



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y  
MECÁNICA**

**CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN  
DEL TÍTULO DE INGENIERO EN MECATRÓNICA**

**AUTOR: VACA MUÑOZ, MARLON FERNANDO**

**TEMA: DISEÑO, CONSTRUCCIÓN E IMPLEMENTACIÓN  
DE UN SISTEMA MÓVIL Y DE ELEVACIÓN AUTOMÁTICO DE  
UNA SILLA DE RUEDAS PARA PERSONAS CON  
ESCLEROSIS LATERAL AMIOTRÓFICA.**

**DIRECTOR: ING. TOBAR, JOHANNA**

**SANGOLQUÍ**

**2016**

## CERTIFICADO DE LA ELABORACIÓN DEL PROYECTO



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA  
CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

### CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, "***DISEÑO, CONSTRUCCIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA MÓVIL Y DE ELEVACIÓN AUTOMÁTICO DE UNA SILLA DE RUEDAS PARA PERSONAS CON ESCLEROSIS LATERAL AMIOTRÓFICA***" realizado por el señor ***MARLON FERNANDO VACA MUÑOZ***, ha sido revisado en su totalidad y analizado por el software anti-plagio, el mismo cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, por lo tanto me permito acreditarlo y autorizar al señor ***MARLON FERNANDO VACA MUÑOZ*** para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 07 de septiembre del 2015

Ing. Johanna Tobar

DIRECTORA

## AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

### AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Yo, **MARLON FERNANDO VACA MUÑOZ**, con cédula de identidad N° 1722694294, declaro que este trabajo de titulación "**DISEÑO, CONSTRUCCIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA MÓVIL Y DE ELEVACIÓN AUTOMÁTICO DE UNA SILLA DE RUEDAS PARA PERSONAS CON ESCLEROSIS LATERAL AMIOTRÓFICA**" ha sido desarrollado considerando los métodos de investigación existentes, así como también se ha respetado los derechos intelectuales de terceros considerándose en las citas bibliográficas.

Consecuentemente declaro que este trabajo es de mi autoría, en virtud de ello me declaro responsable del contenido, veracidad y alcance de la investigación mencionada.

Sangolquí, 07 de septiembre del 2015

MARLON FERNANDO VACA MUÑOZ

C.C. 1722694294

## AUTORIZACIÓN



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

### AUTORIZACIÓN

Yo, **MARLON FERNANDO VACA MUÑOZ**, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar en la biblioteca Virtual de la institución el presente trabajo de titulación **“DISEÑO, CONSTRUCCIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA MÓVIL Y DE ELEVACIÓN AUTOMÁTICO DE UNA SILLA DE RUEDAS PARA PERSONAS CON ESCLEROSIS LATERAL AMIOTRÓFICA”** cuyo contenido, ideas y criterios son de mi autoría y responsabilidad.

Sangolquí, 07 de septiembre del 2015

MARLON FERNANDO VACA MUÑOZ

C.C. 1722694294

## **DEDICATORIA**

Dedico este proyecto a mi padre Luis, quien me brindo la inspiración y coraje de luchar sin rendirme y su apoyo constante, quien es mi mayor orgullo y mi héroe favorito. A mi madre Margarita, quien me enseñó el valor del amor incondicional, la perseverancia y el camino en Dios, quien ha sido mi ángel enviado por Dios cuando lo necesitaba. A mis hermanos Jairo e Isabella, que se han convertido en motivo de seguir adelante. A mi tía Lourdes, quien a pesar de su discapacidad no dejó de preocuparse y apoyarme. Y a Paola por ser mi sostén y apoyo en todos estos años de universidad.

## **AGRADECIMIENTO**

A Dios, por ser quien me amó primero, por nunca haberme soltado y haberme dado todas las fuerzas cuando las mías se acabaron.

A mis padres, por su apoyo constante, su confianza en mí y por permanecer conmigo siempre.

