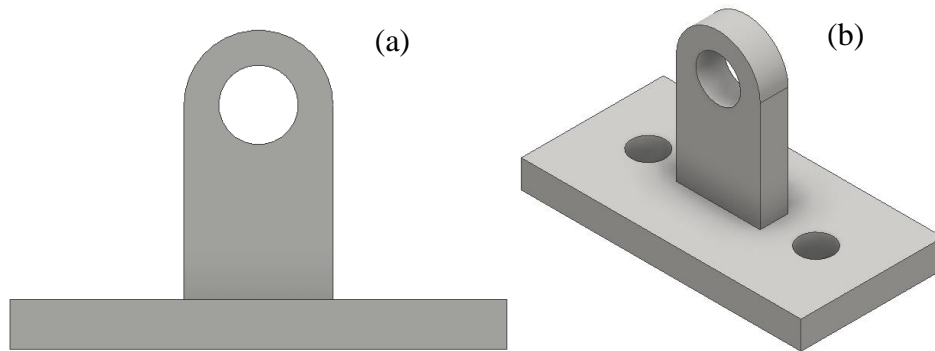


Figura 3.34 Soporte de unión actuador lineal giro asiento/asiento Vista Frontal (a) Isometrica (b)

A continuación, en la Figura 3.35 se muestran las vistas isométricas, frontal y superior del levantamiento de la silla.

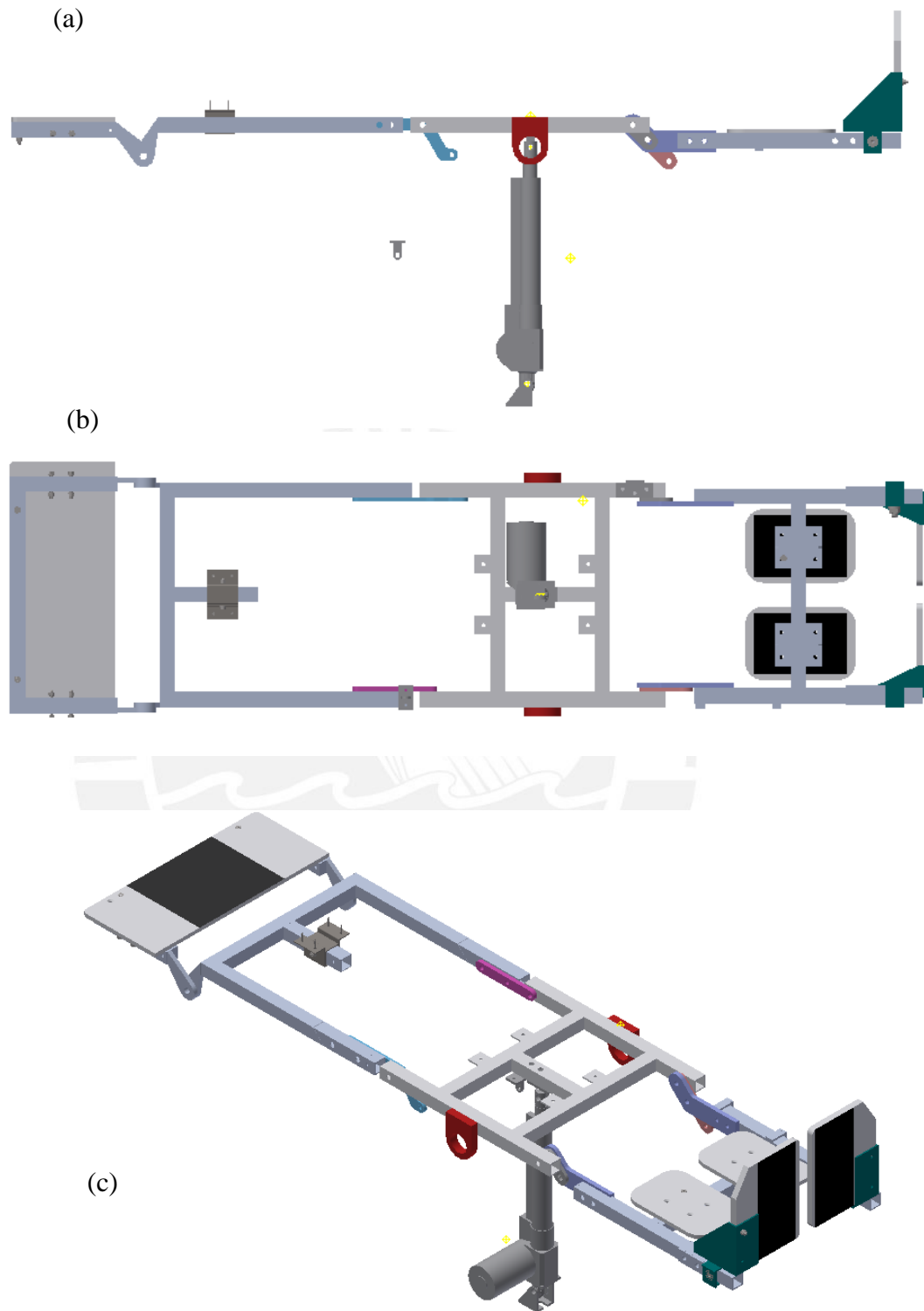


Figura 3.35 Levantamiento del asiento Vista isométrica, (b) Vista frontal

(c) Vista superior

3.5 Selección de actuadores lineal

Los actuadores lineales son componentes electromecánicos que permiten convertir el movimiento rotacional proporcionado por un motor eléctrico en movimientos lineales. Más información acerca de los actuadores lineales en la sección 4.2.6.

Los actuadores lineales seleccionados para cada tipo de movimiento se detallan en la Tabla 3.7.

Tabla 3.7 Características de los actuadores lineales seleccionados

FUNCIONALIDAD DETALLE	GIRO DEL ESPALDAR	GIRO DEL APOYAPIÉ	GIRO DEL ASIENTO	TRASLACIÓN DEL ASIENTO
Marca	LINAK	LINAK	Firgelli Automations	Firgelli Automations
Modelo	LA23-100	LA23-150	FA-400-12	FA-400-8
Fuerza dinámica máxima (N)	900	900	1800	1800
Longitud Inicial (mm)	230	280	479.55	376.68
Carrera (mm)	100	150	304.	203.2

La selección de los actuadores lineales a utilizar para cada uno de estos movimientos se detalla a continuación. Primero se explicará el cálculo para la selección del actuador lineal para el giro del espaldar (actuador lineal 1); luego se explicará el cálculo del actuador lineal para el giro del apoyapié (actuador lineal 2). Seguido por el cálculo del actuador lineal para el giro del asiento (actuador lineal 3) y finalmente, se detalla el cálculo del actuador lineal para el levantamiento de la silla (actuador lineal 4)

3.5.1 Selección de actuador lineal para el giro del espaldar

3.5.1.1 Calculo de fuerza

Lo que se busca es definir la fuerza mínima, que el actuador lineal necesitaría para realizar el giro, en función de variables (dimensiones, pesos, ángulos, longitudes iniciales del actuador) para poder reemplazarlas fácilmente según sea las dimensiones finales de la silla de ruedas y las características del actuador lineal a escoger.

Variables:

F_{al1} : Fuerza que ejerce el actuador lineal en la posición 1

F_{al2} : Fuerza que ejerce el actuador lineal en la posición 2

W_x : Fuerza ejercida por los pies (no se genera siempre, se toma un caso extremo)

$W_{superior}$: Peso de la parte superior del cuerpo (cabeza, brazos y tronco)

$W_{espaldar}$: Peso del espaldar

$l_{espaldar}$: Longitud del espaldar

l_1 : Longitud del actuador lineal en la posición inicial (silla de ruedas)

l_2 : Longitud del actuador lineal en la posición final (camilla)

b : Distancia desde el espaldar hacia el centro de giro E

h_{al} : Distancia desde el punto de giro E hacia el punto de aplicación de la fuerza F_{al} en la posición inicial (Eje Y)

a : Distancia desde el punto de giro E hacia el punto de aplicación de la fuerza F_{al} en la posición inicial (Eje X)

α_1 : Angulo de inclinación del actuador lineal en la posición inicial

α_2 : Angulo de inclinación del actuador lineal en la posición 2

3.5.1.1.1 Fuerza en la posición inicial (silla de ruedas)

$$\sum M_E = 0$$

$$W_x \frac{l_{\text{espaldar}}}{d} (d + b) - W_x \frac{(l_{\text{espaldar}} - d)}{d} b$$

$$= F_{al1} (\cos(\alpha_1) - a \sin(\alpha_1))$$

$$F_{al1} = \frac{W_x (l_{\text{espaldar}} + b)}{(h_{al} \cos(\alpha_1) - a \sin(\alpha_1))} \quad (3.1)$$

Figura 3.36 DCL Asiento/Espaldar - posición inicial

3.5.1.1.2 Fuerza en la posición final (camilla)

$$\sum M_E = 0$$

$$W_{\text{superior}} (l_{\text{espaldar}} + b) = F_{al2} h_{al} \sin(\alpha_2) +$$

$$F_{al2} a \cos(\alpha_2)$$

$$F_{al2} = \frac{W_{\text{superior}} (l_{\text{espaldar}} + b)}{(h_{al} \sin(\alpha_2) + a \cos(\alpha_2))} \quad (3.2)$$

Figura 3.37 DCL Asiento/Espaldar - posición final

Con: $W_{\text{espaldar}} = 20 \text{ N}$, $W_x = 90 \text{ N}$, $W_{\text{superior}} = 118.52 \text{ N}$, $l_{\text{espaldar}} = 389 \text{ mm}$,

$b = 53.45 \text{ mm}$, $h_{al} = 48.868 \text{ mm}$, $a = 50 \text{ mm}$, $\alpha_1 = 0.74^\circ$, $\alpha_2 = 0.32^\circ$

Se calcula F_{al1} y F_{al2} :

$$F_{al1} = 859.43 \text{ N}$$

$$F_{al2} = 584.61 \text{ N}$$

Con esto, se obtiene el valor mínimo de fuerza que el actuador lineal 1 deberá de proporcionar.

$$F_{\text{act.lineal}} > 859.43 \text{ N} \quad (3.3)$$

3.5.1.2 Calculo de longitud del actuador lineal

Variables:

l_0 : Longitud inicial del actuador lineal

l_1 : Longitud del actuador lineal en la posición inicial (silla de ruedas)

l_2 : Longitud del actuador lineal en la posición final (camilla)

d_{S1E} : Distancia entre el eje de giro del espaldar (E) y el soporte del actuador lineal 1(S1)

h_{S1} : Distancia desde asiento hacia el eje de giro del soporte del actuador lineal 1. (Eje Y)

h_{al} : Distancia desde el punto de giro E hacia el punto de aplicación de la fuerza F_{al} en la posición inicial (Eje Y)

a : Distancia desde el punto de giro E hacia el punto de aplicación de la fuerza F_{al} en la posición inicial (Eje X)

α_1 : Angulo de inclinación del actuador lineal en la posición inicial

α_2 : Angulo de inclinación del actuador lineal en la posición 2

Datos: $d_{S1E} = 279.485 \text{ mm}$, $h_{S1} = 46.99 \text{ mm}$, $h_{al} = 48.868 \text{ mm}$, $a = 50 \text{ mm}$

3.5.1.2.1 Posición inicial (silla de ruedas)

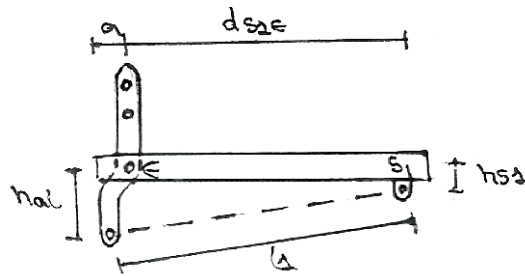


Figura 3.38 Asiento/Espaldar distribución geométrica posición inicial

Para calcular l_2 se aplica la ley de Pitágoras en el triángulo mostrado en la Figura 3.39.

$$l_1^2 = (d_{S1E} + a)^2 + (h_{al} - h_{S1})^2$$

$$l_1 = \sqrt{(d_{S1E} + a)^2 + (h_{al} - h_{S1})^2} \quad (3.4)$$

Figura 3.39 Asiento/Espaldar longitud del actuador $l_1 = \sqrt{(279.485 + 50)^2 + (48.868 - 46.99)^2}$
lineal posición inicial

$$l_1 = 329.49 \text{ mm}$$

3.5.1.2.2 Posición final (camilla)

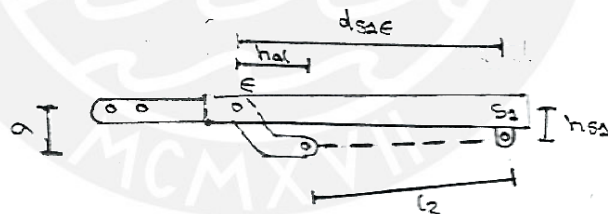


Figura 3.40 Asiento/Espaldar distribución geométrica posición final

Para calcular l_2 se aplica la ley de Pitágoras en el triángulo mostrado en la Figura 3.41

$$l_2^2 = (a - h_{S1})^2 + (d_{S1E} - h_{al})^2$$

$$l_2 = \sqrt{(a - h_{S1})^2 + (d_{S1E} - h_{al})^2} \quad (3.5)$$

Figura 3.41 Asiento/Espaldar longitud del actuador lineal posición final

$$l_2 = \sqrt{(50 - 46.99)^2 + (279.485 - 48.868)^2}$$

$$l_2 = 230.63 \text{ mm}$$

Con estos valores obtenidos de l_1 y l_2 , se pueden obtener rangos máximos y mínimos de longitud del actuador lineal según:

$$l_2 > l_0$$

$$l_1 < l_0 + \text{carrera}$$

$$l_1 - \text{carrera} < l_0 < l_2 \quad (3.6)$$

$$329.49 - \text{carrera} < l_0 < 230.63$$

3.5.1.3 Actuador lineal escogido para el giro del espaldar

Para la selección del actuador lineal, se reemplazan los valores de l_0 (**longitud inicial**) y **carrera** y se verifica que cumplan con la relación geométrica (3.6). Así como, se verificara que cumpla con los requisitos de fuerza (3.3).

Actuador lineal LINAK LA23-100

$$l_0 = 230 \text{ mm}$$

$$\text{carrera} = 100 \text{ mm}$$

$$F_{act.lineal} = 1800 \text{ N}$$

Reemplazando en (3.6):

$$329.49 - 100 < 230 < 230.63$$

$$229.49 < 230 < 230.63 \text{ mm (Si cumple)}$$

Reemplazando en (3.3):

$$F_{act.lineal} > 859.43$$

$$900 > 859.43 \text{ N (Si cumple)}$$

3.5.2 Selección de actuador lineal para el giro del apoyapié

3.5.2.1 Cálculo de fuerza

Lo que se busca es definir la fuerza mínima, que el actuador lineal necesitaría para realizar el giro, en función de variables (dimensiones, pesos, ángulos, longitudes iniciales del actuador) para poder reemplazarlas fácilmente según sea las dimensiones a definir y el actuador lineal a escoger.

Variables:

F_{al1} : Fuerza que ejerce el actuador lineal en la posición 1

F_{al2} : Fuerza que ejerce el actuador lineal en la posición 2

W_x :

W_{ap} : Peso del apoyapié

$W_{piernas}$: Peso de las piernas

l_{ap} : Longitud del apoyapié

d : Distancia desde el punto de aplicación de W_{ap} hacia el centro de giro O (Eje X)

l_t : Longitud de la pieza que une el actuador lineal con el apoyapié.

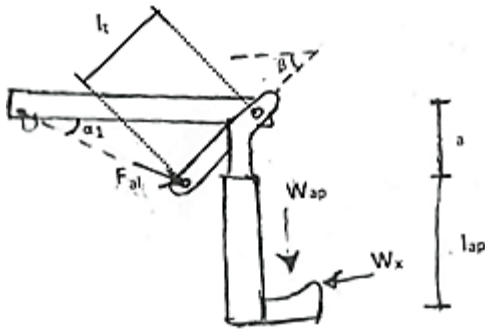
a : Distancia desde el inicio del apoyapié hacia el centro de giro O (Eje Y)

β : Inclinação de la pieza que une el actuador lineal con el apoyapié.

α_1 : Ángulo de inclinación del actuador lineal en la posición 1

α_2 : Ángulo de inclinación del actuador lineal en la posición 2

3.5.2.1.1 Fuerza en la posición inicial (silla de ruedas)



$$F_{al} \sin(\alpha_1) l_t \cos(\beta) + F_{al} \cos(\alpha_1) l_t \sin(\beta) + W_{ap} d = W_x (l_{ap} + a)$$

$$F_{al1} = \frac{W_x (l_{ap} + a) - W_{ap} d}{(\sin(\alpha_1) l_t \cos(\beta) + \cos(\alpha_1) l_t \sin(\beta))} \quad (3.7)$$

Figura 3.42 DCL Asiento/Apoyapié posición inicial

3.5.2.1.2 Fuerza en la posición final (camilla)

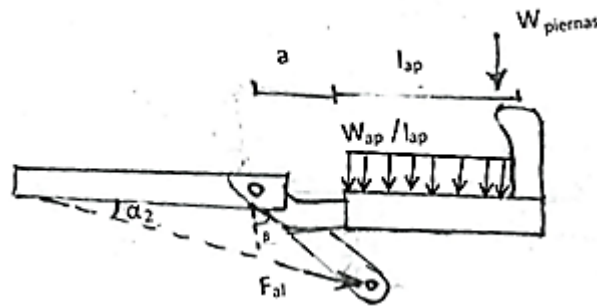


Figura 3.43 DCL Asiento/Apoyapié posición final

$$\sum M_O = 0$$

$$F_{al} \cos(\alpha_2) l_t \cos(\beta) = W_{piernas} (l_{ap} + a) + W_{ap} \left(\frac{l_{ap}}{2} + a \right) + F_{al} \sin(\alpha_2) l_t \sin(\beta)$$

$$F_{al2} = \frac{W_{piernas} (l_{ap} + a) + W_{ap} \left(\frac{l_{ap}}{2} + a \right)}{(\cos(\alpha_2) l_t \cos(\beta) - \sin(\alpha_2) l_t \sin(\beta))}$$

$$F_{al2} = \frac{W_{piernas} (l_{ap} + a) + W_{ap} \left(\frac{l_{ap}}{2} + a \right)}{l_t (\cos(\alpha_2 + \beta))} \quad (3.8)$$

Datos: $W_x = 50 \text{ N}$ $W_{ap} = 20 \text{ N}$, $W_{piernas} = 45.6 \text{ N}$, $l_{ap} = 341.55 \text{ mm}$, $d = -25 \text{ mm}$,
 $l_t = 85 \text{ mm}$, $a = 95 \text{ mm}$, $\alpha_1 = 2.65^\circ$, $\beta = 45^\circ$, $\alpha_2 = 1.86^\circ$

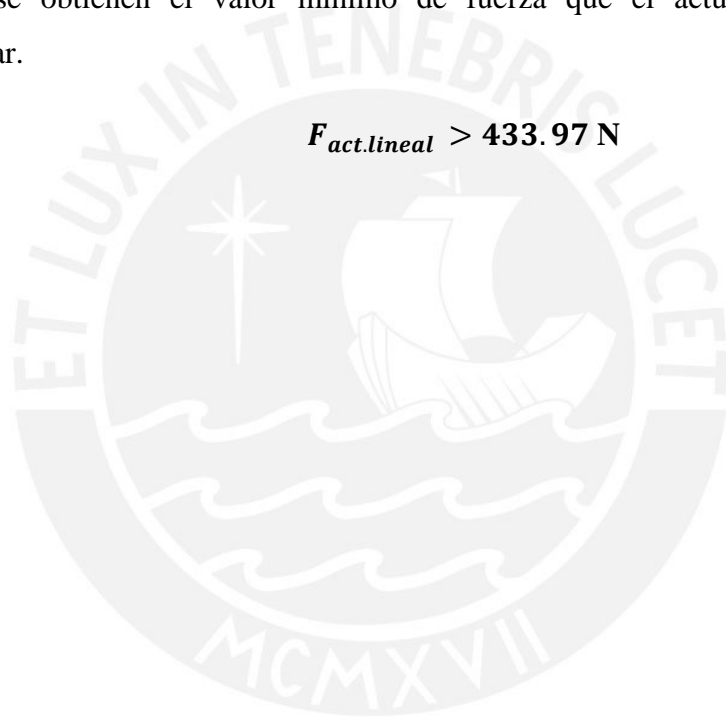
Reemplazando, se calcula:

$$F_{al1} = 355.42 \text{ N}$$

$$F_{al2} = 433.97 \text{ N}$$

Con esto se obtienen el valor mínimo de fuerza que el actuador lineal deberá de proporcionar.

$$\mathbf{F_{act.lineal} > 433.97 \text{ N}} \quad (3.9)$$



3.5.2.2 Calculo de longitud del actuador lineal

VARIABLES:

l_0 : Longitud inicial del actuador lineal

l_1 : Longitud del actuador lineal en la posición inicial

l_2 : Longitud del actuador lineal en la posición 2

carrera: Carrera del actuador lineal

h_{S2} : Distancia desde asiento hacia el eje de giro del soporte del actuador lineal 2. (Eje Y)

d_{S2A} : Distancia entre el eje de giro del apoyapié(A) y el soporte del actuador lineal 2(S2)

Datos: $d_{OA} = 343.28$, $h = 46.99$, $l_t = 5$ $\beta = 45$

3.5.2.2.1 Posición inicial (silla de ruedas)

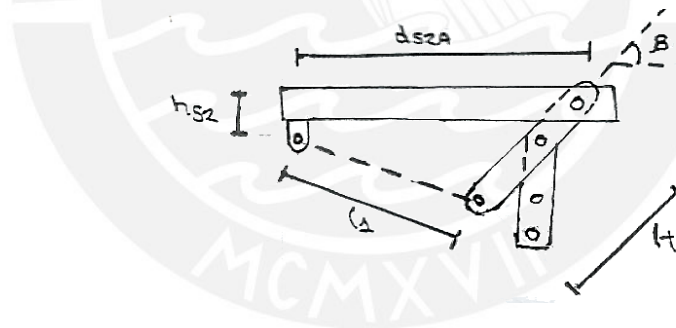


Figura 3.44 Asiento/Apoyapié distribución geométrica posición inicial

Para calcular l_2 se aplica la ley de Pitágoras en el triángulo mostrado en la Figura 3.45

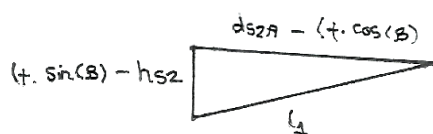


Figura 3.45 Asiento/Apoyapié longitud del actuador lineal posición inicial

$$l_1^2 = (d_{S2A} - l_t \cos(\beta))^2 + (l_t \sin(\beta) - h_{S2})^2$$

$$l_1 = \sqrt{(d_{S2A} - l_t \cos(\beta))^2 + (l_t \sin(\beta) - h_{S2})^2} \quad (3.10)$$

$$l_1 = \sqrt{(343.28 - 85 \cos(45))^2 + (85 \sin(45) - 46.99)^2}$$

$$l_1 = 283.48 \text{ mm}$$

3.5.2.2.2 Posición final (camilla)

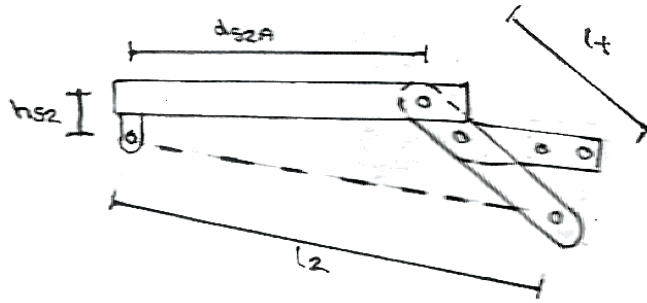


Figura 3.46 Asiento/apoyapié Distribución geométrica posición final

Para calcular l_2 se aplica la ley de Pitágoras en el triángulo mostrado en la Figura 3.47.

$$l_2^2 = (l_t \sin(\beta) - h_{S2})^2 + (d_{S2A} + l_t \cos(\beta))^2$$

$$l_2 = \sqrt{(l_t \sin(\beta) - h_{S2})^2 + (d_{S2A} + l_t \cos(\beta))^2} \quad (3.11)$$

$$l_2 = \sqrt{(85 \sin(45) - 46.99)^2 + (343.28 + 85 \cos(45))^2}$$

$$l_2 = 403.6 \text{ mm}$$

Figura 3.47 Asiento/Apoyapié longitud del actuador lineal posición final

Con estos valores obtenidos de l_1 y l_2 , se pueden obtener rangos máximos y mínimos de longitud de un actuador lineal según:

$$l_0 < l_1$$

$$l_0 + \text{carrera} > l_2$$

$$l_2 - \text{carrera} < l_0 < l_1 \quad (3.12)$$

$$403.6 - \text{carrera} < l_0 < 283.48$$

3.5.2.3 Actuador lineal escogido para el giro del apoyapié

Para la selección del actuador lineal, se reemplazan los valores de l_0 (longitud inicial) y **carrera** y se verifica que cumplan con la relación (3.12). Así como, se verificara que cumpla con los requisitos de fuerza (3.9).

Actuador lineal LINAK LA23-150

$$l_0 = 280 \text{ mm}$$

$$\text{carrera} = 150 \text{ mm}$$

$$F_{act.lineal} = 900 \text{ N}$$

En (3.12):

$$403.6 - 150 < 280 < 283.48$$

$$253.6 < 280 < 283.48 \text{ mm (Si cumple)}$$

En (3.9):

$$F_{act.lineal} > 433.97$$

$$900 > 433.97 \text{ N (Si cumple)}$$

3.5.3 Selección de actuador lineal para el giro y el levantamiento del asiento

3.5.3.1 Cálculo de fuerzas de los actuador lineales para el giro del asiento / levantamiento de la silla

Variables:

F_{al1} : Fuerza en el actuador lineal 1 (elevación de la silla).

F_{al2} : Fuerza en el actuador lineal 2 (giro del asiento)

$W_{persona}$: Peso total de la persona

W_{sup} : Peso del tren superior (cabeza, tronco y brazos).

W_{muslos} : Peso de los muslos

$W_{piernas}$: Peos de las piernas

α : Inclinación del actuador línea 2.

l_{CP} : Longitud desde el punto de aplicación de la fuerza $W_{superior}(C)$ hacia el punto de aplicación de la fuerza $W_{piernas}(P)$:

l_{OC} : Longitud desde el punto de giro de la silla(O) hacia el punto de aplicación de la fuerza $W_{superior}(C)$:

l_{OA} : Longitud desde el punto de giro de la silla(O) hacia el punto de aplicación de la fuerza $F_{al2}(A)$:

l_{OP} : Longitud desde el punto de giro de la silla(O) hacia el punto de aplicación de la fuerza $W_{piernas}(P)$

$l_{asiento}$: Longitud del asiento

$l_{espaldar}$: Longitud del espaldar

$l_{apoyapie}$: Longitud de los apoyapiés

h_{s1} : Longitud de los apoyapiés

h_{s2} : Longitud de los apoyapiés

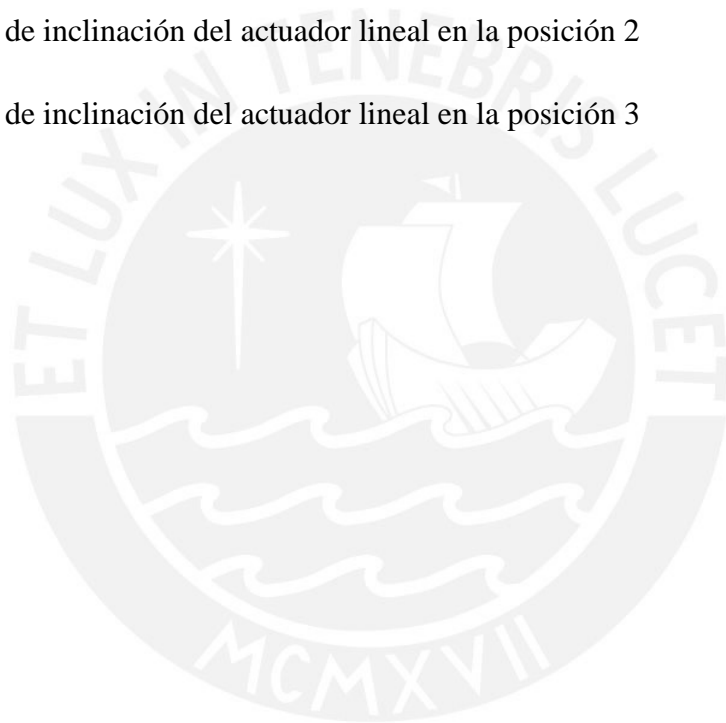
h: altura desde el asiento hacia el punto de giro O.

ancho: Ancho de las almohadillas.

α_1 : Angulo de inclinación del actuador lineal en la posición 1

α_2 : Angulo de inclinación del actuador lineal en la posición 2

α_3 : Angulo de inclinación del actuador lineal en la posición 3



3.5.3.1.1 Posición silla

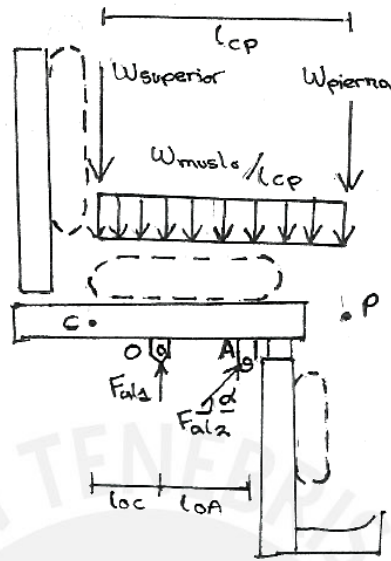


Figura 3.48 DCL Asiento Posición silla

$$\sum M_O = 0$$

$$F_{al2_silla} \sin(\alpha_1) l_{OA} + W_{sup} l_{OC} + \frac{W_{muslo} l_{OC}^2}{2 l_{CP}}$$

$$= W_{pierna} (l_{CP} - l_{OC}) + \frac{W_{muslo} (l_{CP} - l_{OC})^2}{2 l_{CP}}$$

$$F_{al2_silla} = \frac{[W_{pierna} (l_{CP} - l_{OC}) + \frac{W_{muslo} ((l_{CP} - l_{OC})^2 - l_{OC}^2)}{2 l_{CP}} - W_{sup} l_{OC}]}{\sin(\alpha_1) l_{OA}} \quad (3.13)$$

$$F_{al1_silla} = W_{persona} - \sin(\alpha_1) F_{al2_silla} \quad (3.14)$$

3.5.3.1.2 Posición silla elevada

Lo que varía es el ángulo (α_2) de aplicación de la fuerza del actuador lineal 2 (giro de la silla).

$$\sum M_O = 0$$

$$F_{al2_sillaE} \sin(\alpha_2) l_{OA} + W_{sup} l_{OC} + \frac{W_{muslo} l_{OC}^2}{2 l_{CP}}$$

$$= W_{pierna} (l_{CP} - l_{OC}) + \frac{W_{muslo} (l_{CP} - l_{OC})^2}{2 l_{CP}}$$

$$F_{al2_sillaE} = \frac{[W_{pierna} (l_{CP} - l_{OC}) + \frac{W_{muslo} ((l_{CP} - l_{OC})^2 - l_{OC}^2)}{2 l_{CP}} - W_{sup} l_{OC}]}{\sin(\alpha_2) l_{OA}} \quad (3.15)$$

$$F_{al1_sillaE} = W_{persona} - \sin(\alpha_2) F_{al2_sillaE} \quad (3.16)$$

3.5.3.1.3 Posición camilla

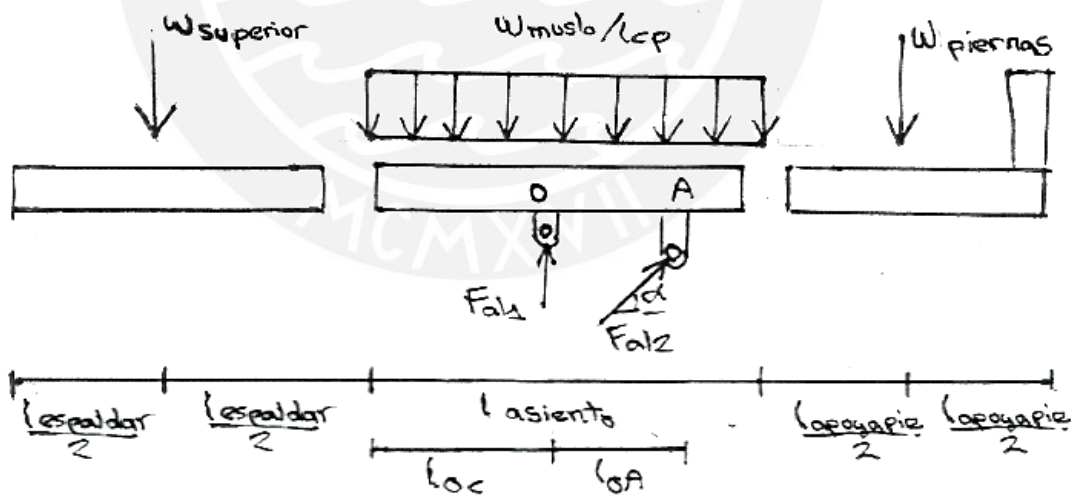


Figura 3.49 DCL Asiento Posición camilla

$$\sum M_O = 0$$

$$\begin{aligned} F_{al2_camilla} \sin(\alpha_1) l_{OA} + W_{sup} \left(\frac{l_{espaldar}}{2} + l_{OC} \right) + \frac{W_{muslo} l_{OC}^2}{2 l_{asiento}} \\ = \frac{W_{muslo} (l_{asiento} - l_{OC})^2}{2 l_{asiento}} + W_{pierna} \left(\frac{l_{apoyapie}}{2} + l_{OP} \right) \end{aligned}$$

$$F_{al2_camilla} = \frac{\frac{W_{muslo} ((l_{asiento} - l_{OC})^2 - l_{OC}^2)}{2 l_{asiento}} + W_{pierna} \left(\frac{l_{apoyapie}}{2} + l_{OP} \right) - \frac{W_{muslo} l_{OC}^2}{2 l_{asiento}}}{\sin(\alpha_1) l_{OA}} \quad (3.17)$$

$$F_{al1_camilla} = W_{persona} - \sin(\alpha_1) F_{al2_camilla} \quad (3.18)$$

3.5.3.1.4 Posición camilla elevada

Lo que varía es el ángulo (α_2) de aplicación de la fuerza del actuador lineal 2 (giro de la silla).

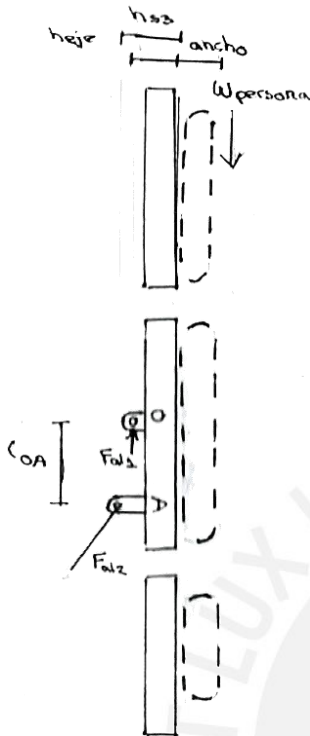
$$\sum M_O = 0$$

$$\begin{aligned} F_{al2_camillaE} \sin(\alpha_2) l_{OA} + W_{sup} \left(\frac{l_{espaldar}}{2} + l_{OC} \right) + \frac{W_{muslo} l_{OC}^2}{2 l_{asiento}} \\ = \frac{W_{muslo} (l_{asiento} - l_{OC})^2}{2 l_{asiento}} + W_{pierna} \left(\frac{l_{apoyapie}}{2} + l_{OP} \right) \end{aligned}$$

$$F_{al2_camillaE} = \frac{\frac{W_{muslo} ((l_{asiento} - l_{OC})^2 - l_{OC}^2)}{2 l_{asiento}} + W_{pierna} \left(\frac{l_{apoyapie}}{2} + l_{OP} \right) - \frac{W_{muslo} l_{OC}^2}{2 l_{asiento}}}{\sin(\alpha_2) l_{OA}} \quad (3.19)$$

$$F_{al1_camillaE} = W_{persona} - \sin(\alpha_2) F_{al2_camillaE} \quad (3.20)$$

3.5.3.1.5 Posición bipedestación



$$\sum M_O = 0$$

$$W_{persona} (ancho + h) = F_{al2_biped} \cos(\alpha_3) l_{OA} + F_{al2_biped} \sin(\alpha_3) h$$

$$F_{al2_biped} = \frac{W_{persona} (ancho + h)}{(\cos(\alpha_3) l_{OA} + \sin(\alpha_3) h)} \quad (3.21)$$

$$F_{al1_biped} = W_{persona} - \sin(\alpha_3) F_{al2_biped} \quad (3.22)$$

Figura 3.50 DCL Asiento
Posición bipedestación

Datos:

$$W_{persona} = 400 \text{ N}, W_{sup} = 237.4 \text{ N}, W_{pierna} = 45.60 \text{ N}, W_{muslo} = 113.28 \text{ N},$$

$$l_{asiento} = 410 \text{ mm}, l_{espaldas} = 720 \text{ mm}, l_{OC} = 95.87 \text{ mm}, l_{apoyapie} = 343.85 \text{ mm},$$

$$l_{OP} = 263.7 \text{ mm}, l_{OA} = 149.81 \text{ mm}, l_{OCr} = 146.3 \text{ mm}, l_{CP} = 359.57 \text{ mm},$$

$$ancho = 68 \text{ mm}, h_{s1} = 50 \text{ mm}, h_{s2} = 59.69 \text{ mm}, \alpha_1 = 45^\circ, \alpha_2 = 55.2^\circ, \alpha_3 = 61.31^\circ$$

Reemplazando, se calcula:

$$F_{al1_silla} = 407.97 \text{ N} \quad F_{al1_sillaE} = 407.97 \text{ N}$$

$$F_{al1_camilla} = 1024.4 \text{ N} \quad F_{al1_camillaE} = 1024.4 \text{ N}$$

$$F_{al1_biped} = -253.09 \text{ N}$$

$$F_{al2_silla} = -11.27 \text{ N} \quad F_{al2_sillaE} = -9.71 \text{ N}$$

$$F_{al2_camilla} = -882.99 \text{ N} \quad F_{al2_camillaE} = -760.36 \text{ N}$$

$$F_{al2_biped} = 744.44 \text{ N}$$

Con esto se obtienen los valores mínimos de fuerzas que los actuadores lineales 1 y 2 deberán de proporcionar.

$$F_{act.lineal1} > 1024.4 \text{ N} \quad (3.23)$$

$$F_{act.lineal2} > 882.99 \text{ N} \quad (3.24)$$

3.5.3.2 Calculo de longitud del actuador lineal para el giro del asiento

Variables:

Δh : Distancia que se podrá elevar la silla.

a : Distancia entre el punto de giro del asiento(O) respecto al punto de aplicación de la fuerza del actuador lineal (Eje X)

l_0 : Longitud inicial del actuador lineal

l_1 : Longitud del actuador lineal en la posición inicial

l_2 : Longitud del actuador lineal en la posición 2

α_1 : Angulo del actuador lineal en la posición 1

h_{s1} : Altura del soporte 1 respecto al asiento

h_{s2} : Altura del soporte 2 respecto al asiento

Δh_s : Diferencia entre h_{s2} y h_{s1}

Datos: $\Delta h = 170$ mm, $a = 150^\circ$, $l_1 = 551.06$ mm, $\alpha_1 = 45^\circ$, $h_{s1} = 34.29$ mm,

$h_{s2} = 34.29$ mm, $\Delta h_s = 9.69$ mm

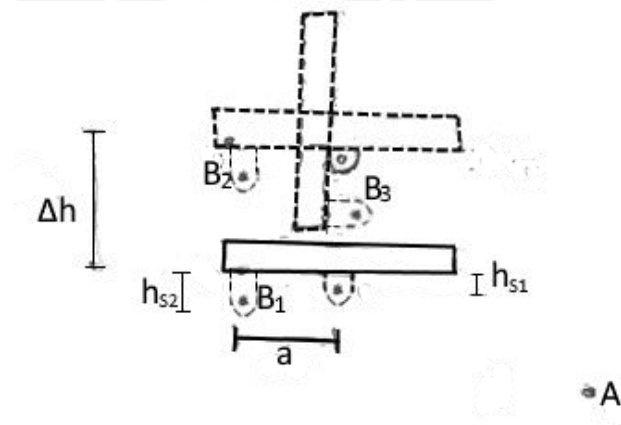
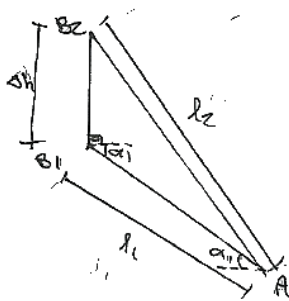


Figura 3.51 Giro del asiento - longitudes posición inicial

Para calcular l_2 se aplica la ley de cosenos en el triángulo A-B1-B2 mostrado en la Figura 3.52.



$$l_2^2 = \Delta h^2 + l_1^2 - 2 \Delta h l_1 \cos(90 + \alpha_1)$$

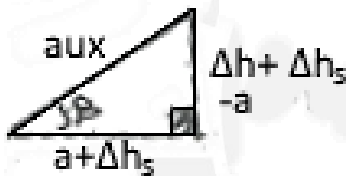
$$l_2 = \sqrt{\Delta h^2 + l_1^2 - 2 \Delta h l_1 \cos(90 + \alpha_1)} \quad (3.25)$$

$$l_2 = \sqrt{171^2 + 551.06^2 - 2 \cdot 171 \cdot 551.06 \cos(90 + 45)}$$

$$l_2 = 682.77 \text{ mm}$$

Figura 3.52 Giro del asiento - Triángulo A-B1-B2

Se aplica la ley de Pitágoras en el triángulo auxiliar mostrado en la Figura 3.53.



$$aux = \sqrt{(\Delta h + \Delta h_{soportes} - a)^2 + (a + \Delta h_s)^2} \quad (3.26)$$

$$aux = \sqrt{(171 + 9.69 - 150)^2 + (150 + 9.69)^2}$$

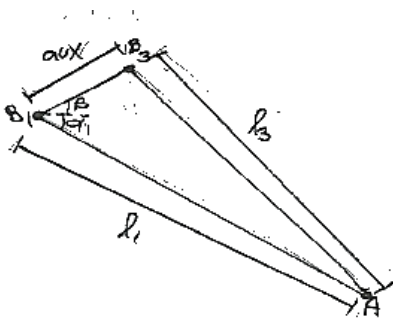
$$aux = 162.61 \text{ mm}$$

Figura 3.53 Giro del asiento - Triángulo auxiliar

$$\beta = \tan^{-1} \left(\frac{\Delta h + \Delta h_s - a}{a + \Delta h_s} \right) \quad (3.27)$$

$$\beta = \tan^{-1} \left(\frac{171 + 9.69 - 150}{150 + 9.69} \right) = 10.87^\circ$$

Para calcular l_3 se aplica la ley de cosenos en el triángulo A-B1-B3 mostrado en la Figura 3.54.



$$l_3^2 = aux^2 + l_1^2 - 2 aux l_1 \cos(\beta + \alpha_1)$$

$$l_3 = \sqrt{aux^2 + l_1^2 - 2 aux l_1 \cos(\beta + \alpha_1)} \quad (3.28)$$

$$l_3 = \sqrt{162^2 + 551^2 - 2 \cdot 162 \cdot 551 \cos(10.87 + 45)}$$

$$l_3 = 479.14 \text{ mm}$$

Figura 3.54 Giro del asiento - Triángulo A-B1-B3

Con estos valores obtenidos de l_1 , l_2 y l_3 , se pueden obtener rangos máximos y mínimos de longitud de un actuador lineal según:

$$l_0 < l_3$$

$$l_0 + \text{carrera} > l_2$$

$$l_2 - \text{carrera} < l_0 < l_3 \quad (3.29)$$

$$682.77 - \text{carrera} < l_0 < 479.14$$

3.5.3.3 Actuador lineal escogido para el giro del asiento

Para la selección del actuador lineal, se reemplazan los valores de l_0 (**longitud inicial**) y **carrera** y se verifica que cumplan con la relación (3.29). Así como, se verificara que cumpla con los requisitos de fuerza (3.24).

Actuador lineal FA-400-12

Marca: Firgelli Automations

$$l_0 = 478.88 \text{ mm}$$

$$\text{carrera} = 304.8 \text{ mm}$$

$$F_{act.lineal} = 1800 \text{ N}$$

Reemplazando en (3.29):

$$682.77 - 304.8 < 478.88 < 479.14$$

$$377.97 < 478.88 < 479.14 \text{ mm (Si cumple)}$$

Reemplazando en (3.24):

$$F_{act.lineal} > 1024.4$$

$$1800 > 882.99 \text{ N (Si cumple)}$$

3.5.3.4 Calculo de longitud del actuador lineal para el levantamiento del asiento

Variables:

Δh : Distancia que se podrá elevar la silla.

l_0 : Longitud inicial del actuador lineal

l_1 : Longitud del actuador lineal en la posición inicial

l_2 : Longitud del actuador lineal en la posición 2

α_1 : Angulo del actuador lineal en la posición 1

h_{s1} : Altura del soporte 1 respecto al asiento

h_{s2} : Altura del soporte 2 respecto al asiento

$\Delta h_{soportes}$: Diferencia entre h_{s2} y h_{s1}

Datos: $d_{OA} = 171$, $l_1 = 394.52$

En la Figura 3.55 se muestra la longitud del actuador lineal 4 en la posición inicial y final.

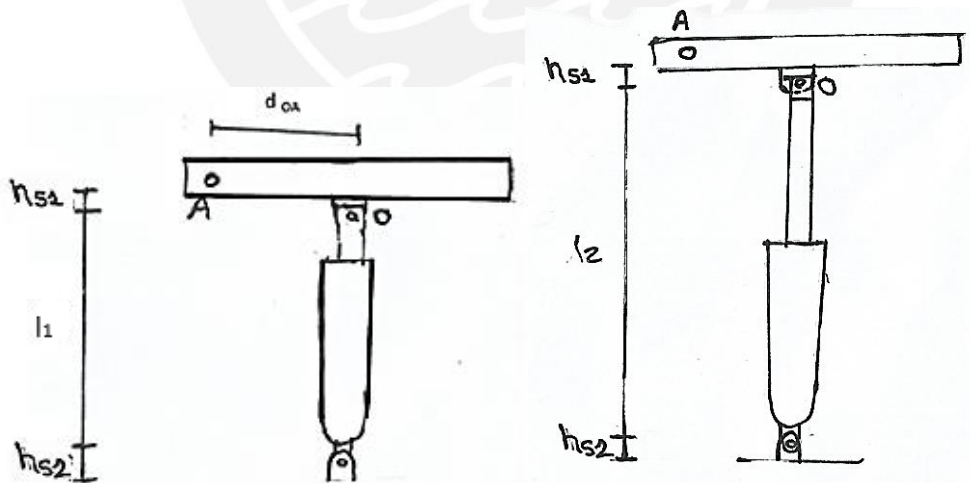


Figura 3.55 Longitud actuador lineal 4. (a) Posición inicial (b) Posición final

$$l_2 = l_1 + \Delta h \quad (3.30)$$

$$l_2 = 394.52 + 171 = 565.52 \text{ mm}$$

Relaciones: $l_0 < l_1$

$$l_2 < l_0 + \text{carrera}$$

$$l_2 - \text{carrera} < l_0$$

$$l_2 - \text{carrera} < l_0 < l_1 \quad (3.31)$$

$$565.52 - \text{carrera} < l_0 < 394.52$$

3.5.3.5 Actuador lineal escogido para el levantamiento del asiento

Para la selección del actuador lineal, se reemplazan los valores de l_0 (**longitud inicial**) y **carrera** y se verifica que cumplan con la relación (3.31). Así como, se verificara que cumpla con los requisitos de fuerza (3.23).

Actuador lineal FA-400-8

Marca: Firgelli Automations

$$l_0 = 376.68 \text{ mm}$$

$$\text{carrera} = 203.2 \text{ mm}$$

$$F_{act.lineal} = 1800 \text{ N}$$

Reemplazando en (3.31):

$$565.52 - 203.2 < 376.68 < 394.52$$

$$362.32 < 376.68 < 396. \text{ mm (Si cumple)}$$

Reemplazando en (3.23):

$$F_{act.lineal} > 1030.1$$

$$1800 > 1030.1 \text{ N (Si cumple)}$$

3.6 Análisis de estabilidad de la silla

En la Figura 3.56 se muestra la distribución del peso total (persona, silla, estructura, motores, baterías) en la función más crítica (Bipedestación) y las reacciones en los apoyos. El cálculo detallado del centro de gravedad de esta funcionalidad se encuentra en el **Anexo G** **Calculo del centro de masa.**

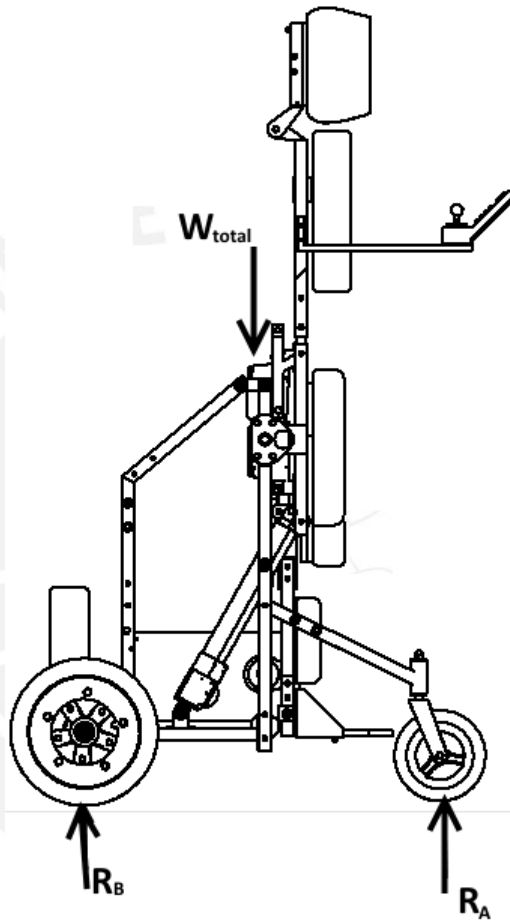


Figura 3.56 Distribución del peso - Bipedestación

A continuación se calcularán las reacciones en estos apoyos.

$$\begin{aligned}\sum M_A &= 0 \\ W_{total} x_{total} - R_B x_{AB} &= 0 \\ R_B &= \frac{W_{total} x_{total}}{x_{AB}} \\ \sum F_y &= 0\end{aligned}\tag{3.32}$$

$$R_A + R_B = W_{total}$$

$$R_A = W_{total} - R_B \quad (3.33)$$

Con,

$$x_{total} = 254 \text{ mm}$$

$$W_{total} = 1000 \text{ N}$$

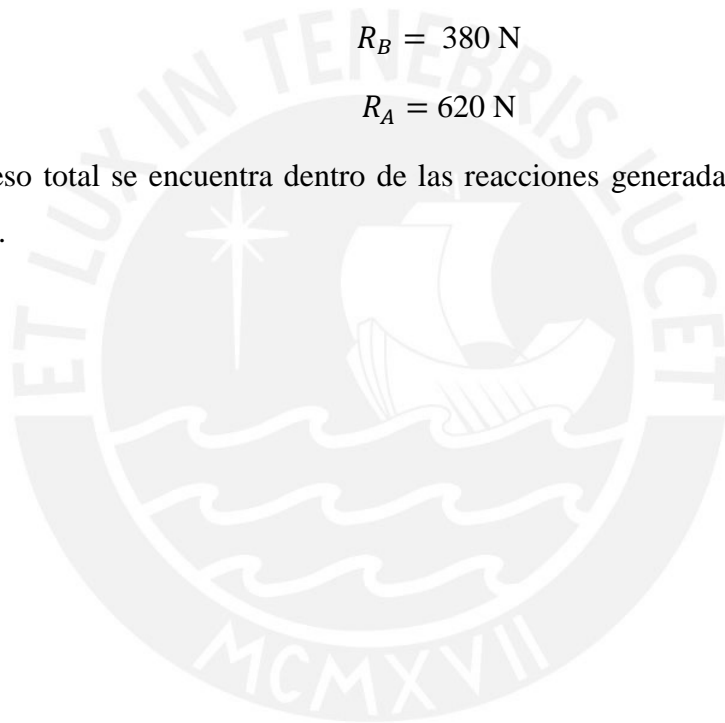
$$x_{AB} = 667 \text{ mm}$$

Reemplazando, se calcula:

$$R_B = 380 \text{ N}$$

$$R_A = 620 \text{ N}$$

Como el peso total se encuentra dentro de las reacciones generadas en las ruedas, la silla será estable.