A toda mi familia, por acompañarme y motivarme en esta etapa, me apoyaron en distintas maneras y en tantas que no se pudieran contar.

A mis amigos, por haber sido una grandiosa bendición en este camino, que compartieron conmigo una hermosa experiencia.

A mi tutora, Ingeniera Johanna Tobar, porque su apoyo, confianza, motivación y ayuda me permitieron culminar directamente este proyecto.

A mis profesores a lo largo de la carrera por tanto conocimiento y sabiduría que pude recibir.

## Contenido

CERTIFICADO DE LA ELABORACIÓN DEL PROYECTO .....	i
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD .....	ii
AUTORIZACIÓN.....	iii
DEDICATORIA .....	iv
AGRADECIMIENTO .....	v
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xii
ÍNDICE DE TABLAS .....	xvii
RESUMEN.....	xix
ABSTRACT.....	xx
CAPÍTULO 1. GENERALIDADES.....	1
1.1 Definición del proyecto .....	1
1.2 Antecedentes .....	1
1.2.1 Esclerosis lateral amiotrófica.....	1
1.2.2 Repercusiones del uso de silla de ruedas.....	3
1.2.3 Discapacidades en el ecuador .....	6
1.2.4 Cambio de matriz productiva .....	8
1.3 Planteamiento del problema.....	10
1.4 Justificación e importancia .....	11
1.5 Área de influencia.....	12
1.6 Objetivos .....	12
1.6.1 Objetivo general .....	12
1.6.2 Objetivos específicos .....	12
1.7 Alcance .....	13
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO .....	15

2.1	Introducción.....	15
2.2	Sistemas mecánicos .....	15
2.2.1	Sistemas de transmisión de movimiento.....	15
2.2.2	Sistemas de transmisión de potencia.....	17
2.2.3	Conceptos de diseño de elementos de máquinas.....	19
2.2.3.1	Análisis de carga y esfuerzo .....	19
2.2.3.2	Fallas por carga estática .....	26
2.2.3.3	Diseño de ejes .....	28
2.2.3.4	Sujeción mecánica.....	29
2.2.3.5	Cojinetes.....	30
2.2.3.6	Engranés .....	31
2.3	Procesos de manufactura .....	34
2.3.1	Proceso de trabajo metálico en láminas.....	35
2.3.1.1	Materiales en lámina.....	35
2.3.1.2	Cizallado .....	37
2.3.1.3	Doblado .....	38
2.3.1.4	Punzonado.....	40
2.3.2	Operaciones de maquinado .....	41
2.3.2.1	Fuerzas de corte .....	41
2.3.2.2	Torneado .....	43
2.3.2.3	Fresado.....	44
2.3.2.4	Procesos de control numérico.....	46
2.3.3	Procesos de unión y ensamble .....	46
2.3.3.1	Soldadura por resistencia .....	46
2.3.3.2	Soldadura por arco eléctrico .....	47
2.3.4	Doblado en material tubular .....	51

2.4	Sistemas eléctricos/ electrónicos .....	52
2.4.1	Fundamentos básicos de electricidad y electrónica.....	53
2.4.1.1	Ley de OHM.....	53
2.4.1.2	Norma ipc para elaboración de placas PCB .....	53
2.4.2	Motores DC.....	55
2.4.2.1	Circuito equivalente del motor DC .....	55
2.4.2.2	Pérdidas en motores DC.....	56
2.4.2.3	Motor DC de imán permanente.....	57
2.4.2.4	Motor DC serie.....	57
2.4.2	Baterías y reguladores de voltaje.....	58
2.4.3	Puente H.....	60
2.4.3.1	Transistores de unión bipolar BJT .....	60
2.4.4	Acoplamiento control- potencia.....	62
2.4.4.1	Acople de relés .....	62
2.4.4.2	Acople óptico .....	63
2.4.4.3	Transistores de efecto de campo FET .....	64
2.4.5	Arduino .....	65
2.5	Metodología .....	65
CAPÍTULO 3. DISEÑO MECATRÓNICO .....		67
3.1	Planificación QFD.....	67
3.1.1	Identificación de los requisitos del usuario .....	67
3.1.2	Identificación de los requisitos técnicos .....	67
3.1.3	Función de la calidad .....	68
3.1.4	Análisis de resultados .....	69
3.2	Diseño de los componentes mecánicos .....	69
3.2.1	Alternativa de sistema de bipedestación .....	70