3.7 Cálculos de los elementos más críticos

3.7.1 Análisis de transversales

En la

Figura 3.57a se muestran en qué punto se aplica la fuerza en los transversales a utilizarse y en la Figura 3.57b se muestra la ubicación del cordón de soldadura entre el transversal y la pieza que lo unirá a la estructura.

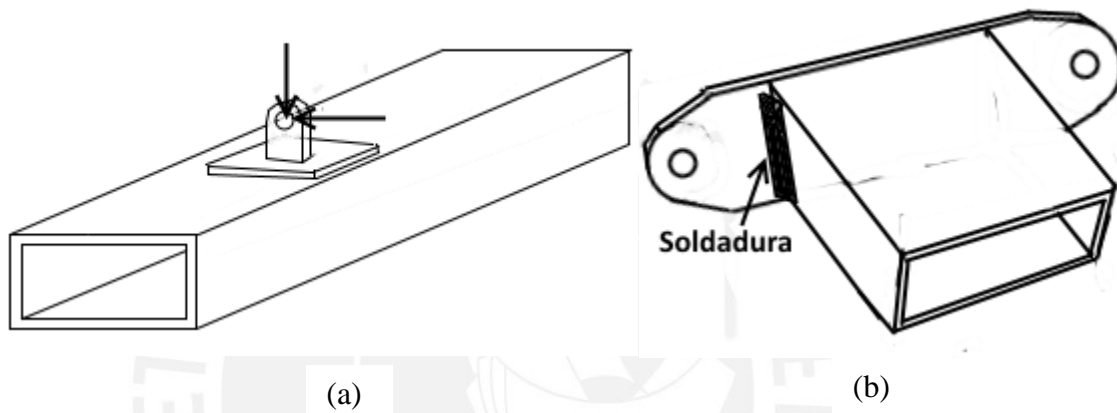


Figura 3.57 (a) Lugar de aplicación de la fuerza en el actuador (b) Ubicación del cordón de soldadura

La sección transversal de estos elementos se muestra en la Figura 3.58:

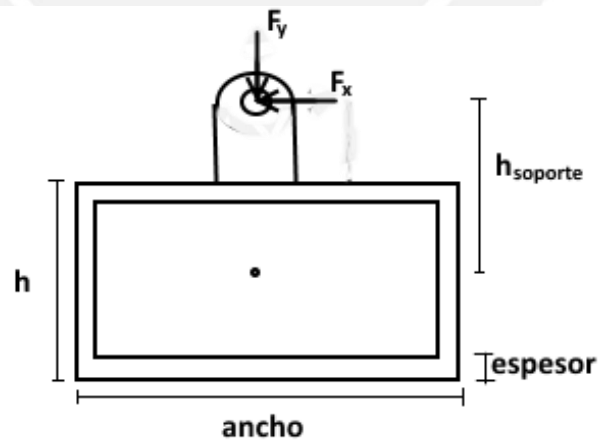


Figura 3.58 Sección transversal

Se realiza el DCL del transversal y se evalúa el diagrama de fuerza cortante (DFC) y momento flector (DMF) en el transversal (Figura 3.59)

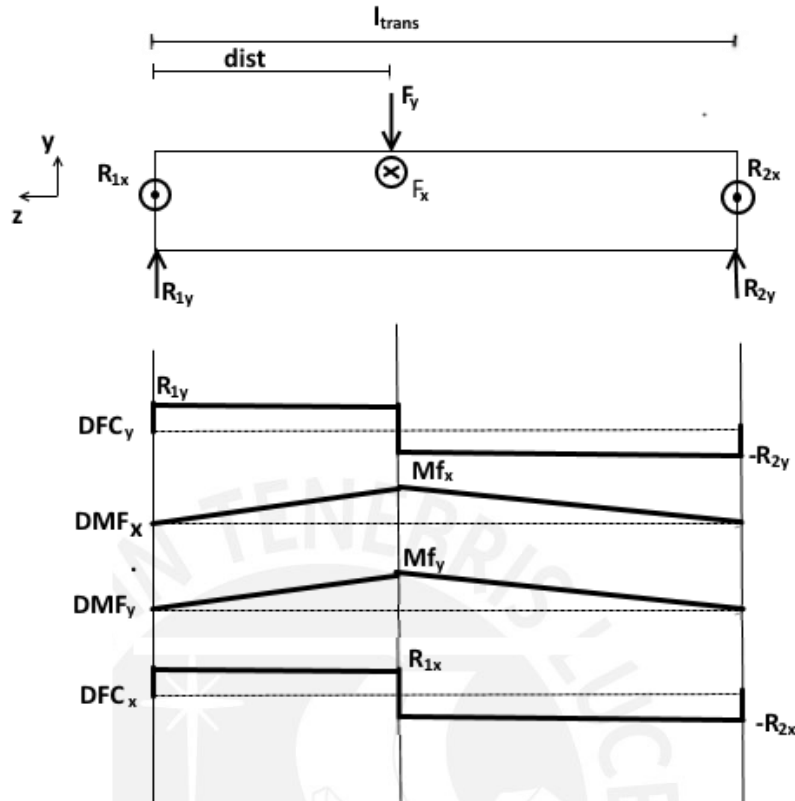


Figura 3.59 DCL tubo transversal

Calculando las fuerzas:

$$R_{1x} = \frac{l_{trans} - dist}{l_{trans}} F_x \quad (3.34)$$

$$R_{2x} = \frac{dist}{l_{trans}} F_x \quad (3.35)$$

$$R_{1y} = \frac{l_{trans} - dist}{l_{trans}} F_y \quad (3.36)$$

$$R_{2y} = \frac{dist}{l_{trans}} F_y \quad (3.37)$$

Se calculan los momentos de inercia para cada eje:

$$I_{xx} = \frac{1}{12} esp h^3 2 + 2 \left[\frac{(ancho - esp)^3}{3} esp^3 + (ancho - 2 esp) esp \left(\frac{altura}{2} - esp \right)^2 \right] \quad (3.38)$$

$$I_{yy} = \frac{1}{12} esp (ancho - 2 esp)^3 2 + 2 \left[\frac{h^3}{3} esp^3 + h esp \left(\frac{ancho}{2} - esp \right)^2 \right] \quad (3.39)$$

Siendo los momentos flectores máximos:

$$Mf_x = R_{1y} dist \quad (3.40)$$

$$Mf_y = R_{1x} \text{ dist} \quad (3.41)$$

Se calculan los esfuerzos producidos por estos momentos flectores:

$$\sigma_{f_x} = \frac{Mf_x \ y_{max}}{I_{xx}} \quad (3.42)$$

$$\sigma_{f_y} = \frac{Mf_y \ x_{max}}{I_{yy}} \quad (3.43)$$

Con,

$$y_{max} = \frac{\text{altura}}{2} \quad (3.44)$$

$$x_{max} = \frac{\text{ancho}}{2} \quad (3.45)$$

Finalmente se calcula el esfuerzo máximo:

$$\sigma_{max} = \frac{\sigma_{acero}}{FS} \quad (3.46)$$

Y se verifica que el componente cumpla con la siguiente relación:

$$\sigma_{transversal} < \sigma_{max} \quad (3.47)$$

3.7.1.1 Transversal Actuador lineal 3

Se realiza el cálculo de los esfuerzos para el transversal que soportara al actuador lineal 3.

Datos:

$$l_{trans} = 428 \text{ mm}$$

$$ancho = 60 \text{ mm}$$

$$dist = 9.6 \text{ mm}$$

$$altura = h = 30 \text{ mm}$$

$$F_x = 503.8 \text{ N}$$

$$\sigma_{acero} = 290 \text{ MPa}$$

$$F_y = 726.2 \text{ N}$$

$$FS = 2$$

$$esp = 1.5 \text{ mm}$$

Reemplazando, se obtienen:

$$R_{1x} = 492.4 \text{ N}$$

$$R_{1y} = 708.8 \text{ N}$$

$$R_{2x} = 11.3 \text{ N}$$

$$R_{2y} = 16.3 \text{ N}$$

$$I_{xx} = 38\,046 \text{ mm}^4$$

$$I_{yy} = 119\,468.2 \text{ mm}^4$$

$$Mf_x = 6\,830.5 \text{ N mm}$$

$$Mf_y = 4\,745.2 \text{ N mm}$$

$$\sigma_{f_x} = 2.693 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{f_y} = 1.19 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{max} = 145 \text{ MPa}$$

Finalmente, se verifica en la ecuación 3.47:

$$\sigma_{transversal} < \sigma_{max}$$

$$2.7 < 145 \text{ MPa (Si cumple)}$$

3.7.1.2 Transversal Actuador lineal 4

Se realiza el cálculo de los esfuerzos para el transversal que soportara al actuador lineal 4.

Datos:

$$l_{trans} = 428 \text{ mm}$$

$$ancho = 50 \text{ mm}$$

$$dist = 194.2 \text{ mm}$$

$$altura = h = 25.4 \text{ mm}$$

$$F_x = 0 \text{ N}$$

$$\sigma_{acero} = 290 \text{ MPa}$$

$$F_y = 1024.4 \text{ N}$$

$$FS = 2$$

$$esp = 1.5 \text{ mm}$$

Reemplazando, se obtiene

$$R_{1x} = 0 \text{ N}$$

$$R_{1y} = 559.6 \text{ N}$$

$$R_{2x} = 0 \text{ N}$$

$$R_{2y} = 464.7 \text{ N}$$

$$I_{xx} = 21\,893 \text{ mm}^4$$

$$I_{yy} = 68\,094 \text{ mm}^4$$

$$Mf_x = 108\,670 \text{ N mm}$$

$$Mf_y = 0 \text{ N mm}$$

$$\sigma_{f_x} = 63 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{f_y} = 0 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{max} = 145 \text{ MPa}$$

Finalmente, se verifica en la ecuación 3.47:

$$\sigma_{transversal} < \sigma_{max}$$

$$63 < 145 \text{ MPa (Si cumple)}$$

3.7.2 Análisis de la soldadura en los transversales

A continuación se analizan los cordones de soldadura mostrados en la Figura 3.60.

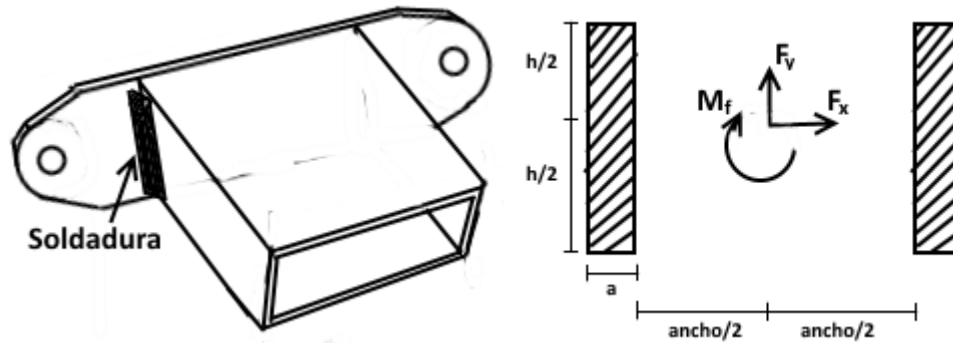


Figura 3.60 Cordones de soldadura- Tubo transversal

Área del cordón:

$$A = a \text{ ancho } 2 \quad (3.48)$$

Momento de inercia:

$$I_x = \frac{a \text{ ancho}^3}{12} \quad (3.49)$$

$$I_y = \left[\frac{\text{ancho } a^3}{12} + \left(\frac{\text{ancho}+a}{2} \right)^2 \text{ ancho } a \right] 2 \quad (3.50)$$

$$I_p = I_x + I_y \quad (3.51)$$

Momento flector:

$$M_{f_x} = F_x h_{\text{soporte}} \quad (3.52)$$

Calculo de los esfuerzos:

Por fuerza cortante:

$$\tau_{a c} = \frac{F_y}{A} \quad (3.53)$$

$$\tau_{n c} = \frac{F_x}{A} \quad (3.54)$$

Momento flector:

$$\tau_{af} = \frac{M_f \left(\frac{ancho}{2} + a \right)}{I_p} \quad (3.55)$$

$$\tau_{nf} = \frac{M_f \left(\frac{ancho}{2} \right)}{I_p} \quad (3.56)$$

Superposición:

$$\tau_a = \tau_{ac} + \tau_{af} \quad (3.57)$$

$$\tau_n = \tau + \tau_{nf} \quad (3.58)$$

Se pasan los esfuerzos al plano de garganta de soldadura:

$$\sigma_n = \frac{(n-t_n)}{\sqrt{2}} \quad (3.59)$$

$$\tau_n = \frac{(n+t_n)}{\sqrt{2}} \quad (3.60)$$

$$\tau_p = \tau_a \quad (3.61)$$

Y se calcula el esfuerzo equivalente

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_n^2 + 3(\tau_n^2 + \tau_p^2)} \quad (3.62)$$

Esfuerzo máximo:

$$\sigma_{max} = 0.9 \frac{\sigma_{acero}}{FS} \quad (3.63)$$

Finalmente se verifica que el cordón cumpla con la siguiente relación:

$$\sigma_{eq} < \sigma_{max} \quad (3.64)$$

3.7.2.1 Soldadura en el Transversal Actuador lineal 3

Se realiza el cálculo de los esfuerzos en la soldadura del transversal que soportara al actuador lineal 3.

Datos:

$$a = 3 \text{ mm}$$

$$\text{ancho} = 60 \text{ mm}$$

$$F_x = 503.8 \text{ N}$$

$$F_y = 726.2 \text{ N}$$

$$h_{\text{soporte}} = 53.8 \text{ mm}$$

$$\sigma_{\text{acero}} = 290 \text{ MPa}$$

$$FS = 2$$

Se calcula:

$$A = 360 \text{ mm}^2$$

$$I_x = 108000 \text{ mm}^4$$

$$I_y = 357480 \text{ mm}^4$$

$$I_p = 465480 \text{ mm}^4$$

$$Mf_x = 42\,246 \text{ N mm}$$

$$\tau_{ac} = 2.0144 \text{ MPa}$$

$$\tau_{af} = 3 \text{ MPa}$$

$$\tau_{nc} = 1.4 \text{ MPa}$$

$$\tau_{nf} = 2.7 \text{ MPa}$$

$$\tau_a = 5 \text{ MPa}$$

$$\tau_n = 4.12 \text{ MPa}$$

$$n = 0 \text{ MPa}$$

$$\sigma_n = -2.9148 \text{ MPa}$$

$$\tau_n = 2.9148 \text{ MPa}$$

$$\tau_p = 5 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{eq} = 10.45 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{max} = 130.5 \text{ MPa}$$

Finalmente se verifica que el cordón cumpla con la Ecuación 3.64:

$$\sigma_{eq} < \sigma_{max}$$

$$10.45 < 130.5 \text{ MPa (Si cumple)}$$

3.7.2.1 Soldadura en el Transversal Actuador lineal 4

Se realiza el cálculo de los esfuerzos en la soldadura del transversal que soportara al actuador lineal 4.

Datos:

$$a = 3 \text{ mm}$$

$$\text{ancho} = 0 \text{ mm}$$

$$F_x = 0 \text{ N}$$

$$F_y = 1024.4 \text{ N}$$

$$h_{\text{soporte}} = 51.05 \text{ mm}$$

$$\sigma_{\text{acero}} = 290 \text{ MPa}$$

$$FS = 2$$

Se calcula:

$$A = 300 \text{ mm}^2$$

$$I_x = 62500 \text{ mm}^4$$

$$I_y = 210900 \text{ mm}^4$$

$$I_p = 273400 \text{ mm}^4$$

$$Mf_x = 0 \text{ N mm}$$

$$\tau_{ac} = 3.41 \text{ MPa}$$

$$\tau_{af} = 0 \text{ MPa}$$

$$\tau_{nc} = 0 \text{ MPa}$$

$$\tau_{nf} = 0 \text{ MPa}$$

$$\tau_a = 3.41 \text{ MPa}$$

$$\tau_n = 0 \text{ MPa}$$

$$n = 0 \text{ MPa}$$

$$\sigma_n = 0 \text{ MPa}$$

$$\tau_n = 0 \text{ MPa}$$

$$\tau_p = 3.41 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{eq} = 5.91 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{max} = 130.5 \text{ MPa}$$

Finalmente se verifica que el cordón cumpla con la Ecuación 3.64:

$$\sigma_{eq} < \sigma_{max}$$

$$5.91 < 130.5 \text{ MPa (Si cumple)}$$

3.7.3 Eje de giro del asiento

A continuación se analizará el eje de giro del asiento. En la Figura 3.61 se muestra la configuración del asiento, el eje, el soporte y la corredera.

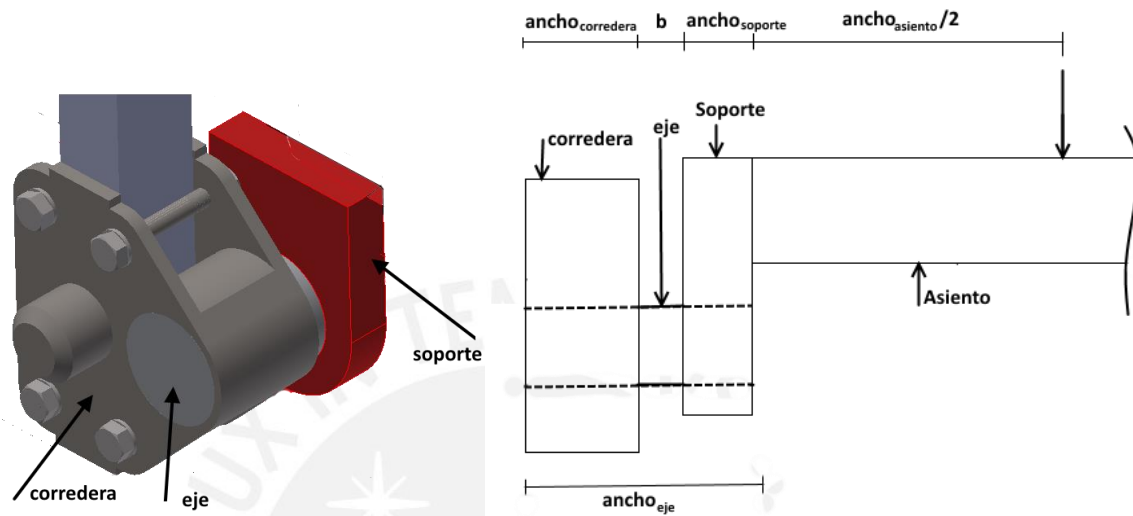


Figura 3.61 Ubicación del eje de giro del asiento

Se realiza un DCL (Figura 3.62) calculando el DFC y DMF del eje.

Se tiene como datos:

$$ancho_{corredera} = 42 \text{ mm}$$

$$b = 10 \text{ mm}$$

$$ancho_{soporte} = 15 \text{ mm}$$

$$W = 400 \text{ N}$$

$$d = 38 \text{ mm}$$

$$\sigma_{acero} = 290 \text{ MPa}$$

$$FS = 2$$

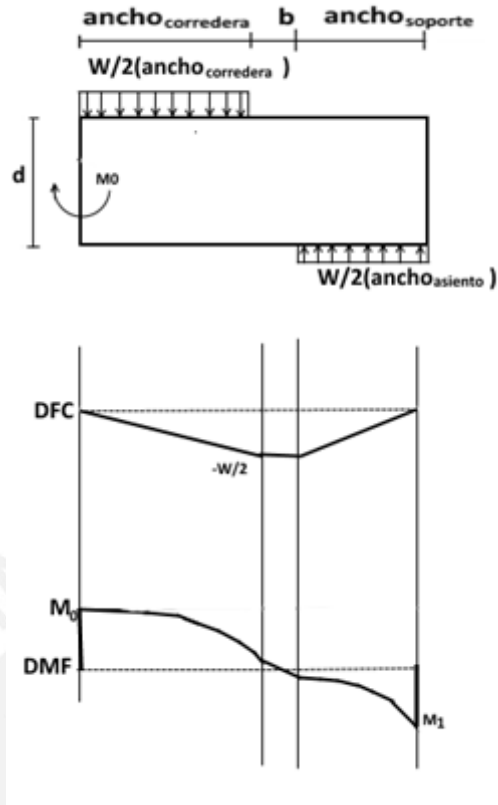


Figura 3.62 DCL eje

Con,

$$M_0 = \frac{W}{2} \left(\frac{b + ancho_{corredera}}{2} \right) \quad (3.65)$$

$$M_0 = 5200 \text{ Nmm}$$

$$M_3 = \frac{W}{2} \left(\frac{b + ancho_{soporte}}{2} \right) \quad (3.66)$$

$$M_3 = 2500 \text{ Nmm}$$

Se calcula el esfuerzo máximo que soporta el eje:

$$\sigma_{f_0} = \frac{M_0}{32 d^3} \quad (3.67)$$

$$\sigma_{f_0} = 0.003 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{f_3} = \frac{M_3}{32 d^3} \quad (3.68)$$

$$\sigma_{f_3} = 0.0014 \text{ MPa}$$

Esfuerzo máximo permisible:

$$\sigma_{max} = \frac{\sigma_{acero}}{FS} \quad (3.69)$$

$$\sigma_{max} = 145 \text{ MPa}$$

Finalmente, se verifica que eje cumpla con la siguiente relación:

$$\sigma_f < \sigma_{max} \quad (3.70)$$

$$0.002 < 145 \text{ MPa (Si cumple)}$$



3.7.4 Soldadura en el soporte del eje de giro del asiento

A continuación se realiza el análisis del cordón de soldadura. En la Figura 3.63 se muestra la ubicación de estos cordones de soldadura.

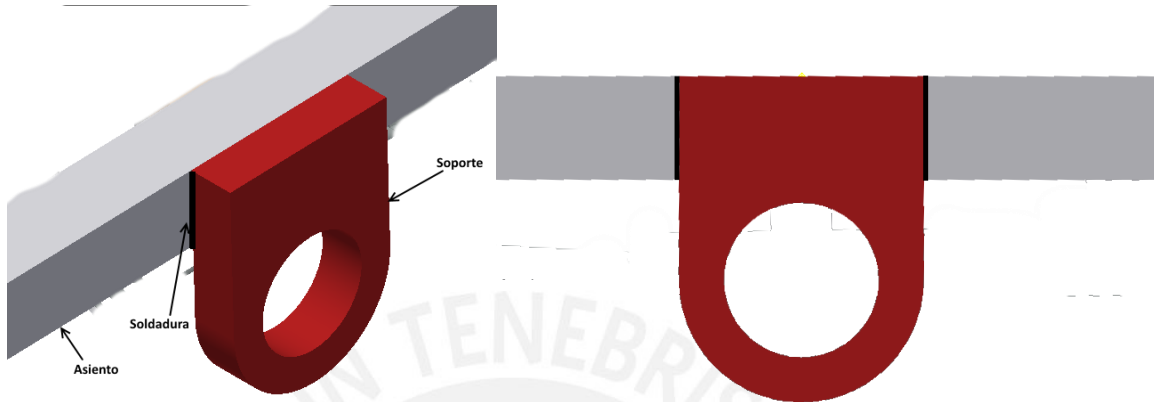


Figura 3.63 Ubicación de los cordones de soldadura

Se realiza un DCL del asiento (Figura 3.64) y de los cordones de soldadura (Figura 3.65)

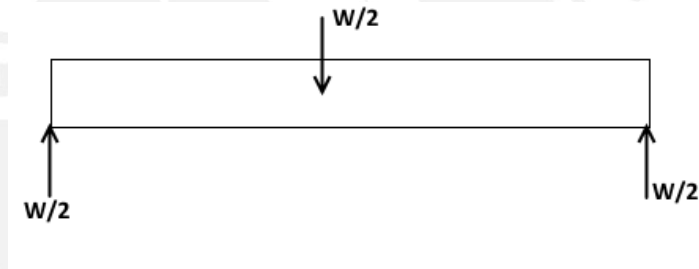


Figura 3.64 DCL Asiento

En el cordón de soldadura:

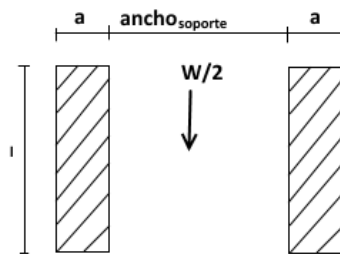


Figura 3.65 DCL cordón de soldadura

Se tiene como datos:

$$largo_{soporte} = 60mm$$

$$a = 3 \text{ mm}$$

$$l = 25.4 \text{ mm}$$

$$W = 400 \text{ N}$$

Área del cordón:

$$A = 2 a l \quad (3.71)$$

$$A = 152.4 \text{ mm}^2$$

Esfuerzos debidos a la fuerza cortante:

$$\tau_a = \frac{W}{2A} \quad (3.72)$$

$$\tau_a = 1.31 \text{ MPa}$$

$$\tau_n = 0 \quad (3.73)$$

$$n = 0 \quad (3.74)$$

$$n = 0 \text{ MPa}$$

Pasando los esfuerzos al plano de garganta de soldadura:

$$\sigma_n = \frac{(n-\tau_n)}{\sqrt{2}} = 0 \text{ MPa} \quad (3.75)$$

$$\tau_n = \frac{(n+\tau_n)}{\sqrt{2}} = 0 \text{ MPa} \quad (3.76)$$

$$\tau_p = \tau_a \quad (3.77)$$

$$\tau_p = 1.31 \text{ MPa}$$

Esfuerzo equivalente

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_n^2 + 3(\tau_n^2 + \tau_p^2)} = \sqrt{3 \tau_p^2} \quad (3.78)$$

$$\sigma_{eq} = 2.273 \text{ MPa}$$

Esfuerzo máximo:

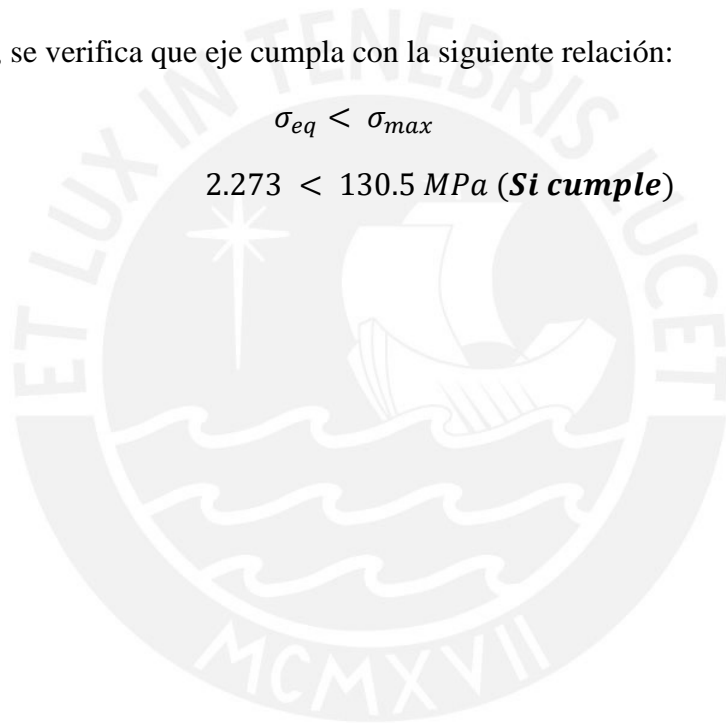
$$\sigma_{max} = 0.9 \frac{\sigma_{acero}}{FS} \quad (3.79)$$

$$\sigma_{max} = 130.5 \text{ MPa}$$

Finalmente, se verifica que eje cumpla con la siguiente relación:

$$\sigma_{eq} < \sigma_{max} \quad (3.80)$$

$$2.273 < 130.5 \text{ MPa (Si cumple)}$$



3.8 Lista de planos

3.8.1 Planos de despiece

Nombre	Anexo
Soporte de Joystick - Parte inferior	A.1.1
Soporte de Joystick - Parte superior	A.1.2
Apoyabrazo	A.1.3
Asiento	A.1.4
Caja electrónica – Base	A.1.5
Caja electrónica – Lado 1	A.1.6
Caja electrónica – Lado 2 Lado curvo	A.1.7
Pata frontal	A.1.8
Pata posterior	A.1.9
Transversal ancho 25x25	A.1.10
Transversal ancho 25x50	A.1.11
Transversal ancho 30x60	A.1.12
Transversal largo 25x25	A.1.13
Unión Espaldar / Actuador lineal 1	A.1.14
Unión Espaldar / Asiento	A.1.15
Unión Asiento / Actuador lineal 2.....	A.1.16
Pieza L para unión Asiento / Apoyapie	A.1.17

3.8.2 Planos de ensamble

Ensamble de Cabecera	A.2.1
Ensamblaje espaldar	A.2.2
Ensamblaje Asiento	A.2.3
Ensamble del apoyapié-	A.2.4
Ensamblaje silla	A.2.5
Ensamble estructura móvil	A.2.6
Ensamblaje Rueda frontal	A.2.7
Ensamble Caja electrónica	A.2.8





CAPITULO 4

COMPONENTES ELECTRÓNICOS

En el presente capítulo se detalla todos los componentes de la parte electrónica. Primeramente se presenta la tarjeta electrónica y cada uno de sus componentes; a continuación se presentan todos los componentes electrónicos que la silla de ruedas utilizara. Finalmente, se explican los diagramas de flujo del programa que se diseñó y se utilizara en el microcontrolador.

4.1 Tarjeta electrónica

La tarjeta electrónica se separara en 2 niveles con el fin de ahorrar espacio y para separar los componentes de potencia. Estos niveles se conectarán mediante espadines en los pines correspondientes al microcontrolador, que permitirán la utilización de los pines del microcontrolador en ambos niveles. En la Figura 4.66 se muestra una imagen referencia de este tipo de unión por niveles, conocida como shield.

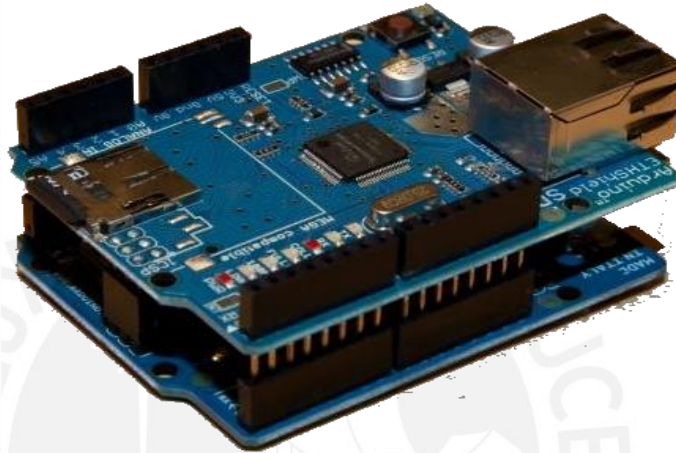


Figura 4.66 Unión de los niveles (Imagen de referencia) [21]

A continuación se detallarán cada uno de los niveles, indicando cada componente que es parte del nivel así como las conexiones entre los componentes.

4.1.1 Nivel 1

En este nivel se ubican los componentes de entrada/lectura de datos, así como el módulo encargado de convertir el voltaje de las baterías a uno que pueda ser utilizado por estos componentes.

Los componentes que forman parte de este nivel son:

- Arduino Mega 2560.
- Regulador de voltaje de 24V a 6V.
- Múltiples Borneras de tornillo de 2 pines para la conexión de los terminales de la batería, el voltaje del entregado por el regulador, los pines de la pantalla LCD, joystick, teclado matricial.
- Modulo bluetooth.

En la Figura 4.67 se aprecia el diagrama esquemático de este nivel y en el Anexo B.1 se encuentra este diagrama con más detalles, así como el circuito impreso correspondiente (Anexo B.2).

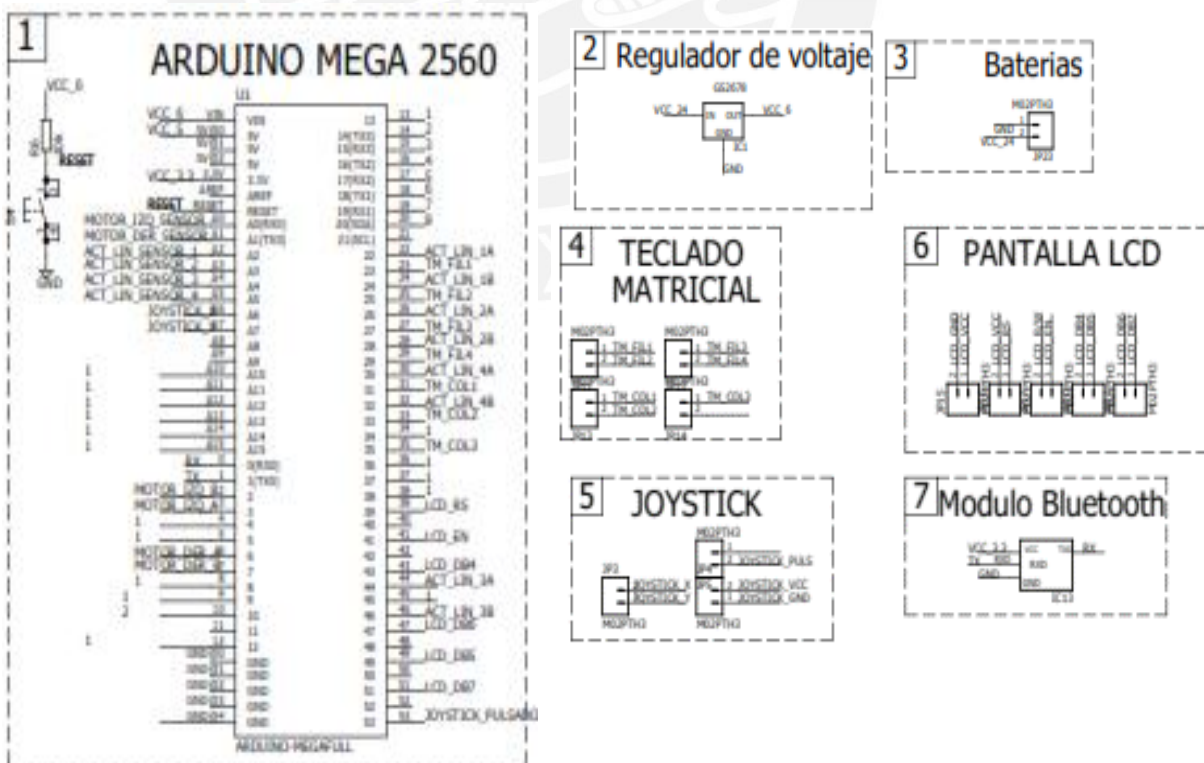


Figura 4.67 Tarjeta electrónica - Nivel 1

4.1.2 Nivel 2

Este nivel se conecta con el nivel 1 mediante espadines macho/macho que van conectados a los pines del Arduino, permitiendo así, utilizar los pines requeridos para el control de los motores/actuadores lineales.

Los componentes que forman parte de este nivel son:

- 3 Puentes de H formados por MOSFET canal P/N para el control de los motores y del actuador lineal 3.
- 3 Puentes de H formado por relés para el control de los actuadores lineales 1,2 y 4.
- Múltiples Borneras de tornillo de 2 pines para la conexión de los terminales de la batería, alimentación y sensores de los actuadores lineales y motores.

En la Figura 4.68 se aprecia el diagrama esquemático de este nivel y en el Anexo B.3 se encuentra el plano con más detalles de este nivel de la tarjeta electrónica, así como el circuito impreso correspondiente (Anexo B.4).

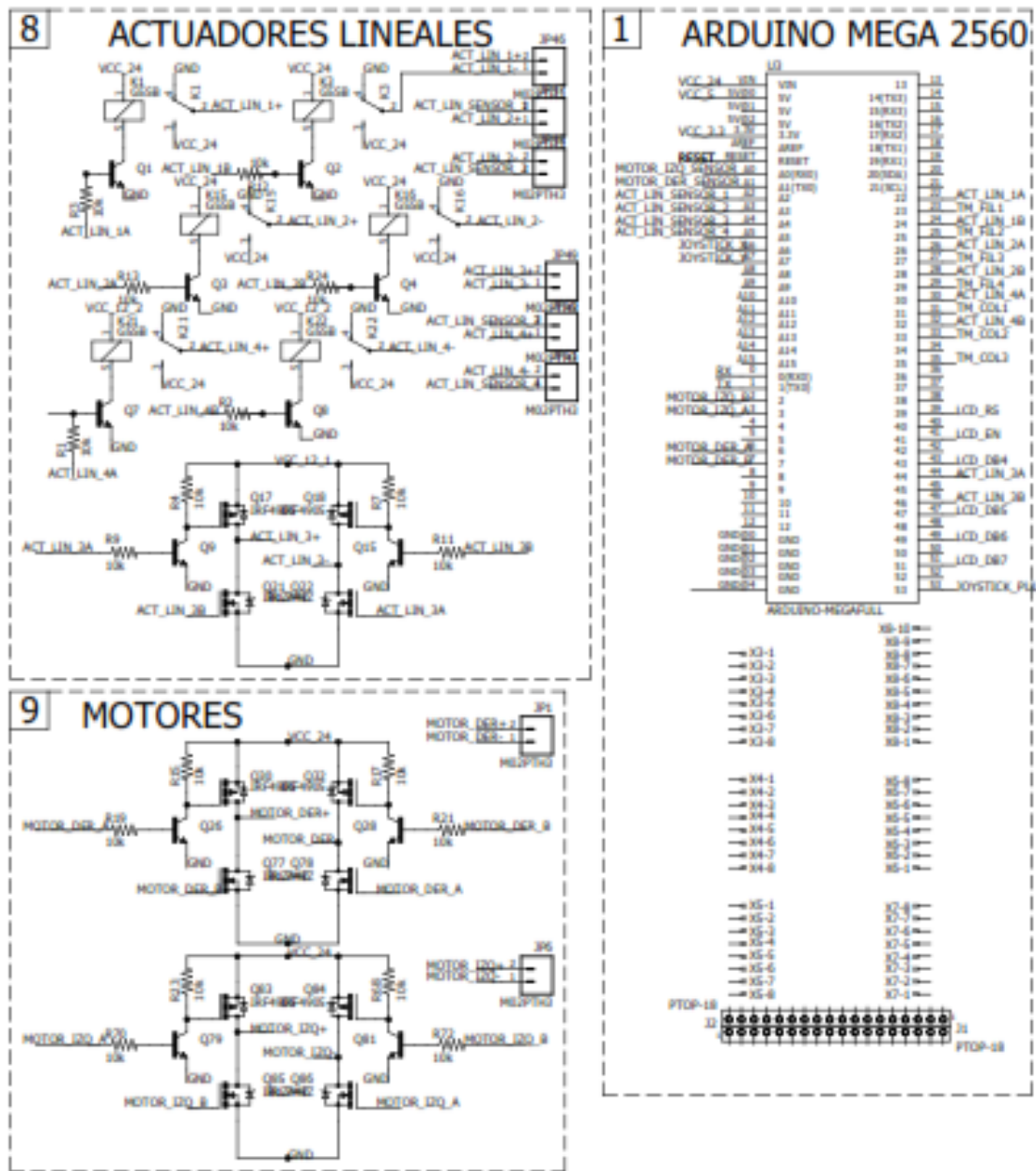


Figura 4.68 Tarjeta electrónica - Nivel 2

4.2 Componentes electrónicos

4.2.1 Tarjeta Arduino Mega 2560

Las tarjetas Arduino son plataformas computacionales open-hardware (lo que permite comprar una tarjeta Arduino armada o bien conseguir los componentes para uno mismo implementarla) que utilizan microcontroladores con entradas y salidas análogas/digitales, así como todos los demás componentes de estos microcontroladores (timers, USART, PWM, etc.) con el fin de facilitar el uso de estos microcontroladores. La programación de estas tarjetas se realiza en lenguaje C y mediante la conexión de estos a un computador por un puerto USB.

El Arduino Mega 2560, mostrado en la Figura 4.69, se basa en el microcontrolador ATmega2560, cuyas características técnicas se detallan en la Tabla 4.8.

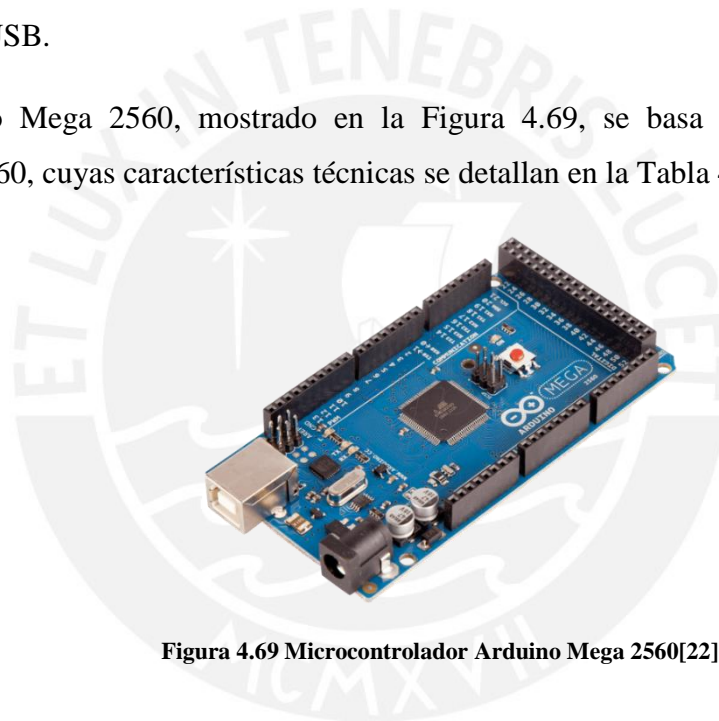


Figura 4.69 Microcontrolador Arduino Mega 2560[22]

Tabla 4.8 Especificaciones técnicas del Arduino Mega 2560[22]

CARACTERÍSTICA	DESCRIPCIÓN
Microcontrolador	ATmega2560
Voltaje de entrada(V)	7-12
Voltaje de entrada (limite) (V)	6-20
Voltaje de operación(V)	5
Pines digitales E/S	54
Pines PWM	15 de los pines digitales
Pines análogos	16
Corriente por cada pin E/S(mA)	20
Corriente máxima en el pin 3.3V(mA)	50
Memoria Flash(KB)	256
SRAM(KB)	8
EEPROM(KB)	4
Reloj(MHz)	16
Dimensiones(mm x mm)	101.52 x 53.33
Peso(g)	37

*Para más información ver anexo C.1

4.2.2 Modulo regulador de voltaje RB-Dfr-222

El módulo de voltaje RB-Dfr-222, mostrado en la Figura 4.70, es una pequeña tarjeta electrónica que se encargara de proporcionar el voltaje requerido por los componentes de baja potencia. En la tabla 4.9 se detallan sus especificaciones técnicas.

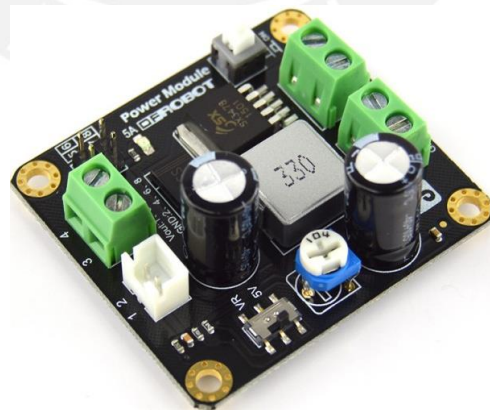


Figura 4.70 Modulo regulador de voltaje [23]

4.2.2.1 Especificaciones técnicas

En la Tabla 4.9 se detallan las especificaciones técnicas de este módulo regulador de voltaje

Tabla 4.9 Especificaciones técnicas del módulo regulador de voltaje [23]

CARACTERÍSTICAS	VALOR
Modelo	RB-Dfr-222
Distribuidor	RobotShop
CI Regulador de voltaje	dfr0205
Voltaje de entrada(Voltaje a usado)	3.6 – 25 (24) V
Voltaje de salida(Voltaje a usarse)	3.3 - 25 (6)V
Potencia máxima	25 W

*Más información en el Anexo C.2

4.2.3 Teclado matricial 4x 3

4.2.3.1 Funcionamiento

Este tipo de componente electrónico está formado por un arreglo de pulsadores, como se muestra en la Figura 4.71b. Cuando no se oprimen las teclas, no existe conexión entre filas y columnas; pero cuando se oprime una tecla, si existe esa conexión. Este mecanismo se utiliza para la detección de teclas oprimidas de la siguiente forma:

- Se envía un 1 lógico a una determinada columna
- Se leen los valores de las todas las filas del teclado, si alguno de estos es 1 lógico, significara que existe conexión entre la fila y columna correspondiente, por lo que se habrá detectado la presión de determinada tecla (según sea la columna/fila correspondiente).
- Se repite este proceso hasta recorrer todas las columnas.

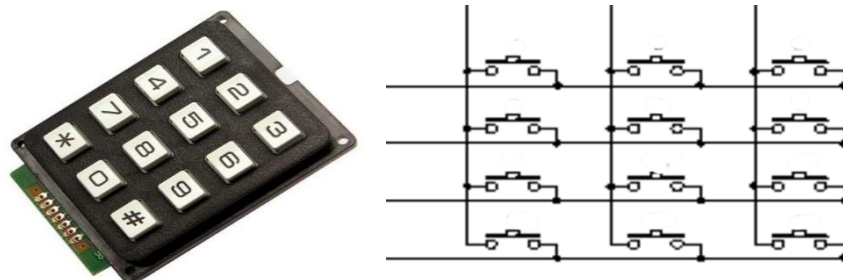


Figura 4.71 Teclado matricial(a) [24] Arreglo interno (b) [25]

4.2.3.2 Uso

Se utilizaría este teclado matricial para el ingreso de códigos, los cuales se relacionarán con el uso de las diversas funcionalidades de la silla. En la Tabla 4.10 se detallan estos códigos.

La tecla ‘*’ se utilizaría como ENTER, la cual permitirá el ingreso de códigos.

La tecla ‘#’ se utilizaría como CANCEL, la cual borraría el código que se esté ingresando.

Tabla 4.10 Códigos para activar las funcionalidades de la silla

CÓDIGO	FUNCIÓN
111	Desplazamiento
222	Función silla de ruedas
333	Función camilla
444	Función bipedestación
555	Ajuste de inclinación de espaldar
666	Ajuste de inclinación de apoyapié
777	Ajuste de inclinación de silla
888	Elevar el asiento
999	Bajar el asiento

*Más información sobre el teclado matricial en el Anexo C.3

4.2.4 Pantalla LCD 16 x 2

4.2.4.1 Funcionamiento:

Esta pantalla LCD, mostrada en la Figura 4.72, se controla mediante un pin habilitador y el pin RS, el cual le indica si se están recibiendo comandos o data para mostrar. En la Tabla 4.11 se detallan todos los pines que presenta este componente. Solo se conectarán 6 de estos pines a las entradas del microcontrolador debido a que para la función que se le quiere dar, solo son necesarios los pines de selección de registro RS, habilitador EN y 4 pines de datos DB4-DB7. Adicionalmente se conectarán los pines GND, VCC, VEE y R/W a la tarjeta electrónica.

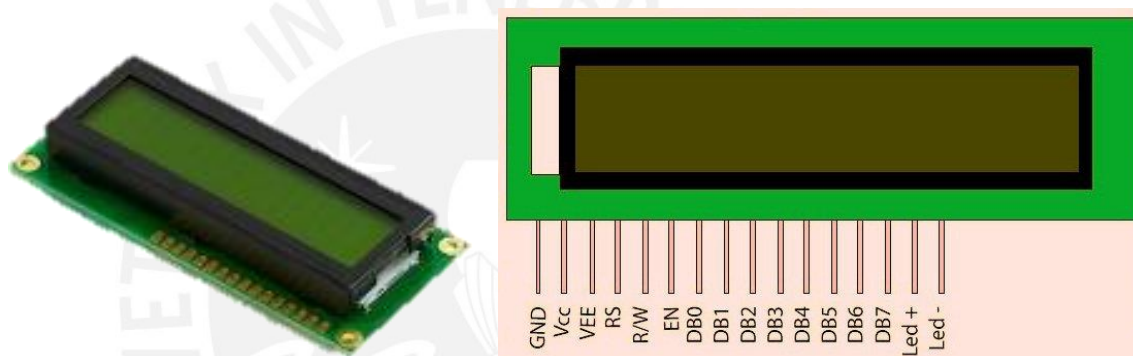


Figura 4.72 Pantalla LCD (a) [26], Pines de la pantalla LCD (b) [27]

Tabla 4.11 Pines de la pantalla LCD

PIN	FUNCIÓN
GND	Alimentación del módulo, 0 Voltios.
VCC	Alimentación del módulo, 5 Voltios
VEE	Ajuste de brillo, se conecta a un potenciómetro ubicado en la tarjeta.
RS	Selector de registro Si es 0 lógico – comandos Si es 1 lógico – información valida en los pines DB0-DB7
R/W	Pin que permite escribir o leer datos en el módulo LCD. Se conectará a GND para solo utilizar el modo de escritura.
EN	Pin habilitador, permite habilitar o deshabilitar el funcionamiento del modulo
DB0-DB7	Pines de data
LED+	Ánodo del led para encender la pantalla
LED-	Cátodo del led para encender la pantalla

4.2.4.2 Uso

Esta pantalla LCD se utilizara para la visualización de los comandos ingresados por el teclado matricial, así como para enviar información al usuario, se utilizaría una pantalla LCD de 16x2 caracteres mostrada en la Figura 4.72. A continuación se explican la información que se mostrara en esta pantalla y en la Tabla 4.12 se detallan todos los posibles mensajes. Más información acerca de la pantalla LCD en el **Anexo C.4**.

- Comandos ingresados: La selección de la funcionalidad que se desee emplear (silla de ruedas normal, camilla o bipedestación) se realizara mediante códigos ingresados por medio del teclado matricial y estos se podrán visualizar en la pantalla LCD.
- Envío de información: Una vez ingresado un código, se mostrara mensajes informando al usuario si el código ingresado fue correcto o incorrecto. Así, como se podrán mostrar mensajes del estado del sistema.

Tabla 4.12 Mensajes mostrados por la pantalla LCD

MENSAJE*	SIGNIFICADO
CÓDIGO ACEPTADO	Código ingresado fue validado
CÓDIGO ERRÓNEO	Código ingresado no valido
CÓDIGO 111 / DESPLAZAMIENTO	Se ingresó el código 111, correspondiente a la funcionalidad “Desplazamiento”
CÓDIGO 222 / SILLA DE RUEDAS	Se ingresó el código 222, correspondiente a la funcionalidad “Silla de ruedas”
CÓDIGO 333 / CAMILLA	Se ingresó el código 333, correspondiente a la funcionalidad “Camilla”
CÓDIGO 444 / BIPEDESTACIÓN	Se ingresó el código 444, correspondiente a la funcionalidad “Bipedestación”
CÓDIGO 555 / AJUSTE ESPALDAR	Se ingresó el código 555, correspondiente a la funcionalidad “Ajuste de la inclinación del espaldar”
CÓDIGO 666 / AJUSTE APOYAPIÉ	Se ingresó el código 666, correspondiente a la funcionalidad “Ajuste de inclinación del apoyapié”
CÓDIGO 777 / AJUSTE INC. SILLA	Se ingresó el código 777, correspondiente a la funcionalidad “Ajuste de inclinación de la silla”
CÓDIGO 888 / AJUSTE ALTURA	Se ingresó el código 888, correspondiente a la funcionalidad “Elevación de altura de asiento”
CÓDIGO 999 / AJUSTE ALTURA	Se ingresó el código 999, correspondiente a la funcionalidad “Bajar altura de asiento”
FUNCIONALIDAD ALCANZADA	Se alcanzó la funcionalidad deseada.