3.2.2	Parámetros de diseño de sistema de bipedestación.....	71
3.2.3	Desarrollo del sistema de bipedestación .....	71
3.2.3.1	Análisis dinámico del sistema de bipedestación .....	73
3.2.3.2	Análisis estático del sistema de bipedestación .....	77
3.2.4	Alternativa de diseño de reclinación .....	79
3.2.5	Parámetros de diseño del sistema de reclinación.....	80
3.2.6	Desarrollo del sistema de reclinación .....	81
3.1.6.1	Análisis dinámico del sistema de reclinación .....	81
3.2.6.2	Análisis estático del sistema de reclinación .....	85
3.2.7	Alternativa de sistema de movimiento.....	87
3.2.8	Parámetros de diseño de sistema de movimiento .....	88
3.2.9	Desarrollo del sistema de movimiento .....	89
3.2.10	Análisis de las piezas que conforman el mecanismo .....	91
3.3	Diseño del sistema eléctrico y electrónico .....	95
3.3.1	Diseño de la electrónica de control .....	95
3.3.1.2	Sensores y control .....	95
3.3.1.3	Diseño de la placa pcb de control .....	98
3.3.2	Diseño de la electrónica de potencia .....	100
3.3.2.2	Acoplamiento darlington.....	101
3.3.2.3	Diseño del puente h .....	104
3.3.2.4	Simulación electrónica .....	106
3.3.2.5	Diseño de la placa pcb de potencia .....	106
3.3.2.6	Fuente de alimentación.....	108
3.4	Diseño del sistema de control .....	109
3.4.1	Tarjeta de adquisición de datos .....	110
3.4.2	Requerimientos de funcionamiento.....	110

3.4.2.1	Movilidad.....	111
3.4.2.2	Bipedestación .....	111
3.4.2.3	Reclinación .....	112
3.4.3	Programación del sistema de movilidad .....	112
3.4.4	Programación del sistema bipedestación .....	128
3.4.5	Programación del sistema reclinación .....	129
3.5	Diseño de la interfaz hombre máquina (HMI) .....	130
3.5.1	Arquitectura.....	130
3.5.2	Distribución .....	132
3.5.3	Navegación .....	133
3.5.4	Uso del color .....	134
3.5.5	Resultado final .....	135
CAPÍTULO 4. CONSTRUCCIÓN E IMPLEMENTACIÓN .....		139
4.1	Operaciones tecnológicas .....	139
4.2	Diagramas de procesos .....	140
4.3	Tiempos de fabricación .....	148
4.4	Tiempos de montaje.....	150
CAPÍTULO 5. PRUEBAS Y RESULTADOS .....		152
5.1	Prueba de motores lineales de bipedestación.....	152
5.2	Resultados de prueba de motores lineales de bipedestación	153
5.3	Prueba de motores lineales de reclinación.....	154
5.4	Resultados de prueba de motores lineales de reclinación .....	155
5.5	Prueba de motores principales.....	156
5.6	Resultados de prueba de motores principales .....	157
5.7	Prueba de pantalla táctil.....	159
5.8	Resultados de prueba de pantalla táctil .....	160

5.9	Prueba de mando analógico .....	161
5.10	Resultados de prueba de mando analógico .....	162
5.11	Prueba de movimiento de mecanismo .....	163
5.12	Resultado de prueba de mecanismo.....	165
CAPÍTULO 6. ANÁLISIS ECONÓMICO Y FINANCIERO .....		171
6.1	Costos directos.....	171
6.2	Costos indirectos.....	175
6.3	Costos de fabricación.....	176
6.4	Costo total .....	177
CONCLUSIONES .....		178
RECOMENDACIONES.....		180
BIBLIOGRAFÍA.....		181
ANEXOS.....		185

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Efecto de ELA en células nerviosas .....	2
Figura 2 Contraste de usuarios con discapacidad .....	6
Figura 3 Silla Semi-Manual Fuente: LEVO .....	7
Figura 4 Matriz productiva tradicional del Ecuador .....	9
Figura 5 Objetivo del cambio de matriz productiva .....	9
Figura 6 Mecanismos Biela, manivela, corredera .....	16
Figura 7 Mecanismo leva .....	16
Figura 8 Mecanismo piñón cremallera Fuente: (Erdman & Sandor, 2011) ..	17
Figura 9 Mecanismos tuerca tornillo Fuente: (Norton, 2012) .....	17
Figura 10 Tren de poleas Fuente: (Hugh & Freedman, 2010) .....	18
Figura 11 Tren de engranes típico Fuente: (Budynas & Nisbett, 2011) .....	18
Figura 12 Transmisión variable de velocidad.....	19
Figura 13 Partes de las cadenas Fuente: (Budynas & Nisbett, 2011).....	19
Figura 14 Esfuerzos normales Fuente: (Hibbeler, 2011) .....	20
Figura 15 Diagrama esfuerzo- deformación y sus zonas.....	22
Figura 16 Flexión de una barra Fuente: (Hibbeler, 2011) .....	24
Figura 17 Efecto de torsión en un cuerpo Fuente: (Hibbeler, 2011) .....	25
Figura 18 Transformación de esfuerzos Fuente: (Hibbeler, 2011).....	26
Figura 19 Tipos de esfuerzo Fuente: (Budynas & Nisbett, 2011).....	28
Figura 20 Partes de un tornillo de potencia y sus fuerzas .....	29
Figura 2.2.21 Partes de un engrane Fuente: (Budynas & Nisbett, 2011).....	31
Figura 22 Cizallado de lámina Fuente: (Groover, 2012) .....	37
Figura 23 Esfuerzo transversal en doblado Fuente: (Schey, 2012) .....	39
Figura 24 Tamaños de troquel y punzón Fuente: (Groover, 2012) .....	40
Figura 25 Fuerzas sobre pieza de trabajo Fuente: (Groover, 2012) .....	41
Figura 26 Fuerzas sobre herramienta Fuente: (Groover, 2012) .....	42
Figura 27 Operación de torneado Fuente: (Groover, 2012).....	44
Figura 28 Tipo de fresado Fuente: (Groover, 2012).....	45