* '/' representa un ENTER, por lo que el mensaje posterior se mostrara en la siguiente fila.

4.2.5 Joystick

Joystick analógico, mostrado en la Figura 4.73, que entregará 2 señales analógicas proporcionales al desplazamiento del mango en los ejes X- Y. Este irá ubicado al lado derecho de la silla de ruedas.

Internamente posee 2 potenciómetros alineados perpendiculares entre sí, en la posición inicial, el potenciómetro se encuentra en su valor medio, dependiendo de sentido en que se mueva el stick, el valor de la resistencia variara hasta el valor máximo y mínimo.

Se necesita conectar un voltaje VCC y GND el cual se conecta a los extremos de estos potenciómetros, para generar un divisor de tensión cuya tensión variara dependiendo del valor de resistencia del potenciómetro correspondiente.



Figura 4.73 Joystick [28]

En la Tabla 4.13 se detallan las especificaciones técnicas del joystick seleccionado.

Tabla 4.13 Especificaciones técnicas del joystick [28]

CARACTERÍSTICAS	VALOR
Modelo	TY201B-M4
Marca	TENSON
Voltaje de alimentación	5 VDC
Numero de ejes	2
Pulsador	Si
Resistencia máxima del potenciómetro	10 K

*Más información en el Anexo C.5

4.2.6 Actuador lineal

Los actuadores lineales son componentes electromecánicos que permiten convertir el movimiento rotacional proporcionado por un motor eléctrico en movimientos lineales mediante un husillo o algún mecanismo similar. Debido a esto, es posible inclinar, elevar, empujar o jalar objetos simplemente mediante la presión de un botón. En la Figura 4.74 se muestra un ejemplo de un actuador lineal.



Figura 4.74 Actuador lineal [29]

4.2.6.1 Partes

En la Figura 4.75 se muestran las partes más importantes que conforman un actuador lineal, las cuales son:

- **Motor eléctrico:** Máquina que genera y transforma energía eléctrica en energía mecánica.
- **Sistema de transmisión de potencia:** Permite transmitir la potencia generada por el motor eléctrico, así como reducir la velocidad de giro y aumentar la fuerza. Generalmente se utilizan engranajes.
- **Husillo:** Es un tipo de tornillo que se utiliza en los actuadores lineales para producir un desplazamiento longitudinal del vástago.

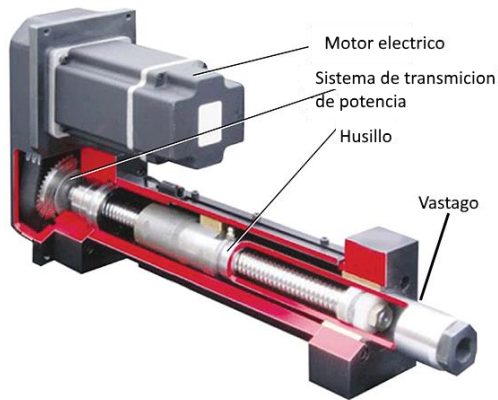


Figura 4.75 Partes de un actuador lineal [30]

4.2.6.3 Conexiones

Las conexiones de los cables de los actuadores lineales de la marca FIRGELLI AUTOMATIONS se detallan en la Figura 4.76.

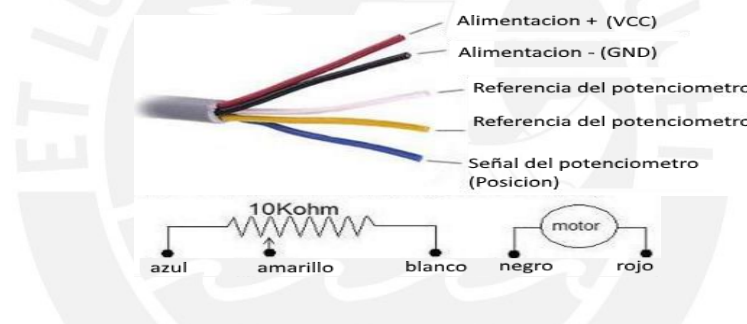


Figura 4.76 Cableado de actuadores lineales FIRGELLI [33]

Las conexiones de los cables de los actuadores lineales de la marca LINAK se detallan en la Figura 4.77.

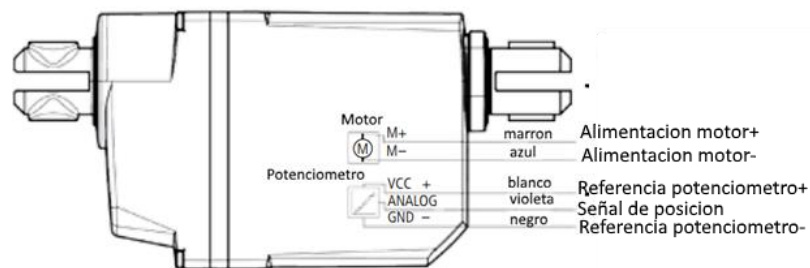


Figura 4.77 Cableado de actuadores lineales LINAK [31]

4.2.6.4 Sensor de posición

Estos actuadores lineales poseen un sensor de posición del eje, el cual entrega una señal análoga proporcional a la posición del actuador lineal. Esta señal se utilizara para el control de posición de los actuadores lineales utilizando el microcontrolador.

El principio de funcionamiento de estos sensores de resistivo, por lo que presentan un potenciómetro lineal (Figura 4.78) el cual variara su resistencia según el desplazamiento del eje del actuador lineal.



Figura 4.78 Potenciómetro lineal [34]

4.2.6.5 Actuador lineal 3 (Giro del asiento)

La activación del actuador lineal 3, encargado del giro del asiento, a diferencia de los otros actuadores que se realiza mediante un puente H de relés se realizará mediante un puente H de MOSFET con el fin de variar la velocidad de este actuador mediante ondas PWM desde el microcontrolador. Esta variación de velocidad es necesaria debido a que un cambio en la altura de la silla, realizado por el actuador lineal 4, genera un cambio en la posición de la unión del actuador lineal 3 (giro del asiento) con el asiento, y con el fin de mantener al asiento en una posición horizontal cuando se desee modificar la altura de la silla de ruedas se requiere que el actuador lineal 3 se desplace con una velocidad diferente a la del actuador lineal 4. El control de los actuadores lineales se explica en la sección 5.2.

La selección de la velocidad a la cual el actuador lineal 3 deberá de funcionar se explica a continuación. Primeramente, se definieron 2 movimientos que la silla debe de realizar para modificar la altura del asiento (1. Movimiento del actuador lineal 3, 2. Movimiento del

actuador lineal 4). Luego se simulo estos movimientos en Matlab variando la velocidad del actuador lineal 3 y verificando la inclinación del asiento en la posición final (silla elevada). Finalmente, se escogió una velocidad que genere una inclinación despreciable en el asiento.

4.2.6.5.1 Movimiento del actuador lineal 4

El primer movimiento que se analiza es el desplazamiento del actuador lineal 4(levantamiento del asiento) **sin cambio** en la longitud del actuador lineal 3 y el efecto que genera en la posición del punto B (unión actuador lineal 3 con el asiento) luego de un cambio de altura Δh . El movimiento se muestra en la Figura 5.79.

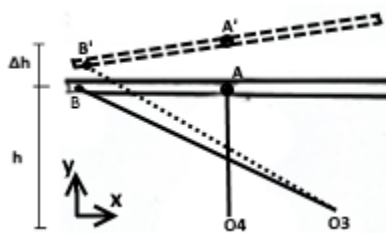


Figura 5.79 Movimiento 1

Se calcula la longitud auxiliar l_{aux} en el triángulo $O4A'O3$ mostrado en la Figura 4.80 y el ángulo θ .

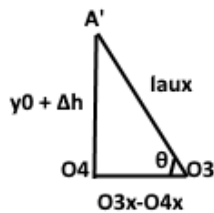


Figura 4.80 Triángulo $O4A'O3$

$$l_{aux} = \sqrt{(y_0 + \Delta h)^2 + (O_{3x} - O_{4x})^2} \dots (VI.2)$$

$$\theta = \text{atan}\left(\frac{y_0 + \Delta h}{O_{3x} - y_{O4x}}\right)$$

Se aplica la ley de cosenos en el triángulo $B'A'O3$ mostrado en la Figura 4.81.

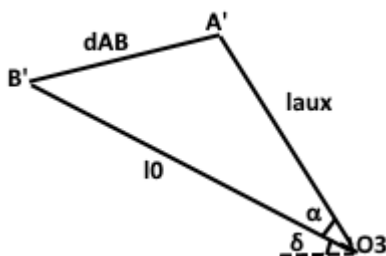


Figura 4.81 Triángulo $B'A'O3$

Ley de cosenos:

$$d_{AB}^2 = l_{aux}^2 + l_0^2 - 2 l_{aux} l_0 \cos(\alpha)$$

$$\alpha = \text{acos}\left(\frac{-d_{AB}^2 + l_{aux}^2 + l_0^2}{2 l_{aux} l_0}\right)$$

$$\delta = \theta - \alpha$$

. Finalmente, se calcula la posición final del punto B (x_f, y_f):

$$x_f = O_{3x} - l_0 \cos(\delta)$$

$$y_f = l_0 \sin(\delta)$$

4.2.6.5.2 Movimiento del actuador lineal 3

El segundo movimiento a analizar es el desplazamiento del actuador lineal 3 **sin desplazamiento** del actuador lineal 4, calculando así el cambio en la posición final del punto B cuando se da un desplazamiento Δl del actuador lineal 3. Este movimiento se puede apreciar en la Figura 4.82

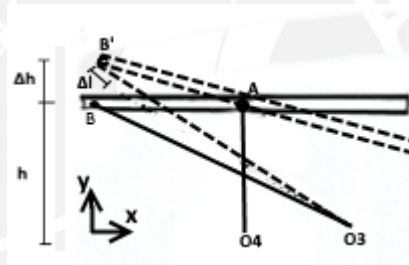
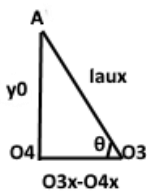


Figura 4.82 Movimiento 2

Se calcula el ángulo θ en el triángulo O4AO3 mostrado en la Figura 4.83



$$\theta = \text{atan}\left(\frac{y_0}{O_{3x} - yO_{4x}}\right)$$

Figura 4.83 Triángulo O4AO3

Se Aplica la ley de cosenos en el triángulo B'A'O3, mostrado en la Figura 4.84 .

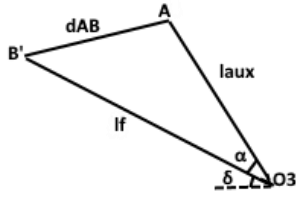


Figura 4.84 Triángulo B'A'O3

$$d_{AB} = l_{aux}^2 + l_f^2 - 2 l_{aux} l_f \cos(\alpha)$$

$$\alpha = \arccos\left(\frac{-d_{AB}^2 + l_{aux}^2 + l_f^2}{2 l_{aux} l_f}\right)$$

$$\delta = \theta - \alpha$$

Con $l_f = l_0 + \Delta l$

Finalmente se calcula la posición final del punto B (x_f, y_f):

$$x_f = O_{3x} - l_f \cos(\delta)$$

$$y_f = l_f \sin(\delta)$$

4.2.6.5.3 Cálculo de la velocidad optima

Con las relaciones de movimiento obtenidas en la parte 4.2.6.5.1 y 4.2.6.5.2, se realiza un programa en Matlab con el fin de simular ambos movimientos y calcular las posiciones finales de este movimiento. Se iteran estos 2 movimientos para un determinado rango de tiempo, primero se calcula la posición final del punto B luego de un cambio en la longitud del actuador lineal 4; posteriormente, se toma esta posición final obtenida y se realiza un aumento de la longitud del actuador lineal 3 a una velocidad determinada. Se varió la velocidad del actuador lineal 3 hasta obtener una velocidad a la cual la inclinación de la silla no se vea afectada.

Se calcula que para que el asiento se mantenga horizontal todo el tiempo, la velocidad del actuador lineal tiene que ser 7.644 mm/s lo que equivaldría a un valor en el DAC de 196, ya que el valor máximo de la velocidad del actuador lineal es de 10 mm/s y el valor máximo que el DAC puede leer es de 255.

Con esta velocidad el valor final de la posición diferiría en

$$errorPosicion = altura_{deseada} - altura_{real} = 0.6779 \text{ mm}$$

Se calcula el ángulo de inclinación \emptyset que equivaldría esta diferencia de altura:

$$\emptyset = \text{atan}\left(\frac{errorPosicion}{d_{BA}}\right) = \text{atan}\left(\frac{0.6779}{170}\right) = 0.23^\circ$$

Como este ángulo de inclinación es muy pequeño, es aceptable este cálculo.

El código de la simulación realizada en Matlab se encuentra en el **Anexo F**.

4.2.7 Motores

Se seleccionó que los motores a utilizar serian 2 motores DC con eje en ángulo recto, los cuales poseen un sistema de transmisión incorporado que permiten obtener un eje rotatorio perpendicular al eje del motor. El motor seleccionado se muestra en la Figura 4.85.



Figura 4.85 Motor DC [35]

A continuación se explican el procedimiento para la selección del motor. Primeramente, se calculó el torque necesario para que la silla de ruedas se mueva considerando un caso crítico (subiendo una pendiente, acelerando y superficie con coeficiente de resistencia a la rodadura equivalente a la del barro). Luego, se calcula la potencia mecánica que requerirá la silla en este caso crítico. Finalmente, se verifica que el motor seleccionado cumpla con los requisitos de torque y potencia. Las especificaciones técnicas del motor seleccionado se muestran en la Tabla 4.15.

4.2.7.1 Verificación de torque y deslizamiento

Para el cálculo del torque se asume un caso crítico, que se dará cuando la silla de ruedas está subiendo por un camino con pendiente máxima θ y acelerando con una aceleración a . Así como, se considera una fuerza producida por la resistencia a la rodadura (F_{rr}) con un coeficiente C_{rr} equivalente a una superficie con barro. Se utilizara un factor de seguridad de 2.

El cálculo del centro de masa de la silla de ruedas se detalla en el **Anexo G**.

En la Figura 4.86 se muestra el DCL de la silla de ruedas en las condiciones mencionadas previamente.

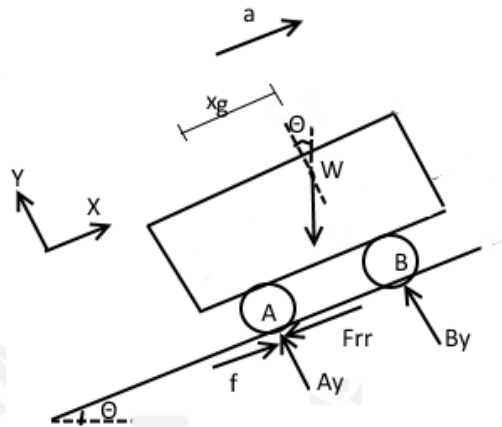


Figura 4.86 DCL Silla de ruedas

Con

$$W = m g$$

Datos:

$$m=62.44 \text{ kg}$$

$$W = 613 \text{ N}$$

$$C_{rr}= 0.022$$

$$\theta =12^\circ$$

$$a=0.5 \text{ m/s}^2$$

$$r= 0.294 \text{ m}$$

$$V_{max}= 1.5 \text{ m/s}$$

$$x_g=227.28 \text{ mm}$$

$$d_{AB}=601.73 \text{ mm}$$

$$\mu_k=0.6$$

$$n_{transmision} = 80\%$$

Se realiza una sumatoria de fuerzas en el eje X, con el fin de calcular la fuerza de fricción f .

$$\sum F_x = 0$$

$$f - F_{rr} - W \sin(\theta) = m a$$

$$f = F_{rr} + W \sin(\theta) + m a$$

Siendo F_{rr} la fuerza de resistencia a la rodadura

$$F_{rr} = C_{rr} W$$

Con C_{rr} , la constant de Resistencia a la rodadura.

Obteniendo finalmente

$$f = C_{rr} W + W \sin(\theta) + m a \quad (4.1)$$

$$f = 0.15 \cdot 612.6 + 612.6 \sin(12) + 62.4 \cdot 2$$

$$f = 172.18 \text{ N}$$

En la Figura 4.87 se muestra el DCL de las ruedas.

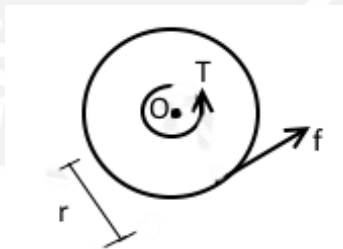


Figura 4.87 DCL rueda

Se calcula la sumatoria de momentos en el punto central O, para calcular el torque entregado por un motor T .

$$\sum M_O = 0$$

$$f = \frac{T}{r} \dots$$

$$T = f r \quad (4.2)$$

$$T = 172.1795 \cdot 0.294 = 50.62 \text{ Nm}$$

Se calcula el **torque real** que los motores deberán de entregar:

$$T_{motor} = \frac{T}{n_{transmision}} \quad (4.3)$$

$$T_{motor} = \frac{50.6208}{0.8} = 63.27 \text{ Nm}$$

Siendo $n_{transmision}$ la eficiencia de transmisión mecánica.

Este torque T_{motor} es la suma de torques en ambas ruedas. Para calcular el **torque necesario en cada rueda** T_{1motor} :

$$T_{1motor} = \frac{T_{motor}}{2} \quad (4.4)$$

$$T_{1motor} = \frac{63.2760}{2} = 31.64 \text{ Nm}$$

Adicionalmente se verificará que las **ruedas no resbalen** sobre la superficie a la determinada potencia de trabajo del motor:

En el DCL de la Figura 4.86, se calcula la sumatoria de momentos en el punto A, con el fin de calcular las fuerzas normales B_y y A_y ejercidas por el piso sobre las ruedas.

$$\sum M_A = 0$$

$$B_y d_{AB} = \sin(\theta) W x_g \dots$$

$$B_y = \frac{\sin(\theta) W x_g}{d_{AB}} \quad (4.5)$$

$$B_y = \frac{\sin(12) 613 \cdot 227.28}{601.726} = 381.2 \text{ N}$$

En el DCL de la Figura 4.86, se realiza la sumatoria de fuerzas en el eje Y.

$$\sum F_y = 0$$

$$B_y + A_y = \cos(\theta) W$$

$$A_y = \cos(\theta) W - B_y \quad (4.6)$$

$$A_y = \cos(12) 613 - 381.2 = 218.4 \text{ N}$$

La **fuerza ejercida en cada rueda** debe cumplir con la siguiente relación para que no exista deslizamiento:

$$f_1 < A_y \mu_k \quad (4.7)$$

Siendo μ_k : Coeficiente de fricción estático y f_1 la fuerza de fricción en cada rueda.

$$f_1 = \frac{f}{2} \quad (4.8)$$

$$f_1 = \frac{172.18}{2} = 86.09 \text{ N}$$

Reemplazando f_1 en la ecuación 4.7:

$$f_1 < A_y \mu_k$$

$$86.09 < 218.05$$

$$86.09 < 109.2 \text{ N (Si cumple)}$$

4.2.7.2 Verificación de la potencia eléctrica

Se selecciona una velocidad máxima V_{max} a la que la silla de ruedas se desplazara y se calcula la **velocidad angular** w con el radio de la rueda.

$$w = \frac{V_{max}}{r} \quad (4.9)$$

$$w = \frac{1.5}{0.294} = 5.102 \text{ rad/s}$$

Se calcula la **potencia mecánica**

$$P_{mecanica} = T_{1motor} w \quad (4.10)$$

$$P_{mecanica} = 31.64 \cdot 5.102 = 161.4 \text{ W}$$

Finalmente, se calcula la **potencia eléctrica**:

$$P_{electrica} = \frac{P_{mecanica}}{n_{motor}} \quad (4.11)$$

Siendo n_{motor} : eficiencia del motor

$$P_{electrica} = \frac{161.4}{0.65} = 248.33 \text{ W}$$

Verificación de potencia eléctrica

$$P_{electricaReal} > P_{electricaRequerida} \\ 350 > 248.33 \text{ W}$$

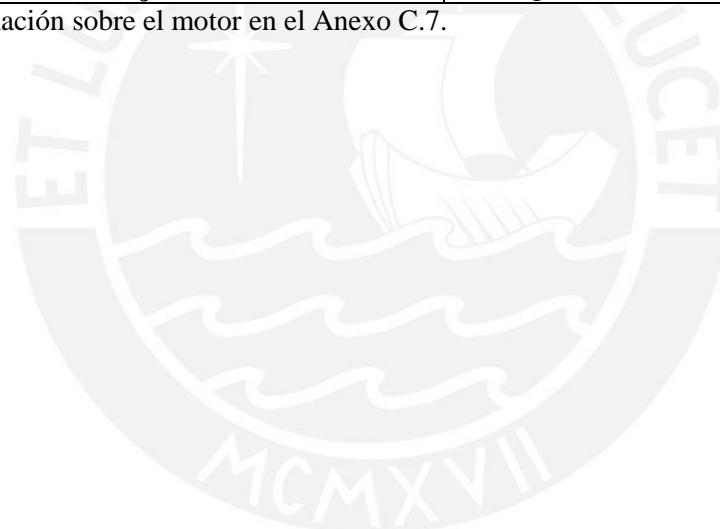
4.2.7.4 Motor seleccionado

Las especificaciones técnicas del motor seleccionado se detallan en la Tabla 4.15.

Tabla 4.14 Especificaciones técnicas del motor [35]

CARACTERÍSTICAS	VALOR
Modelo	Wheelchair Geared Motor
Marca	DYD MOTOR
Voltaje de alimentación	24 VDC
Potencia	350 W
Corriente (sin carga)	2 A
Velocidad	3800±100
Factor de reducción	32 : 1
Velocidad reducida	118 ±3
Freno	DC24V,0.5A,2NM
Eficiencia del motor	≥78%
Peso del motor	7.2kg
Peso máximo en el eje	150 kg

*Más información sobre el motor en el Anexo C.7.



4.2.8 Relés

Un relé es un dispositivo electromagnético que funciona como switch electrónico que mediante una bobina y un electroimán permite cerrar o abrir contactos que están unidos a otro circuito electrónico. El relé escogido se muestra en la Figura 4.88.

Los relés son utilizados típicamente en aplicaciones que requieren controlar circuitos de potencia con señales de baja potencia (desde microcontroladores); en nuestro caso, se aplicara para controlar el sentido de giro de los motores de los actuadores lineales mediante señales de control generadas del microcontrolador.



Figura 4.88 Relé [36]

4.2.7.1 Especificaciones técnicas

En la Tabla 4.16 se detallan las especificaciones técnicas del relé a utilizar.

Tabla 4.15 Especificaciones técnicas del relé [36]

CARACTERÍSTICAS	VALOR
Modelo	JZC-11F
Carga nominal en los contactos	30VDC 5A
Voltaje en la bobina (VDC)	12
Corriente nominal en la bobina (mA)	34.5
Resistencia de la bobina (Ω)	320

*Más información en el Anexo C.8.

4.2.7.2 Conexiones

La Figura 4.89 muestra un diagrama de los componentes internos del relé (contactores y bobina).

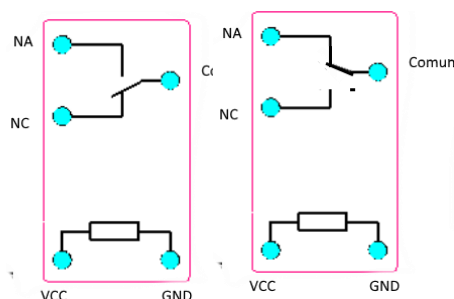


Figura 4.89 Pines del relé [36]

En la Tabla 4.17 se describen los pines del relé.

Tabla 4.16 Pines del relé [36]

PINES	DESCRIPCIÓN
VCC	Pin + para la alimentación de la bobina del relé
GND	Pin - para la alimentación de la bobina del relé
NC	Pin que se conecta a Común cuando la bobina no se encuentra alimentada. (Normalmente Cerrado)
NA	Pin que se conecta a Común cuando la bobina se encuentra alimentada. (Normalmente Abierto)
Común	Pin que se conecta a NC o NA dependiendo del estado de la bobina

4.2.8.3 Funcionamiento

Cuando la bobina del relé no está alimentado, el pin *Común* está conectado con el pin *NC*; cuando la bobina se alimenta, el contacto cambia y se conectan los pines *Común* y *NA* como se muestra en la Figura 4.89. Este comportamiento se aprovecha para encender o apagar circuitos electrónicos de potencia conectados a los pines *NC*, *NA*, *Común* mediante el prendido o apagado de la bobina.

4.2.9 Modulo Bluetooth HC-05

El modulo Bluetooth HC-05, mostrado en la Figura 4.90, es una de las piezas de mercado más económicas dedicadas a transmisión inalámbrica vía Bluetooth.

Este módulo permitirá la comunicación inalámbrica entre el microcontrolador y un dispositivo móvil (celular o Tablet). Por lo que permitirá que se ingresen los códigos de funcionamiento de la silla de forma sencilla mediante una aplicación de estos dispositivos, e hasta inclusive se podría mover la silla mediante un joystick simulado.

No se utilizara en este módulo en el programa principal, ya que la programación de aplicativos móviles va más allá de mis capacidades actuales. **Se deja como posible futura mejora.**

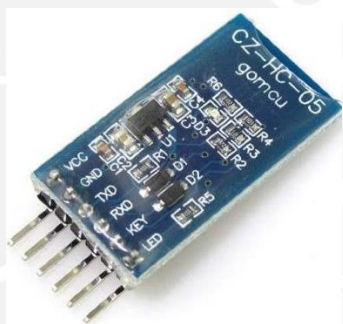


Figura 4.90 Modulo Bluetooth [37]

Las especificaciones técnicas se detallan en la Tabla 4.18.