Figura 29 Ejemplo de soldadura por resistencia Fuente: (Schey, 2012).....	47
Figura 30 Pistolas para TIG Fuente: (INDURA, 2014) .....	48
Figura 31 Boquilla OAW Fuente: (INDURA, 2014) .....	49
Figura 32 Equipo de soldadura MIG Fuente: (INDURA, 2014) .....	50
Figura 33 Equipo SMAW Fuente: (INDURA, 2014) .....	51
Figura 34 Estirado de tubo Fuente: (Groover, 2012) .....	51
Figura 35 Arrastrado de tubo Fuente: (Groover, 2012).....	52
Figura 36 Doblado por compresión de tubos Fuente: (Groover, 2012).....	52
Figura 37 Sección transversal vs Corriente Fuente: (IPC, 2014).....	54
Figura 38 Sección transversal vs Ancho de pista Fuente: (IPC, 2014) .....	54
Figura 39 Circuito equivalente del motor DC Fuente: (Chapman, 2011) .....	55
Figura 40 Circuito simplificado del motor DC Fuente: (Chapman, 2011) .....	56
Figura 41 Circuito equivalente de un motor serie Fuente: (Chapman, 2011).....	58
Figura 42 Esquema de una batería Fuente: (Winter & Brodd, 2014).....	58
Figura 43 Puente H Fuente: (Chapman, 2011).....	60
Figura 44 Curvas características de los transistores .....	61
Figura 45 Transistor en corte Fuente: (Hambley, 2011) .....	61
Figura 46 Transistor en saturación Fuente: (Hambley, 2011).....	62
Figura 47 Circuito de relé Fuente: (Alexander & Sadiku, 2012).....	63
Figura 48 Encapsulado de fototransistor .....	63
Figura 49 Símbolo JFET, canal n y canal p .....	64
Figura 50 Símbolo MOSFET, canal n y canal p.....	64
Figura 51 Símbolo MESFET Fuente: (Alexander & Sadiku, 2012) .....	65
Figura 52 Arduino MEGA 2560 Fuente: (ARDUINO, 2015).....	65
Figura 53 Movimiento deseado del espaldar .....	70
Figura 54 Mecanismo alternativo de barras paralelas .....	70
Figura 55 Diseño del mecanismo de movimiento .....	72
Figura 56 Modelo para simulación dinámica.....	73
Figura 57 Simulación dinámica de bipedestación .....	74
Figura 58 Gráfica fuerzas en el pivote base-mecanismo. ....	74
Figura 59 Gráfica fuerzas en el pivote barra1-barra2 .....	75
Figura 60 Gráfica fuerzas en el pivote Espaldar-barra2.....	75

Figura 61 Fuerza máxima en pivote base-mecanismo .....	76
Figura 62 Fuerza máxima en el pivote barra1-barra2 .....	76
Figura 63 Fuerza máxima en el pivote espaldar-barra2.....	76
Figura 64 Diseño 3D de mecanismo de bipedestación .....	77
Figura 65 Distribución de cargas en la base .....	77
Figura 66 Simulación de esfuerzo en la base, bipedestación .....	78
Figura 67 Simulación de esfuerzos en base, segundo modelo, reclinación.	79
Figura 68 Movimiento deseado en la reclinación .....	80
Figura 69 Mecanismo de barras paralelas en la reclinación .....	80
Figura 70 Simulación dinámica de reclinación .....	82
Figura 71 Gráfica fuerzas en el pivote posaderas-base.....	82
Figura 72 Gráfica fuerzas en el pivote espaldar-barra .....	83
Figura 73 Gráfica fuerzas en el pivote espaldar-barra2 .....	83
Figura 74 Fuerza máxima en el pivote posaderas-base .....	84
Figura 75 Fuerza máxima en el pivote espaldar-barra.....	84
Figura 76 Fuerza máxima en el pivote espaldar-barra2.....	84
Figura 77 Diseño 3D de mecanismo de reclinación.....	85
Figura 78 Simulación de esfuerzo en la base, reclinación .....	85
Figura 79 Simulación de esfuerzos en base, segundo modelo, reclinación	86
Figura 80 Rueda original de la silla .....	87
Figura 81 Esquema de la silla original .....	87
Figura 82 Esquema de sistema de movimiento .....	88
Figura 83 Simulación de los esfuerzos en la base, posición de movimiento	89
Figura 84 Simulación de los esfuerzos en la base, posición de movimiento, segundo modelo .....	90
Figura 85 Simulación de esfuerzos en bracket de motor .....	92
Figura 86 Simulación de esfuerzos en barra2 .....	92
Figura 87 Simulación de esfuerzos en barra 1 .....	93
Figura 88 Simulación de esfuerzos en barra .....	94
Figura 89 Esquema de resistencia Pull-Up.....	96
Figura 90 Conexión sensor de posición angular .....	96
Figura 91 Circuito de control.....	98