Tabla 4.17 Especificaciones técnicas del Módulo Bluetooth [37]

CARACTERÍSTICAS	VALOR
Modelo	RB-Dfr-222
Versión Bluetooth	v2.0
Voltaje de Operación(V)	3.3
Velocidad (bps)	1200, 2400, 4800, 9600, 16200, 38400, 576000, 115200
Tamaño (mm)	28 x 15 x 2.35
Corriente de operación (mA)	40
Corriente modo de espera (mA)	<1

*Más información sobre el modulo Bluetooth en el Anexo C.9

4.2.10 Batería

La alimentación de los componentes electrónicos se realiza mediante 2 baterías de 12 Voltios conectadas en serie para obtener 24 Voltios. La selección de estas baterías se realizó calculando la carga eléctrica (Amperios hora) que requieren los motores desplazarse una distancia máxima de 10 km a una velocidad máxima de 5.4 Km/h y verificando que la batería seleccionada pueda alimentar a los motores durante el tiempo de funcionamiento deseado, este cálculo se explica a continuación.

4.2.10.1 Calculo de la carga eléctrica requerida

Se define d_{max} como distancia máxima de viaje que podrá recorrer la silla de ruedas con la batería cargada al 100% y desplazándose en la funcionalidad silla de ruedas (sin usar las otras funcionalidades) a la velocidad máxima establecida v_{max} .

$$d_{max} = 10 \text{ km}$$

$$v_{max} = 5.4 \text{ km/h}$$

En la sección 4.2.7.2 se determinó que la potencia eléctrica requerida, la cual es:

$$P_{electrica} = 248.33 \text{ W}$$

Se calcula la corriente que consumirá 1 motor:

$$P_{electrica} = V I \quad (4.11)$$

$$I = \frac{P_{electrica}}{V} \quad (4.12)$$

$$I = \frac{248.33}{24} = 10.34 \text{ A}$$

Corriente total de los 2 motores:

$$I_{total} = 2 I \quad (4.13)$$

$$I_{total} = 2 \cdot 10.34 = 20.7 \text{ A}$$

Se calcula el tiempo que tardara la silla de ruedas en desplazarse d_{max} a una velocidad v_{max} :

$$t_{max} = \frac{d_{max}}{v_{max}} \quad (4.14)$$

$$t_{max} = \frac{10}{5.4} = 1.85 \text{ h}$$

Se calcula la carga eléctrica que la batería deberá de entregar:

$$Carga_{requerida} = I_{total} t_{max} \quad (4.15)$$

$$Carga_{requerida} = 20.7 \cdot 1.85 = 38.32 \text{ Ah}$$

4.2.10.2 Batería seleccionada

Se escogió la batería UB125000 debido a la alta capacidad nominal que ofrece, al peso de esta respecto a otras baterías con capacidad nominal similar y el precio de esta. La batería se puede apreciar en la Figura 4.91.



Figura 4.91 Batería [38]

Las características de la batería seleccionada se detallan en la tabla 4.19.

Tabla 4.18 Especificaciones técnicas de la batería [38]

CARACTERÍSTICAS	VALOR
Modelo	UB12500
Marca	UPG
Voltaje nominal	12 V
Capacidad nominal (@20-hr)	50 Ah
Capacidad nominal (@5-hr)	42.5 Ah

*Más información técnica en anexo C.10

4.2.10.3 Verificación de la batería

Se calcula su **constante de Peukert** (k), según la ley de Peukert despejada para k :

$$k = \frac{\ln\left(\frac{R2}{R1}\right)}{\ln\left(\frac{C1}{R1}\right) - \ln\left(\frac{C2}{R2}\right)} \quad (4.16)$$

Con k : constante de Peukert

$C1$: Capacidad en el estado 1

$R1$: Índice de horas para $C1$

$C2$: Capacidad en el estado 2

$R2$: Índice de horas para $C2$

Datos: $C1 = 50$ Ah, $R1=20$ h, $C2 =46.5$ Ah, $R2 = 10$ h

Reemplazando los datos en la ecuación 4.16:

$$k = \frac{\ln\left(\frac{10}{20}\right)}{\ln\left(\frac{50}{20}\right) - \ln\left(\frac{46.5}{10}\right)}$$

$$k = 1.1169$$

Se calcula el **tiempo de descarga** de la batería real mediante la ley de Peukert:

$$t = H \left(\frac{C}{IH}\right)^k \quad (4.17)$$

Con H : tiempo de descarga

C : Capacidad eléctrica evaluada a tiempo H

I : Corriente de descarga a usar

k : Constante de Peukert

Datos: $H =20$ h, $C = 50$ Ah, $I = 20.7$ A, $k = 1.1169$

Reemplazando los datos en la ecuación 4.17:

$$t = H \left(\frac{C}{I H} \right)^k$$
$$t = 20 \left(\frac{50}{20.7 \cdot 20} \right)^{1.1169} = 1.88 \text{ h}$$

Finalmente, se calcula la carga eléctrica que la batería puede entregar:

$$Carga_{bateria} = I t \quad (4.18)$$

$$Carga_{bateria} = 20.7 \cdot 1.88 = 39.05 \text{ Ah}$$

Para garantizar el correcto funcionamiento se debe verificar que cumpla con la ecuación 4.19.

$$Carga_{bateria} > Carga_{requerida} \quad (4.19)$$

$$39.05 > 38.32 \text{ (Si cumple).}$$

La carga eléctrica que la batería seleccionada puede entregar se encuentra casi en el límite establecido por la ecuación 4.19, pero esto no representa problema alguno con el diseño debido a que se utilizó un factor de seguridad 2 en el peso del usuario para los cálculos previamente realizados.

4.3 Diagrama de flujo de programa

A continuación se explica mediante diagramas de flujos el funcionamiento del programa que se ejecutará en el microcontrolador Arduino 2560. Para una mejor visualización de estos diagramas de flujo revisar el **Anexo D**; así como para el código del programa en lenguaje C se detalla en el **Anexo E**.

4.3.1 Función *Principal*

El diagrama de flujo de la función *Principal* se aprecia en la Figura 4.92. La función *Principal*, llamada de esta forma debido a que es la función que se inicia al encender el microcontrolador, comienza con la Inicialización de todas las variables a utilizar, luego configura el Timer 1 para que genere una interrupción cada 20 ms mediante la función *ConfigurarTimer1*. A continuación configura la pantalla LCD y el joystick; luego, activa las interrupciones y finalmente, llama a la función *Loop ()*, que es un lazo infinito.

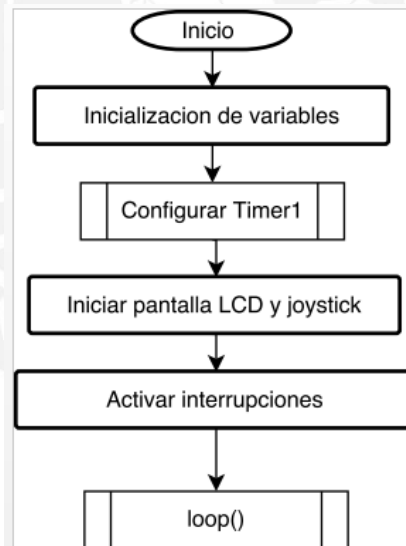


Figura 4.92 Diagrama de flujo - Función Principal

4.3.2 Función *Loop*

El diagrama de flujo de la función *Loop* se aprecia en la Figura 4.93. Este lazo infinito comienza verificando que las entradas (joystick, teclado y comunicación bluetooth) estén habilitadas. De estar habilitadas las entradas, verifica si se presionó alguna tecla y llama a la función *TeclaPresionada* de ser este el caso, sino, verifica si se recibió data por bluetooth. Finalmente se leen los valores de la posición del joystick.

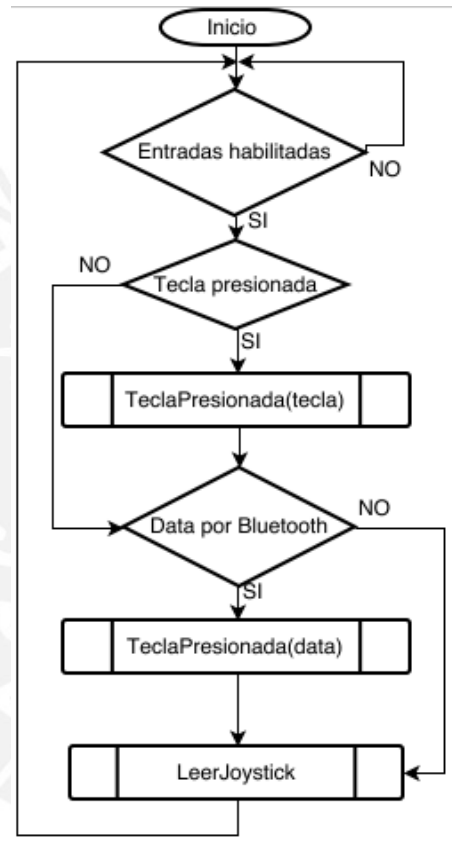


Figura 4.93 Diagrama de flujo - Función *Loop*

4.3.3 Función *TeclaPresionada*

El diagrama de flujo de la función *TeclaPresionada* se aprecia en la Figura 4.94. La función *TeclaPresionada* verifica que tecla fue la que se presionó; si se presionaron los números, se concatena este a la variable *código* y se muestra este código. Si se presiona “*” significa que se desea ingresar el código, por lo que se verifica que se esté ingresando algún código y de ser este el caso se muestra un texto y se llama a la función *IngresoCodigo*. Si se presiona “#” significa que se desea resetear el código, por lo que se receta la variable *código* y se muestra un texto.

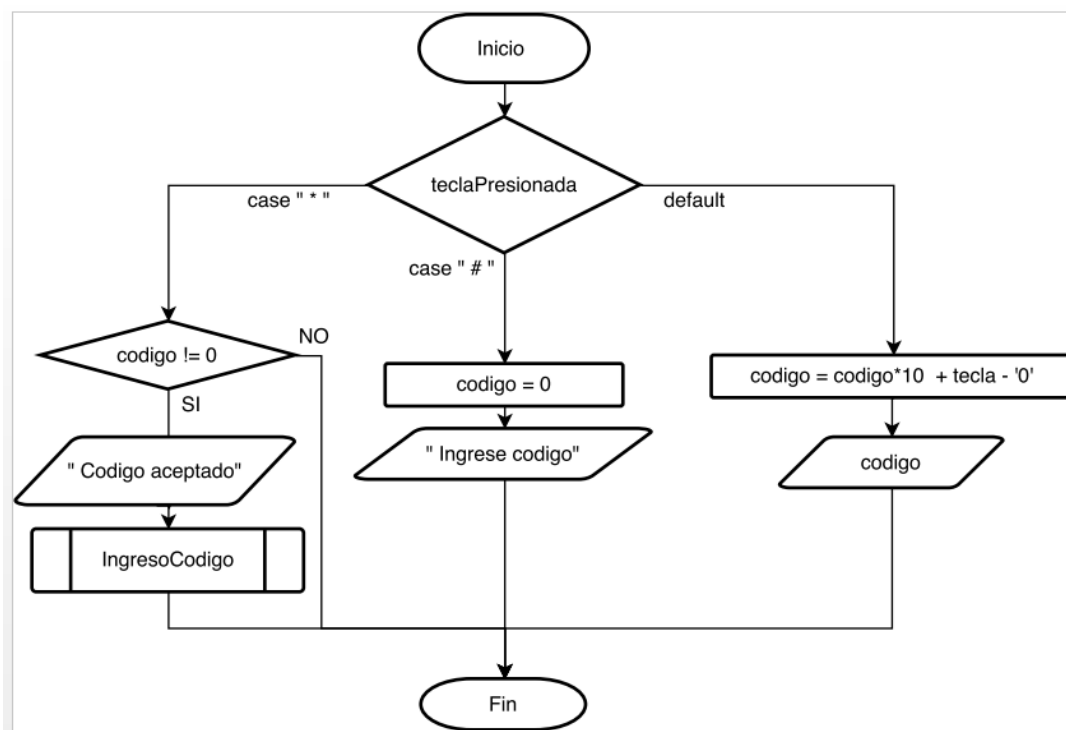


Figura 4.94 Diagrama de flujo - Función *TeclaPresionada*

4.3.4 Función *IngresoCodigo*

Primero se verifica que funcionalidad es la que se desea utilizar:

- Desplazamiento: Verifica que el desplazamiento sea posible con la función `VerificarCondicionesDesplazamiento`. Se calcula el sentido de giro deseado de los motores y la velocidad deseada.
- Silla de ruedas, Camilla y Bipedestación: Según sea el estado en el que se encuentre la silla de ruedas habilita los actuadores lineales correspondientes y establece las posiciones finales de estos.
- Ajuste del espaldar: Habilita el actuador lineal necesario para este movimiento y establece sus posiciones máximas y mínimas.
- Ajuste del apoyapié: Habilita el actuador lineal necesario para este movimiento y establece sus posiciones máximas y mínimas.
- Ajuste de la inclinación asiento: Habilita el actuador lineal necesario para este movimiento y establece sus posiciones máximas y mínimas.
- Elevación del asiento: Habilita los actuadores l necesarios para este movimiento y establece sus posiciones máximas y mínimas. Desactiva las entradas
- Bajar el asiento: Habilita los actuadores l necesarios para este movimiento y establece sus posiciones máximas y mínimas. Desactiva las entradas

Luego, para cada actuador habilitado verifica el sentido del movimiento que requiere para alcanzar la posición final.

No se incluye el diagrama de flujo de esta función en este documento debido al gran tamaño de este diagrama. El diagrama de flujo se encuentra en el **Anexo D.4**

4.3.5 Función *VerificarCondicionesDesplazamiento*

El diagrama de flujo de la función *VerificarCondicionesDesplazamiento* se aprecia en la Figura 4.95. Esta función verifica que se cumplan que el ángulo de inclinación del espaldar menor a 45°, de no cumplirse este requisito no se habilita el movimiento. Si es que si se cumple este requisito, se verifica la altura a la que se encuentra el asiento, si el asiento esta elevado se reduce la velocidad máxima de la silla y se muestra un mensaje.

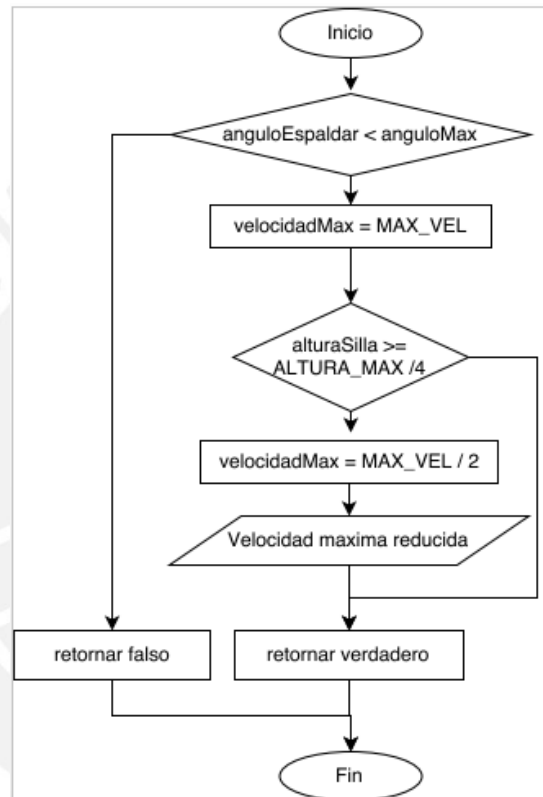


Figura 4.95 Diagrama de flujo - Función *VerificarCondicionesDesplazamiento*

4.3.6 Función *Movimiento*

Función encargada del movimiento de los actuadores. Según sea el tipo de actuador, funciona de la siguiente manera:

Motores: Verifica que el movimiento del joystick este dentro de un valor mínimo. Asigna valores a las variables *MotorDerecho* y *MotorIzquierdo*, se asignan los sentidos de giro según los valores de estas variables y se activan los motores.

Actuadores lineales: Para cada actuador lineal se verifica que este habilitado. Si están habilitados, se verifica en que función se encuentra la silla:

- Elevación de la silla: Solo para el actuador lineal 3. Se verifica que no se haya llegado a la posición máxima; si ya se llegó a esta posición, se desactiva el actuador. Se habilitan las entradas y dependiendo del caso se cambia el estado de la silla.
- Bajar la silla: Solo para el actuador lineal 3. Se verifica que no se haya llegado a la posición mínima, si ya se llegó a esta posición se desactiva el actuador. Se habilitan las entradas y dependiendo del caso se cambia el estado de la silla.
- Otro: Compara la posición actual del actuador con la posición máxima o mínima permitida, si está dentro del rango permisible se activa el actuador, si no se desactiva.

En caso todos los actuadores estén deshabilitados, significa que la silla llego a la posición final requerida, por lo que según la funcionalidad actual y la funcionalidad que se requiera se cambia el estado de la silla de ruedas.

Se bloquea el uso de los motores cuando algún actuador lineal esté activo.

No se incluye el diagrama de flujo de esta función en este documento debido al gran tamaño de este diagrama. El diagrama de flujo se encuentra en el **Anexo D.7**

4.3.7 Función *ArrancarMotor*

El diagrama de flujo de la función *ArrancarMotor* se aprecia en la Figura 4.96. La función *ArrancarMotor* comienza calculando la velocidad actual del motor mediante la función *CalculoVelocidad*. A continuación, establece los valores de los pines A/B según el sentido de giro deseado. Luego, calcula la velocidad deseada normalizando el valor leído del joystick y multiplicándolo por la velocidad máxima de la silla de ruedas. Luego llama a la función *PID* para que calcule los ciclos de trabajo de las ondas PWM. Finalmente se asignan los valores de salida en los pines A/B.

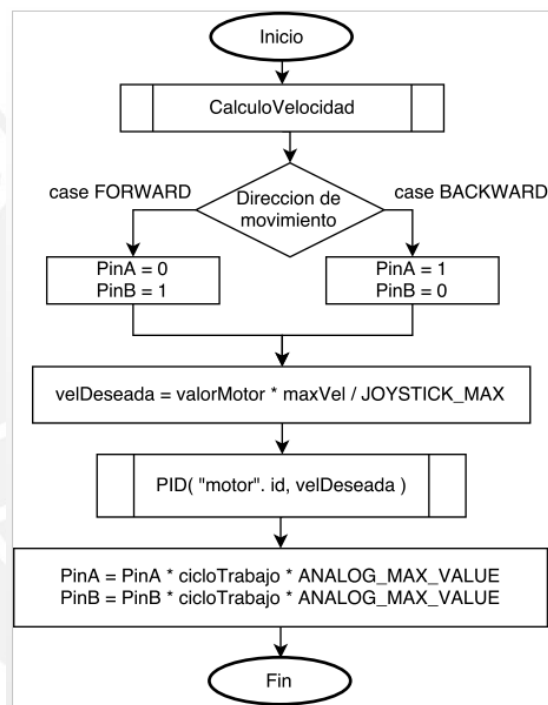


Figura 4.96 Diagrama de flujo - Función *ArrancarMotor*

4.3.8 Función *CalculoVelocidad*

El diagrama de flujo de la función *CalculoVelocidad* se aprecia en la Figura 4.97. Esta función realiza el cálculo de la velocidad actual del motor, mediante el uso del valor leído por su Encoder. Más detalles sobre este cálculo en la sección 5.1.4.

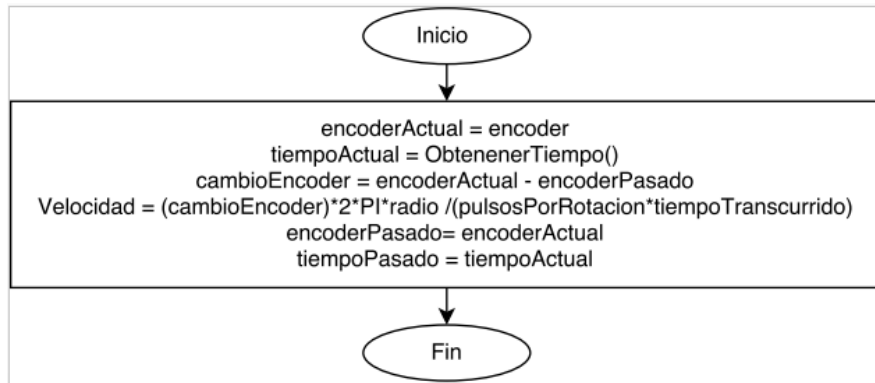


Figura 4.97 Diagrama de flujo - Función CalculoVelocidad

4.3.9 Función PID

El diagrama de flujo de la función *PID* se aprecia en la Figura 4.98. El algoritmo PID calcula el error en la velocidad, calcula los valores proporcional, integral y derivativo y finalmente calcula el ciclo de trabajo.

Más información acerca del algoritmo de control PID en la sección 5.1.1

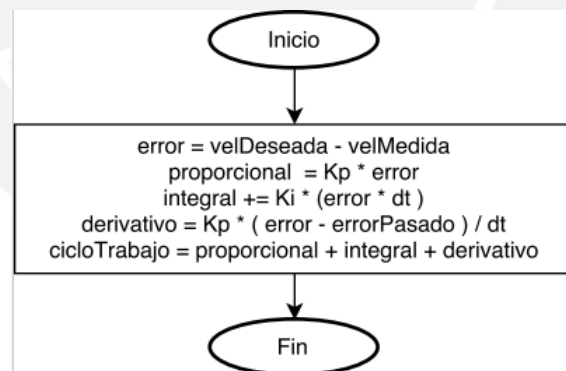


Figura 4.98 Diagrama de flujo - Función PID

4.3.10 Función ArrancarActuador

El diagrama de flujo de la función *ArrancarActuador* se aprecia en la Figura 4.99. La función arrancar actuador comienza verificando si el actuador lineal está habilitado, luego asigna valores a los pines A/B según el sentido de movimiento requerido.

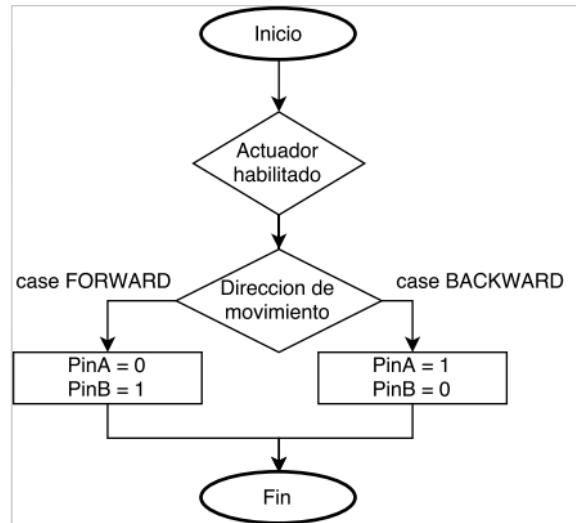


Figura 4.99 Diagrama de flujo - Función ArrancarActuador

4.3.11 Función *DetenerActuador*

El diagrama de flujo de la función *DetenerActuador* se aprecia en la Figura 4.100. Función que detiene los actuadores (motores o actuadores lineales) asignando 0 a los pines A/B del actuador correspondiente. En la sección V se detalla el control de los motores mediante los pines A/B.

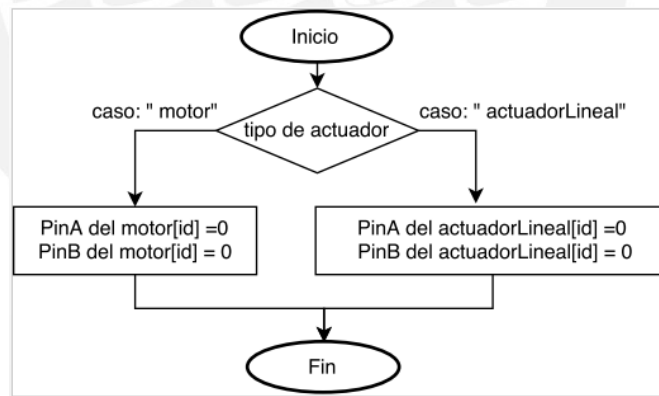


Figura 4.100 Diagrama de flujo - Función DetenerActuador

4.3.12 Función *InterrupcionTimer1*

El diagrama de flujo de la función *InterrupcionTimer1* se aprecia en la Figura 4.101. Esta función se activa cada vez que el timer1 cuenta hasta 20ms. Se llama a la función

Movimiento, encargada de realizar el movimiento de los actuadores, y posteriormente verifica si es que ya pasaron 0.2 segundos para leer los sensores de los actuadores lineales.

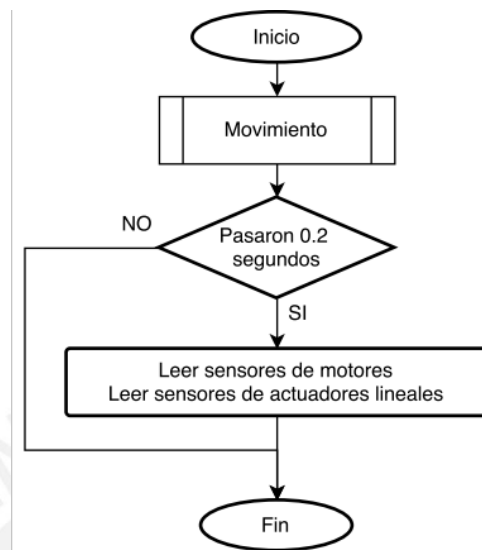


Figura 4.101 Diagrama de flujo - Función InterrupcionTimer1



CAPITULO 5

SISTEMA DE CONTROL

En el presente capítulo se detalla el control que se aplicarán a los motores; así como, el control que se aplicara a los actuadores lineales.

5.1 Control de los motores

El control de los motores se realizara según el diagrama mostrado en la Figura 5.102, en el cual se busca el **control de la velocidad** de estos. La lógica de funcionamiento se explica a continuación:

- Mediante el joystick, se define una velocidad angular a la que se deben de mover los motores y el sentido de giro.
- Se calcula el error entre esta velocidad deseada y la real medida mediante un sensor.
- Este error se ingresa al algoritmo PID, el cual calculará el ciclo de trabajo de la onda PWM.
- Se ingresa la onda PWM y el sentido de giro hacia el puente H que se encargara de controlar al motor.

En la siguiente sección se explican estos bloques a más detalle.

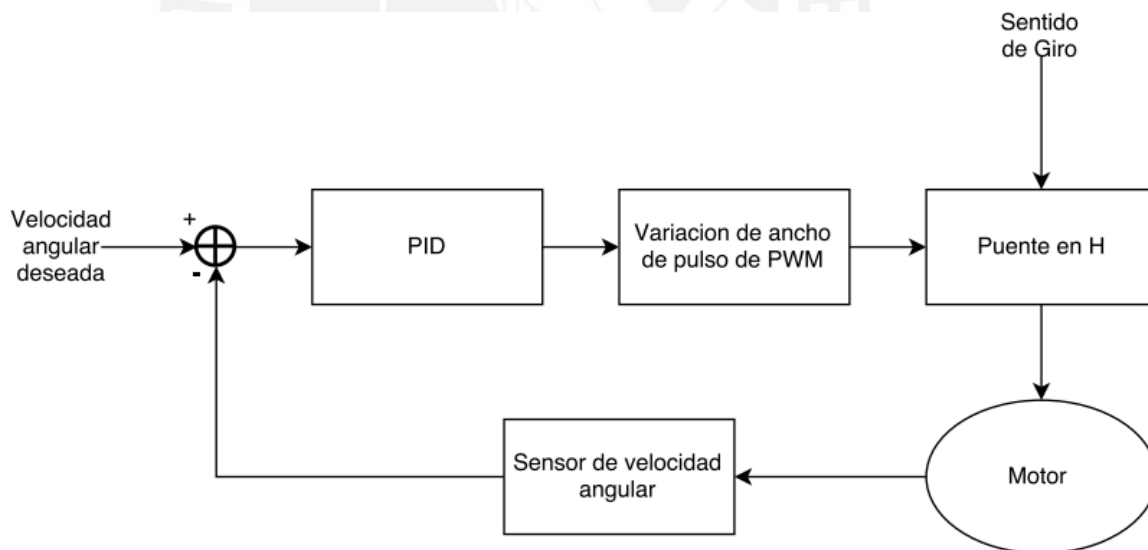


Figura 5.102 Bloque de control de los motores

5.1.1 Controlador PID

Se utilizará el algoritmo PID discreto, explicado en la sección 1.2.3.5, para generar la señal de control a partir del error generado entre el valor de la velocidad deseada y la velocidad real.

Este algoritmo permitirá variar el valor del ciclo de trabajo de la onda PWM según sea el error actual en la velocidad del motor respectivo.

5.1.2 Puente en H

El puente H cumplirá con la función de controlar el sentido de giro; así como de la velocidad del motor correspondiente. En la Figura 5.103 se muestra el esquemático del puente H utilizado.

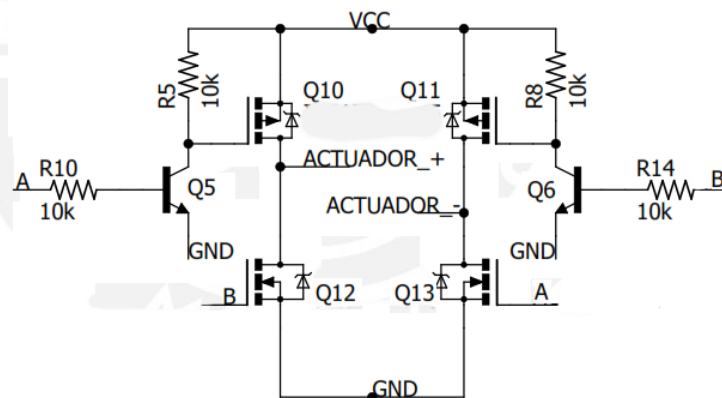


Figura 5.103 Puente H- Diagrama Esquemático

El puente H está conformado por las siguientes componentes:

- 2 transistores MOSFET canal P(Q10, Q11)
- 2 transistores MOSFET canal N(Q12, Q13)
- 2 transistores BJT (Q5, Q6)
- 4 resistencias de 10k
- 4 diodos (los MOSFET escogidos tienen estos diodos internamente)

5.1.2.1 Funcionamiento:

Se utilizarán los transistores mostrados como switches digitales, por lo que solo podrán tener 2 estados, abierto (circuito abierto entre 2 terminales correspondientes) o cerrado (circuito cerrado entre 2 terminales correspondientes).

Según sean las señales de control A y B, los transistores funcionarán como circuitos abiertos/cerrados para lograr detener, girar en sentido horario o antihorario. En la Tabla 5.20 se detallan los valores que pueden tomar las señales de control A/B; así como los estados de cada transistor.

Tabla 5.19 Control del Puento H

A	B	Q5	Q6	Q10	Q11	Q12	Q13	ESTADO
0	0	abierto	abierto	abierto	abierto	abierto	abierto	Parado
0	1	abierto	cerrado	abierto	cerrado	abierto	cerrado	Giro antihorario
1	0	cerrado	abierto	cerrado	abierto	cerrado	abierto	Giro horario
1	1	cerrado	cerrado	cerrado	cerrado	cerrado	cerrado	Prohibido

5.1.3 Modulación del ancho de pulso (PWM)

Las modulación del ancho de pulso (pulse-width modulation) se realiza utilizando ondas cuadráticas periódicas a las cuales se modifica el ciclo de trabajo (tiempo en alta de la señal) para transmitir información o controlar la cantidad de energía que se envía a una carga; en nuestro caso, se tratara de controlar la cantidad de energía enviada a los actuadores, con el fin de variar y controlar la velocidad de este.

En la Figura 5.104 se muestra una onda cuadrada de periodo T, y ciclo de trabajo D.

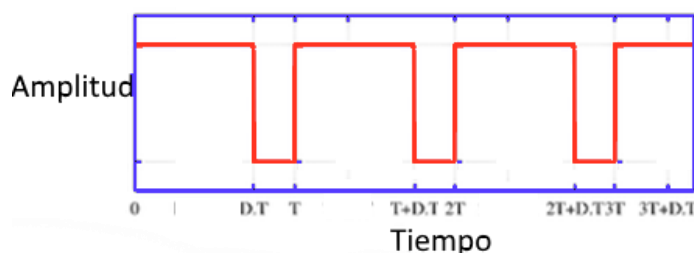


Figura 5.104 Onda PWM

5.1.4 Sensor de velocidad angular: Encoder incremental

El Encoder incremental es un transductor que permite transformar un movimiento rotacional en una señal digital cuyos pulsos son proporcionales a la velocidad angular del eje.

El Encoder incremental proporciona 2 señales A y B, desfasadas en 90. Basta con leer una señal para obtener la velocidad angular, pero se deben utilizar las 2 señales para también obtener el sentido de giro.

En la Tabla 5.21 se detallan las características del Encoder seleccionado.

Tabla 5.20 Especificaciones del encoder incremental

CARACTERÍSTICAS	VALOR
Modelo	E6A2-CW3C
Voltaje de Operación(V)	5-12
Velocidad máxima(rpm)	5000
Pulsos por Revolución	200

5.1.4.1 Calculo de la velocidad

El cálculo de la velocidad de los motores a partir de la medida que entrega este sensor se realiza mediante la siguiente formula:

$$\text{velocidad} = \frac{\text{distancia}}{\Delta t}$$

Siendo la variable *distancia* definida de la siguiente manera:

$$\text{distancia} = \frac{\text{pulsos} \cdot \text{distanciaPorRevolucion}}{\text{pulsosPorRevolucion}}$$

Siendo la *distanciaPorRevolucion* definida según:

$$\text{distanciaPorRevolucion} = 2 \pi \text{radio}_{\text{rueda}}$$

Y los *pulsosPorRevolucion* es una característica propia del sensor escogido.

5.2 Control de los actuadores lineales

El control de los actuadores lineales se realizara según el diagrama mostrado en la Figura 5.105, en el cual se **controlara la posición** del vástago del actuador lineal. La lógica de funcionamiento se explica a continuación.

- Se detecta el sentido de movimiento según sea el tipo de movimiento programado.
- Se calcula el error entre esta posición deseada y la real medida mediante un sensor incorporado en el actuador lineal. Si el error es positivo, significa que aún no llego a la posición máxima por lo que se habilita el movimiento del actuador lineal. Con el sentido de movimiento (joystick) y el habilitador; mediante el circuito de potencia se controla al actuador lineal.

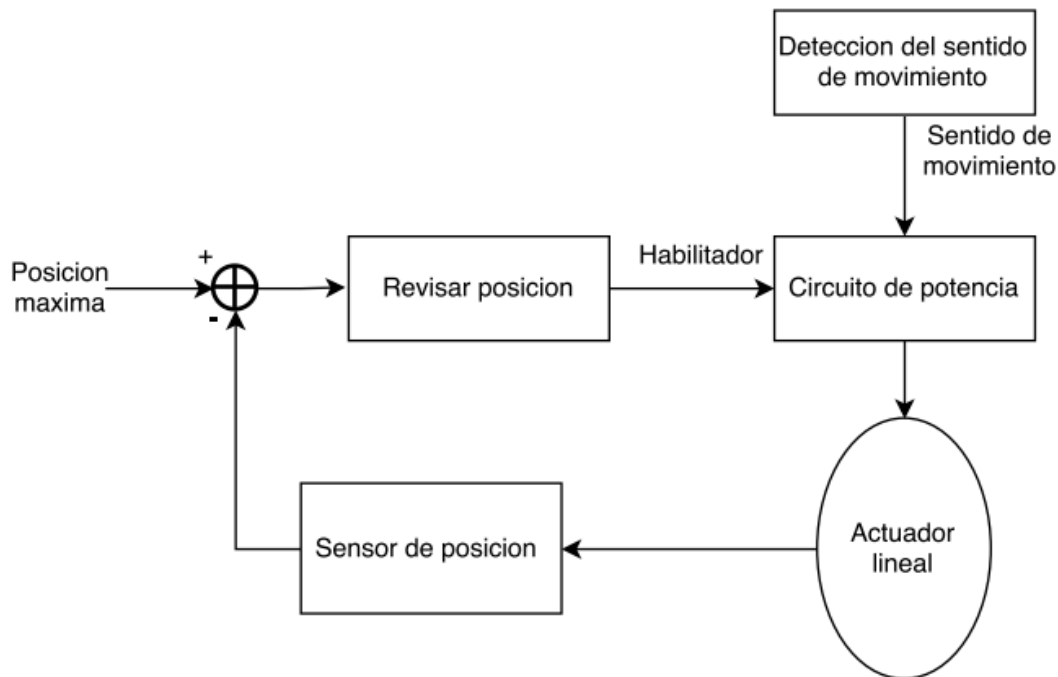


Figura 5.105 Bloque de control de los actuadores lineales

En la siguiente sección se explican estos bloques a más detalle.

5.2.1 Detección del sentido de movimiento

Se detecta el sentido de movimiento dependiendo de la forma de movimiento que se requiera.

5.2.1.1 Movimiento automático:

Según sea la función que se desee utilizar en la silla de ruedas, se obtiene el sentido de movimiento que requiere el actuador lineal y a partir de este se define la posición máxima del actuador lineal determinado.

5.2.1.2 Movimiento manual:

Mediante el joystick, se obtiene el sentido de movimiento deseado y a partir de este se define la posición máxima del actuador lineal determinado.

5.2.2 Revisar posición

Se verifica que el actuador lineal no haya llegado a una posición máxima o mínima, verificando que apenas el error sea igual a 0 se deshabilita la alimentación del actuador lineal. Si el error es mayor a 0, se habilita la alimentación al actuador lineal mediante el circuito de potencia.

5.2.3 Circuito de potencia

Se utiliza relés para separar la parte de potencia con las señales de control como se muestra en la Figura 5.106. Este circuito permitirá controlar el sentido de movimiento del actuador lineal.

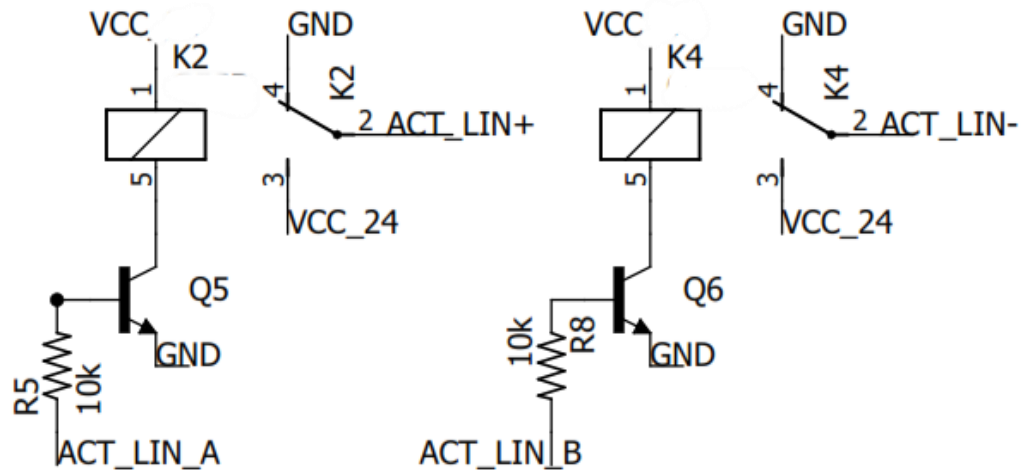


Figura 5.106 Control por relés- Diagrama Esquemático

Este circuito está conformado por las siguientes componentes:

- 2 relés SPDT(Single Pole Double Throw)
- 2 transistores BJT canal N
- 2 resistencias de 10k Ω

5.2.3.1 Funcionamiento:

Se utilizarán los transistores mostrados como switches digitales, por lo que solo podrán tener 2 estados, corte (circuito abierto entre 2 terminales correspondientes) o saturado (circuito cerrado entre 2 terminales correspondientes).

Según sean los valores de las señales de control A y B, los transistores funcionarán como circuitos abiertos/cerrados para lograr detener, girar en sentido horario o antihorario. En la Tabla 5.22 se detallan los valores que pueden tomar las señales de control A/B; así como los estados de cada transistor.

Tabla 5.21 Control del Puento H

A	B	TRANSISTORES		RELÉS		VOLTAJE		Estado
		Q5	Q6	K2	K4	ACT+	ACT-	
0	0	abierto	abierto	No funciona	No funciona	GND	GND	Parado
0	1	abierto	cerrado	No funciona	energizado	GND	24V	Hacia adelante
1	0	cerrado	abierto	energizado	No funciona	24V	GND	Hacia atrás
1	1	cerrado	cerrado	energizado	energizado	24V	24V	Prohibido

5.2.4 Sensor de posición: Potenciómetro lineal

Los potenciómetros lineales son dispositivos electrónicos capaces de variar la resistencia entre 2 de sus 3 terminales dependiendo del desplazamiento lineal generando un divisor de voltaje. Para medir el valor deseado, simplemente se conectan 2 de sus pines extremos a 5voltios/ tierra y el pin variante se conecta al ADC del microcontrolador (Figura 5.107) con lo que se obtiene una señal analógica entre 0-5 Voltios cuyo valor mínimo equivaldrá a la posición mínima del actuador y el valor máximo, a la máxima posición.

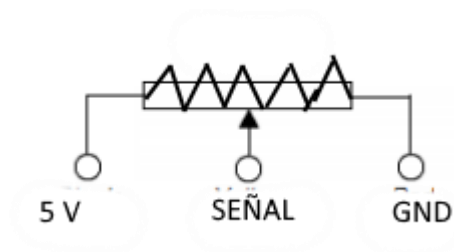
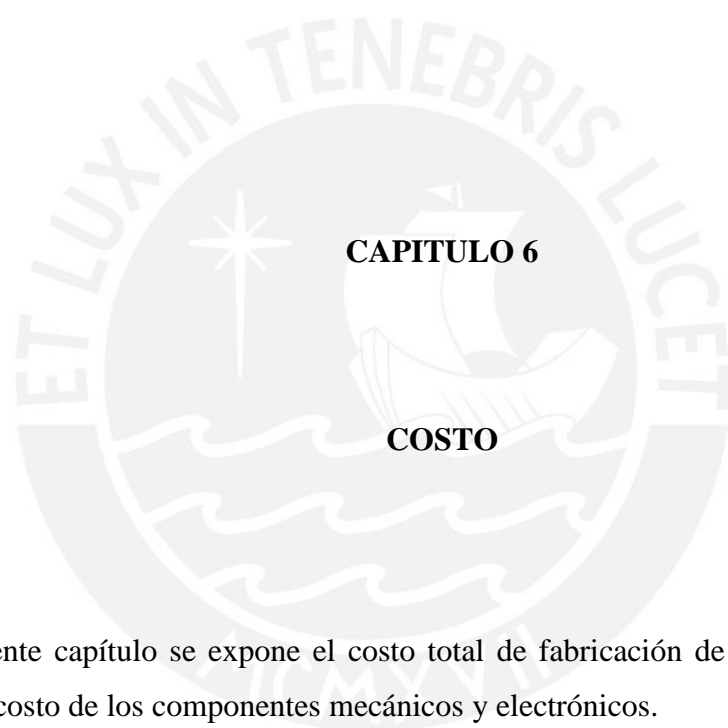


Figura 5.107 Sensor de posición – Conexiones

Este tipo de sensores se utilizan para medir la posición de los actuadores lineales (Figura 5.108) que en el caso de los de marca LINAK, vienen incorporados y en el caso de los de marca FIRGELLI se comprarán y acoplarán.



Figura 5.108 Sensor de posición – potenciometro lineal



CAPITULO 6

COSTO

En el presente capítulo se expone el costo total de fabricación de la silla de ruedas y se detallan el costo de los componentes mecánicos y electrónicos.

6.1 Costo total

En la Tabla 6.23 se detalla el costo estimado de la fabricación de la silla de ruedas mecatrónica multifuncional diseñada en esta tesis. En las Tablas 6.24 y 6.25 se presentan los precios de los componentes que forman la parte mecánica y electrónica de una forma más detallada.

Tabla 6.22 Costo total de la silla

Componente	Costo (S./)
Parte Mecanica	2051
Parte Electronica	5144
Total	7195

6.2 Parte electrónica

Tabla 6.23 Costo de la parte electronica

Nombre	Modelo	Cantidad	Precio Unitario (\$)	Precio Unitario (S./)	Precio total (S./)	
Arduino Mega	2560	1		55	55	
Regulador de voltaje	RB-Dfr-222	1	8.5	28.475	28.5	
Teclado Matricial		1		20	20	
Pantalla LCD	2x16	1		12	12	
Joystick	TY201B-M4	1	20	67	67	
Rele	JZC-11F	6		1.5	9	
Modulo bluetooth	HC-05	1		20	20	
Transistor BJT	2n3904	8		0.2	1.6	
Transistor MOSFET N	IRL540	6		2.5	15	
Transistor MOSFET P	IRF9Z30	6	6	20	120	
Resistencias 1/4 W	10K	18		0	1	
Borneras de tornillo	2 pines	25		0.3	7.5	
Espadines	18x2 pines	32		0.025	0.8	
Espadines	10 pines	10		0.025	0.3	
Espadines	8 pines	8		0.025	0.2	
Bateria	UB12500	2	85	285	570	
Actuador lineal	LA23-100	1	200	670	670	
Actuador lineal	LA23-150	1	200	670	670	
Actuador lineal	FA-400-12	1	130	436	436	
Actuador lineal	FA-400-12	1	130	436	436	
Potenciómetro lineal		2	99	332	664	
Motor electrico	Wheelchair Geared Motor	2	200	670	1340	
					5144	TOTAL

6.3 Parte mecánica

Tabla 6.24 Costo de la parte mecánica

Ensamble	Parte		Tamaño	Cantidad	Unidad de medida	Precio (unidad de material) [S./]	Piezas	Precio Material [S./]	Precio Mano de obra (S./)	
estructura	Pata trasera	Tubo cuadrado	25 x 25 x 1.5 mm	901	mm	0.01241	2	22.36	120	
	Pata frontal	Tubo cuadrado	25 x 25 x 1.5 mm	1112	mm	0.01241	2	27.6	110	
	Transversal	Tubo cuadrado	25 x 25 x 1.5 mm	422	mm	0.01241	3	15.71	90	
		Plancha	71 x 25 x 3 mm	1809	mm ²	0.00021	6	2.3		
	Rueda delantera		6"	1	pieza	40	2	80		
	Rueda trasera		4.1"x 3.5"-5	1	pieza	165	2	330		
	Corredera		1	1	pieza	50	2	100		
	Transversal AL 3	Tubo rectangular	25 x 50 x 1.5 mm	422	mm	0.01873	1	7.91	30	
		Plancha	71.2 x 25 x 3 mm	1809	mm ²	0.00021	2	0.77		
	Transversal AL4	Tubo rectangular	30 x 60 x 1.5 mm	422	mm	0.02264	1	9.56	35	
		Plancha	111.4 x 25 x 3	2830	mm ²	0.00021	2	1.2		
	asiento	Asiento	Tubo cuadrado	1.5 mm espesor	1574	mm	0.01241	1	19.53	90
Orejas cuadradas		Plancha	3 mm epesor	735	mm ²	0.00021	4	0.62		
Almohadilla gluteos				1	pieza	120	1	120		
espaldar	Cabezera	Tubo cuadrado	25 x 25 x 1.5 mm	172	mm	0.01241	2	4.27	20	
	Respaldar	Tubo cuadrado	25 x 25 x 1.5 mm	1321	mm	0.01241	1	16.39	60	
	Almohadilla cabeza			1	pieza	50	1	50		
	Almohadilla espaldar			1	pieza	150	1	150		
	Apoyabrazo	Tubo cuadrado	12 x 12 x 1.5 mm	500	mm	0.0085	1	4.25	20	
apoyapie	Apoyapie	Tubo cuadrado	25 x 25 x 1.5 mm	1039	mm	0.01241	1	12.89	60	
	Almohadilla apoyapie			1	pieza	80	2	160		
caja electronica	Base	Plancha	1.5 mm espesor	293122	mm ²	0.00011	1	31.09	150	
	Lateral L	Plancha	1.5 mm espesor	118271	mm ²	0.00011	1	12.55	60	
	Lateral	Plancha	1.5 mm espesor	68691	mm ²	0.00021	1	14.57	40	
								1166.45	885	
									2051	TOTAL

RESULTADOS Y OBSERVACIONES

RESULTADOS

La presente tesis se realizó con el fin de ofrecer un equipamiento para mejorar la calidad de vida de niños entre 6-12 años que padezcan con el síndrome de Distrofia Muscular de Duchenne mediante el diseño de una silla de ruedas mecatrónica multifuncional que ofrezca las funcionalidades de silla de ruedas, camilla y bipedestación; así como, para desarrollar una investigación en el diseño de sillas de ruedas mecatrónicas multifuncionales para el público en general. Para el diseño de la parte mecánica, nos basamos en un trabajo previo realizado por R. Furukawa, D. Elías y T. Tabuchi [2], reutilizando o modificando algunos componentes mecánicos. Las características técnicas obtenidas de esta silla de ruedas mecatrónica multifuncional se detallan en la Tabla 7.26.

Tabla 7.25 Especificaciones técnicas de la silla de ruedas

CARACTERÍSTICA	VALOR
Peso usuario[kg]	20
Peso Silla[kg]	30
Dimensiones[mm]	866x746x1237
Funcionalidades	Silla de ruedas, camilla y bipedestación
Batería	2 x 50 Ah(@20hr)
Controlador	Arduino Mega 2560
Velocidad[km/h]	5.4
Distancia máxima [km]	10
Pendiente máxima[grados]	12

Siguiendo con la recomendación VID das , se obtuvieron 3 conceptos de solución, para finalmente utilizar el concepto de solución 1, explicado en la sección 2.4.1, el cual utiliza 4 actuadores lineales para realizar los cambios de posiciones de sus componentes con el fin de posicionar a la silla en la funcionalidad deseada. Adicionalmente, el desplazamiento de la silla de ruedas se realiza mediante el uso de 2 motores de 350 kW, ubicados en la parte trasera de la estructura.

La silla de ruedas será controlada por el microcontrolador Arduino Mega 2560 y el desplazamiento y cambios de funcionalidades se realizarán mediante un joystick ubicado en el apoyabrazo y las diferentes funcionalidades se seleccionarán mediante un teclado matricial y una pantalla LCD. Mediante el teclado matricial, se ingresarán códigos predefinidos para cada funcionalidad, la pantalla LCD servirá para verificar los códigos ingresados; así como para mostrar mensajes al usuario.

Si se desea realizar un desplazamiento de la silla, mediante el joystick se obtendrá la dirección y velocidad deseada. Si se desea cambiar la inclinación de algún componente o altura, se definió que el movimiento hacia adelante del joystick activara los actuadores lineales de tal forma que permita a la silla posicionarse en la funcionalidad deseada. De la misma forma, un movimiento hacia atrás del joystick permitirá a la silla posicionarse en la funcionalidad inicial previo al ingreso del código. Por ejemplo, si la silla se encuentra en la funcionalidad silla de ruedas y se desea posicionarla en forma camilla, luego de ingresar el respectivo código mediante el teclado, si se mueve el joystick hacia adelante, el espaldar y el apoyapié empezarán a girar hasta que se encuentren en una posición horizontal respecto al asiento.

Debido al posicionamiento y mecanismos para la realización de estos giros, se deberá de tener en cuenta la forma en que los actuadores lineales se encuentran distribuidos en la silla de ruedas. Por ejemplo, el actuador lineal encargado del giro del espaldar deberá de contraerse para llegar a la posición camilla; en cambio el actuador encargado del giro del apoyapié deberá de expandirse. La distribución de los actuadores lineales se tomara en cuenta al momento del diseño del programa encargado de controlar la silla de ruedas.

RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DEL PROGRAMA

Se realizó una simulación del programa a utilizar en el microcontrolador Arduino Mega2560 mediante el software Proteus 8 Profesional. Este software permite la simulación de circuitos electrónicos desde un computador, permitiendo así utilizar la gran mayoría de componentes que nuestra aplicación requiere con el fin de verificar el correcto funcionamiento del programa realizado.

Este software permite realizar el diagrama esquemático de la tarjeta electrónica, en el cual se conectan todos los componentes electrónicos (microcontrolador, teclado matricial, pantalla LCD, etc.); así como, permite simular el comportamiento de todos estos componentes. Para demostrar que el software está funcionando correctamente se utilizó un terminal virtual el cual estará conectado de forma serial al microcontrolador y mediante el cual se mostrarán los valores de las variables requeridas para verificar el correcto funcionamiento del programa.

Estas simulaciones se pueden encontrar en el **Anexo H. Simulaciones.**

Nombre de Carpeta: H. Simulaciones.

Software: Proteus 8 Profesional.

Los componentes a utilizar son los siguientes: Teclado matricial, pantalla LCD, fuente de alimentación, potenciómetros, puente en H, Encoder y Arduino Mega 2560, los cuales se muestran en las Figura 6.109 y Figura 6.110.

Se realizaron simulaciones para la verificación del uso del joystick, ingreso de códigos por el teclado matricial, movimiento de los actuadores lineales y la activación de los motores mediante el joystick. Para cada una de estas simulaciones, se detallan los componentes que forman parte de la simulación y se describe cual fue el procedimiento realizado para la simulación respectiva. A continuación se explican estas simulaciones mencionadas.

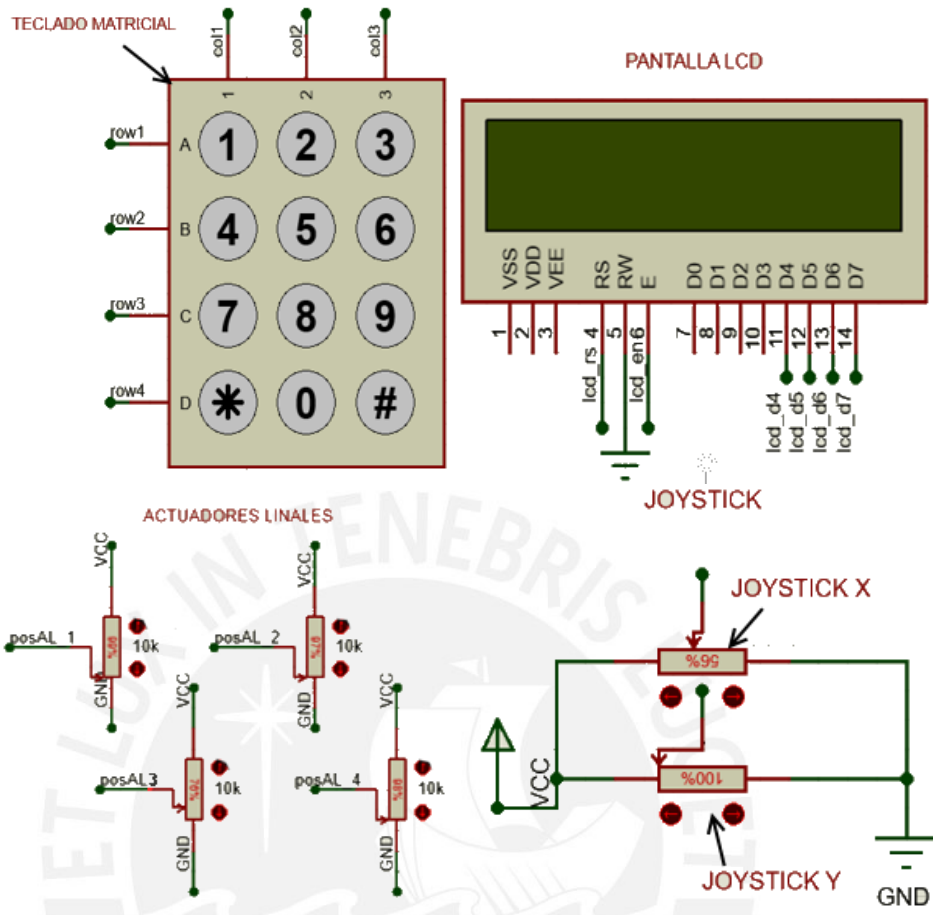


Figura 6.109 Simulación (a) Teclado matricial (b) Pantalla LCD (c) Actuadores lineales (d) Joystick

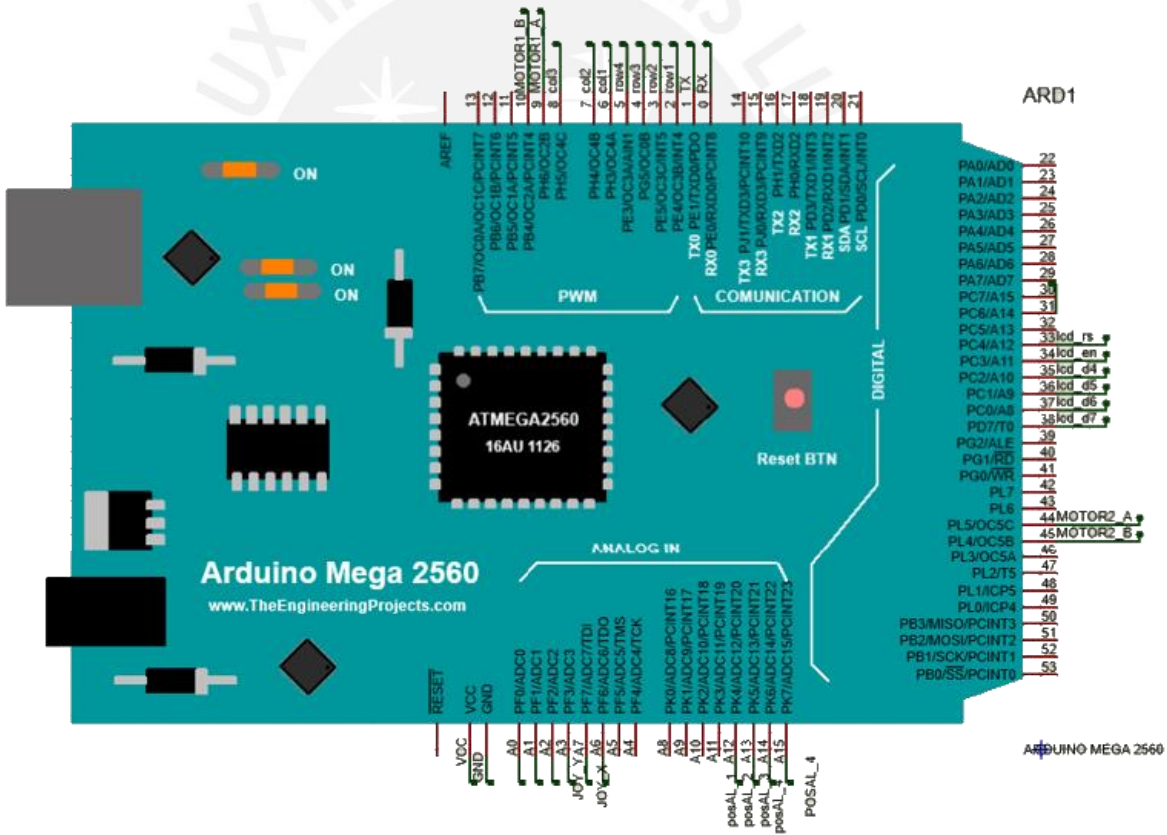
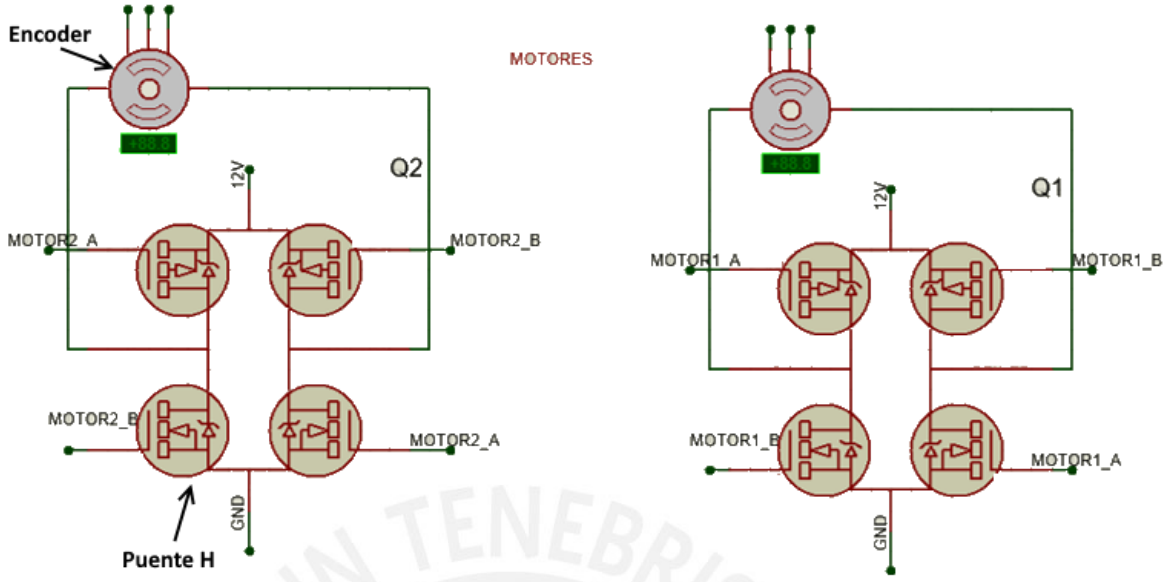


Figura 6.110 Simulación (a) Motores (b) Arduino Mega 2560

Simulación del uso del Joystick

Nombre del archivo: SimulacionEntradas.pdsprj

Anexo: H.1

Componentes a simular

Joystick: Se simulo mediante 2 potenciómetros conectados a los pines correspondientes del microcontrolador.

Simulación

Se simulo el uso del joystick, variando la resistencia de los potenciómetros correspondientes al eje X e Y, mostrando los valores recibidos por el microcontrolador en el terminal virtual, así como mostrando el valor que se le asignara a cada motor para el control de estos.

Simulación de ingreso de códigos por teclado

Nombre del archivo: SimulacionEntradas.pdsprj

Anexo: H.1

Componentes utilizados

Teclado Matricial: Se utilizó 1 componente KEYPAD-PHONE el cual se comporta como el teclado matricial 4x3 que se utilizará en la silla de ruedas.

Pantalla LCD: Se utilizó el componente LM016L el cual es equivalente a la pantalla LCD 2x16 que se utilizara en la silla de ruedas.

Simulación

Se simuló el ingreso de diversos códigos, los cuales son mostrados mediante la pantalla LCD, y se verificó que estos sean correctamente recibidos por el microcontrolador y que las acciones que realice el microcontrolador frente a cada código sea la correcta.

Simulación de movimiento de los actuadores lineales

Nombre del archivo: SimulacionActuadores.pdsprj

Anexo: H.2

Componentes utilizados

Actuadores lineales: Los actuadores lineales se simulan mediante el uso de potenciómetros, los cuales son equivalentes a la señal que es recibida por el microcontrolador desde los sensores de los actuadores lineales.

Joystick

Simulación

Mediante el teclado matricial, se ingresa cualquier código que requiera el uso de los actuadores lineales (Ver Tabla 4.10 para más información sobre esto). Luego, para cada actuador lineal activado, se muestran en el terminal virtual los valores de la posición actual, posición máxima, posición mínima, dirección de movimiento y número de actuador lineal.

Según sea el valor leído del joystick, el microcontrolador calcula el sentido de movimiento deseado y manualmente se disminuye/aumenta el valor de la resistencia correspondiente, simulando un cambio en la posición de actuador lineal. Se verifica que el microcontrolador detenga a los actuadores lineales en la posición final deseada, así como no pasen los límites máximos o mínimos.

Simulación de control de los motores por joystick

Nombre del archivo: SimulacionMotores.pdsprj

Anexo: H.3

Componentes utilizados

Motores: Se utilizó el componente MOTOR-ENCODER el cual permite simular un motor eléctrico con un Encoder incluido. Se puede variar diversas características de este motor como el voltaje de alimentación, resistencia de armadura, inductancia de armadura, RPM y los pulsos por revolución que entrega el Encoder.

Joystick

Simulación

Mediante el teclado matricial, se ingresa el código correspondiente a la funcionalidad Movimiento (código: 111). En el terminal virtual, se muestran el valor asignado al motor, la velocidad deseada calculada, la velocidad real, ciclo de trabajo asignado, el id del motor, los valores de salida en pines A y B de cada motor y las variables del algoritmo PID (error, error pasado, proporcional, integral, derivativo).

Mediante esta simulación se verifica que se le esté asignando un valor correcto a cada motor según la posición del joystick; así como, se verifica que el algoritmo PID esté funcionando correctamente y el ciclo de trabajo de la onda PWM que controla a cada motor.

OBSERVACIONES

Se planteó, como un deseo en la lista de exigencias, que la silla de ruedas pueda ofrecer la funcionalidad de compactibilidad, con el fin de facilitar el traslado de esta de un lugar a otro; pero no se pudo lograr agregar esta funcionalidad, debido al peso extra que se agrega con todos los componentes electrónicos (actuadores lineales y baterías, entre los más pesados), así como, la dificultad que presentaría al usuario remover algunos de estos componentes para que sea posible la compactación de la silla y para obtener que el peso de esta sea menor a el peso máximo que puede cargar una persona adulta de 25 kg[40].



CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Conclusiones

Se realizó el diseño de una silla de ruedas mecatrónica utilizando la recomendación para el diseño de productos VDI 2225, 1997 [3]. Esta silla de ruedas podrá realizar las funcionalidades de silla, camilla, bipedestación y desplazamiento.

Como se indicó previamente, un objetivo secundario de este trabajo fue el de investigar respecto al diseño de sillas de ruedas mecatrónica multifuncionales para cualquier persona con alguna discapacidad. Tomando como base el diseño realizado en el presente trabajo y realizando un análisis previo, se pueden re-utilizar algunos componentes y se deberá de volver a seleccionar otros (actuadores lineales, baterías y motores) para que la silla pueda soportar a un usuario con mayores dimensiones y peso, simplemente variando las medidas de la parte mecánica de acuerdo al tamaño del usuario y realizando un nuevo análisis para la selección de los actuadores lineales, baterías y motores.

Se simuló el programa que se utilizará en el microcontrolador Arduino mediante el software Proteus. En esta simulación se pudo corroborar el correcto funcionamiento del programa respecto al ingreso de los códigos para la selección de las diversas funcionalidades, la detección de la funcionalidad actual y deseada, el control de los actuadores lineales y motores mediante el joystick y el funcionamiento de la pantalla LCD. El programa se puede encontrar en los anexos.

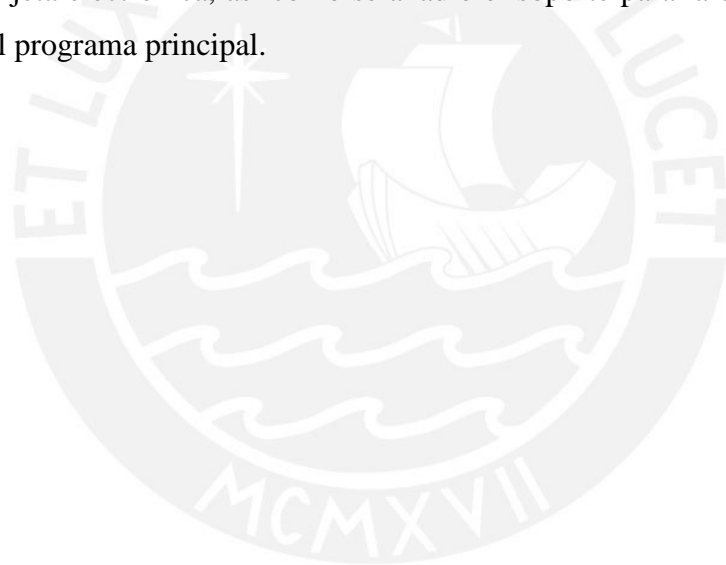
El precio estimado de esta silla de ruedas es de S. / 7195 (\$ 2110) y el mínimo precio de las sillas comerciales que ofrezcan funciones similares es de \$ 6900. (Tabla 1.1). Para obtener el precio de comercialización, se deberán de tener en cuenta los siguientes factores: costo de importación de algunos componentes, compra de normas, costos de transporte, almacenamiento, impuestos, ganancias esperadas, entre otros más. Aun así, el precio estimado de la silla de ruedas se encuentra muy por debajo del costo de las sillas comerciales, por lo que se puede concluir que una vez se consideren los factores necesarios, el costo de comercialización será mucho menor que el de las sillas disponibles en el mercado, por lo que se habrá cumplido con uno de los objetivos principales de esta tesis, el cual era ofrecer una este tipo de sillas de ruedas multifuncionales a un costo asequible para el mercado peruano, con el fin de mejorar la calidad de vida de las personas.



Trabajos futuros

Trabajos futuros se deberán orientar en la implementación física de esta silla de ruedas, la realización de las pruebas del funcionamiento correcto de las diversas funcionalidades y programa principal, cosa que no se pudo realizar en esta tesis principalmente debido al tiempo y a la falta de financiamiento.

Así mismo, se planea mejorar y hacer más fácil el control de esta silla de ruedas mediante el uso de un dispositivo móvil, el cual permitirá el ingreso de los códigos, el control de los actuadores lineales y motores inalámbricamente desde una aplicación para dispositivos móviles. Con este fin, se añadió un módulo bluetooth a la tarjeta electrónica, así como se añadió el soporte para la comunicación bluetooth en el programa principal.



BIBLIOGRAFÍA

- [1] MEDLINE PLUS'
2014 “Duchenne muscular dystrophy”. Consultado: 01 de Noviembre del 2015
<https://www.nlm.nih.gov/medlineplus/ency/article/000705.htm>
- [2] FURUKAWA R., ELÍAS D. y TABUCHI T.
2014 “Design and Fabrication of a Multifunctional Wheelchair for Kids with Duchenne.”
VIII Congreso Latinoamericano de Ingeniería Mecánica COLIM2014. Cuenca, Ecuador 25-27 Noviembre, 2014
- [3] “VDI-Standard: VDI 2225 Design engineering methodics - Engineering design at optimum cost - Simplified calculation of costs”.
http://www.vdi.eu/nc/guidelines/vdi_2225_blat_1-konstruktionsmethodik_technisch_wirtschaftliches_konstruieren_vereinfachte_kostenmittlung_/
- [4] H. SALMIN, et al.
2014 “Design and Implementation of an Electric Wheel-Chair to Economize it with Respect to Bangladesh” Department of Mechanical Engineering. International Journal of multidisciplinary Science and Engineering, 2014, vol. 5, no 2.
- [5] S.K. KAKOTY, M. MURARKA, P. KODATI and U.S. DIXIT
2003 “Design of a Modular Mechatronic Wheelchair” Department of Mechanical Engineering. En Proceedings 11th National Conference on Machines and Mechanics. p. 259.
- [6] DAN DING y RORY A.
2005 “Electric Powered Wheelchair” Control Systems, vol. 25, pag 22 - 34, IEEE
- [7] Y. K. TAN y S. SASIDHAR
2009 “Engineering better electric- powered wheelchairs to enhance rehabilitative and assistive needs of disabled and aged population” Universidad Nacional de Singapore. Singapore

- [8] Bing-Yuh LUI Jcr-Junn Lub Fok-Ching CllOlllf Wei-Piao Wu Yao Ou-Yanlf
Hi-Wuh Lcel Heng-Yin Chen Jin-Shin Laj Tc-Son l
2004 “Development of the safe powered wheelchair controller” Taipei, Taiwan
- [9] D. K. JONE, R. A. COOPER, S. ALBRIGTH & M. DIGIOVINE
1998 “Powered Wheelchair Driving Performance Using Force- and Position-Sensing
Joysticks” IEEE 24th Annual Northeast Bioengineering Conference, USA
- [10] RUEI-XI CHEN, LAING-GEE CHEN y LILIN
2000 “System Design Consideration for Digital Wheelchair Controller” IEEE
Transactions on industrial electronics, vol. 47, No. 4, Agosto 2000.
- [11] M. DECHRIT, M. BENCHALAK, S. PETRUS
2011 “Wheelchair stabilizing by controlling the speed of its DC motor” World Academy
of Science, Engineering and Technology 58. 2011...
- [12] Karman Healthcare
“XO-202 Power Standing Wheelchair” Consultado: 20 de Noviembre del 2015
<http://www.karmanhealthcare.com/product/standing-wheelchairs/xo-202>
- [13] Karman Healthcare
“XO-505 Power Standing Wheelchair” Consultado: 20 de Noviembre del 2015
<http://www.karmanhealthcare.com/product/standing-wheelchairs/xo-505>
- [14] LLOYD
“PHOENIX II STANDING WHEELCHAIR” Consultado: 20 de Noviembre del
2015
<https://www.wheelchair88.com/product/phoenix-ii/#forward>
- [15] LLOYD
“DRACO STANDING WHEELCHAIR” Consultado: 20 de Noviembre del 2015
<https://www.wheelchair88.com/product/draco-standing-wheelchair/>
- [16] Permobil
“F5 CORPUS VS” Consultado: 20 de Noviembre del 2015
[http://f5corpus.permobil.com/wp-
content/uploads/2014/09/F5_Corpus_VS_UK_LOW.pdf](http://f5corpus.permobil.com/wp-content/uploads/2014/09/F5_Corpus_VS_UK_LOW.pdf)

- [17] Ottobock
“Xeno Stand up and Drive”. Consultado: 20 de Noviembre del 2015
<http://www.levousa.com/images/stories/combi/combi-product-brochure-metric.pdf>
- [18] LEVO
“LEVO combi”. Pág. 1-2. Consultado: 20 de Noviembre del 2015
<http://www.levousa.com/images/stories/combi/combi-product-brochure-metric.pdf>
- [19] LEVO
“LEVO combi JR”. Pág. 3-4. Consultado: 20 de Noviembre del 2015
<http://www.levousa.com/images/stories/combi/combi-product-brochure-metric.pdf>
- [20] LEVO
“LEVO C3” Consultado: 20 de Noviembre del 2015
<http://www.levousa.com/images/stories/pdf/c3-product-brochure.pdf>
- [21] WNGEEK
“Arduino Web Server Tutorial” Consultado: 26 de Setiembre del 2016
<https://wngeek.wordpress.com/2013/10/02/arduino-web-server-tutorial/>
- [22] ARDUINO
“Arduino MEGA 2560” Consultado: 26 de Setiembre del 2016
<https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardMega2560>
- [23] ROBOTSHOP
“DC-DC Power Converter 25W” Consultado: 26 de Setiembre del 2016
<http://www.robotshop.com/en/dc-dc-power-converter-25w.html>
- [24] SPARKFUN
“Keypad - 12 Button” Consultado: 26 de Setiembre del 2016
<https://www.sparkfun.com/products/8653>
- [25] DISCA
“Módulo teclado matricial” Consultado: 26 de Setiembre del 2016
<http://www.disca.upv.es/aperles/web51/modulos/teclado/>
- [26] ELECTROTEC
“LCD 16x2” Consultado: 26 de Setiembre del 2016
<http://electrotec.pe/tienda/lcd-16x2>

- [27] ENGINEERSGARAGE
“LCD” Consultado: 26 de Setiembre del 2016
<http://www.engineersgarage.com/electronic-components/16x2-lcd-module-datasheet>
- [28] ALIEXPRESS
“2-axis potentiometer Joystick” Consultado: 26 de Setiembre del 2016
<https://www.aliexpress.com/item/2-axis-potentiometer-Joystick/1066000871.html>
- [29] ABC ALARMAS&AUDIO
“Accesorios para audio” Consultado: 26 de Setiembre del 2016
<http://www.abcalarmasyaudio.com/-accesorios.html>
- [30] HUSILLOS
“Actuadores Lineales” Consultado: 26 de Setiembre del 2016
<http://www.husillos.com.mx/productos/actuadores-lineales/>
- [31] LINAK
“LINEAR ACTUATOR LA23” Consultado: 26 de Setiembre del 2016
<http://www.linak.com/products/linear-actuators.aspx?product=LA23>
- [32] FIRGELLI
“Heavy Duty Rod Actuators” Consultado: 26 de Setiembre del 2016
<https://www.firgelliauto.com/products/heavy-duty>
- [33] ROBOTSHOP
“4" Stroke Firgelli Automation” Consultado: 26 de Setiembre del 2016
<http://www.robotshop.com/en/4-stroke-firgelli-automation-12vdc-35lb-force-linear-actuator-w--pot-feedback.html>
- [34] TRANSFER MULTISORT ELEKTRONIK
“TELPOD SVP453N-50K-LIN” Consultado: 26 de Setiembre del 2016
<http://www.tme.eu/gb/details/svp453n-50k-lin/slide-potentiometers/telpod/>

- [35] DYD MOTOR CO.
“Wheelchair Geared Motor” Consultado: 26 de Setiembre del 2016
http://www.dongyangmotor.com/Wheelchair_Motors-Electric_Wheelchair_Gear_Motor.html
- [36] ZHEJIANG DONGYA ELECTRONIC CO., LTD
“JZC-11F” Consultado: 26 de Setiembre del 2016
<https://docs.particle.io/assets/datasheets/makerkit/spdt-relay.pdf>
- [37] ELECTROPRO
“Módulo Bluetooth HC05 (Master/Slave)” Consultado: 26 de Setiembre del 2016
http://electropro.pe/index.php?route=product/product&product_id=403
- [38] RCSCOMPONENTS
“HC Serial Bluetooth Products” Consultado: 26 de Setiembre del 2016
https://www.rcscomponents.kiev.ua/datasheets/hc_hc-05-user-instructions-bluetooth.pdf
- [39] UPG
“Sealed Lead-Acid Battery” Consultado: 26 de Setiembre del 2016
<http://powerupco.com/site/wp-content/files/Batteries/UPG/UB12500.pdf>
- [40] MINISTERIO DE TRABAJO DEL PERU
“RESOLUCION MINISTERIAL N° 375-2008-TR” Consultado: 26 de Setiembre del 2016
[http://www2.congreso.gob.pe/sicr/cendocbib/con4_uibd.nsf/982841B4C16586CD05257E280058419A/\\$FILE/4_RESOLUCION_MINISTERIAL_375_30_11_2008.pdf](http://www2.congreso.gob.pe/sicr/cendocbib/con4_uibd.nsf/982841B4C16586CD05257E280058419A/$FILE/4_RESOLUCION_MINISTERIAL_375_30_11_2008.pdf)