Figura 92 Forma de conexión del zumbador .....	98
Figura 93 Ruteo de placa de control .....	100
Figura 94 Etapas del acoplamiento control-potencia .....	101
Figura 95 Circuito de conexión de frenos de motores.....	102
Figura 96 Circuito de conexión de motores lineales .....	104
Figura 97 Puente H de motores principales, vista total.....	105
Figura 98 Puente H de motores principales, vista medio puente .....	105
Figura 99 Simulación puente H de motores principales.....	106
Figura 100 Simulación de puente H motores lineales.....	106
Figura 101 Ruteo del circuito de potencia.....	108
Figura 102 Conexión serie de las baterías .....	109
Figura 103 Organización del sistema del proyecto .....	110
Figura 104 Movimientos del Joystick .....	113
Figura 105 Ejemplo de independencia de movimiento de motores.....	114
Figura 106 Esquema de control difuso del sistema .....	115
Figura 107 Gráfica de las funciones de membresía del eje X.....	117
Figura 108 Gráfica de las funciones de membresía del eje Y.....	118
Figura 109 Gráfica de las funciones de membresía del motor izquierdo ...	119
Figura 110 Gráfica de las funciones de membresía del motor derecho.....	120
Figura 111 Superficie de control del motor izquierdo.....	125
Figura 112 Superficie de control del motor derecho .....	125
Figura 113 Vista plana de la superficie de control del motor izquierdo .....	126
Figura 114 Vista plana de la superficie de control del motor derecho.....	126
Figura 115 Simulación de las reglas de control difuso.....	127
Figura 116 Diagrama de flujo de programación fuzzy.....	128
Figura 117 Diagrama de flujo de programación elevación.....	129
Figura 118 Diagrama de flujo de programación reclinación.....	130
Figura 119 Arquitectura de HMI .....	131
Figura 120 Arquitectura pantalla principal.....	131
Figura 121 Arquitectura pantalla secundaria .....	132
Figura 122 Navegación de la HMI.....	133
Figura 123 Gama de colores HMI .....	134

Figura 124 Color de fondo HMI.....	135
Figura 125 Pantalla principal HMI.....	136
Figura 126 Pantalla bipedestación HMI.....	137
Figura 127 Pantalla reclinación HMI.....	138
Figura 128 Diagrama de procesos: Base.....	140
Figura 129 Diagrama de procesos: Bracket motor lineal.....	141
Figura 130 Diagrama de procesos: Pivote de piernas.....	142
Figura 131 Diagrama de procesos: Pivote de espalda.....	143
Figura 132 Diagrama de procesos: Barra paralela 1.....	144
Figura 133 Diagrama de procesos: Barra paralela 2.....	145
Figura 134 Diagrama de procesos: Bocines.....	146
Figura 135 Diagrama de procesos: Soporte de asiento.....	147
Figura 136 Diagrama de procesos: Caja de control.....	148
Figura 137 Motores lineales de bipedestación.....	152
Figura 138 Motores lineales de reclinación.....	154
Figura 139 Motores principales.....	156
Figura 140 Módulo de prueba de pantalla táctil.....	159
Figura 141 Prueba de pantalla táctil.....	161
Figura 142 Mando analógico.....	161
Figura 143 Módulo de prueba total en protoboard.....	164
Figura 144 Control armado final del proyecto.....	164
Figura 145 Prueba fallida de estructura.....	166
Figura 146 Prueba de carga en estado de reposo.....	167
Figura 147 Prueba de reclinación sin carga.....	168
Figura 148 Prueba de reclinación con carga.....	168
Figura 149 Prueba de bipedestación sin carga.....	169
Figura 150 Prueba de bipedestación con carga.....	169

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Tipos de baterías Fuente: (Winter & Brodd, 2014).....	59
Tabla 2 Función de la calidad .....	68
Tabla 3 Resultados QFD .....	69
Tabla 4 Parámetros de diseño de bipedestación.....	71
Tabla 5 Parámetros d diseño de reclinación.....	81
Tabla 6 Parámetros de diseño de movimiento.....	88
Tabla 7 Datos del usuario de la silla .....	89
Tabla 8 Resultados de análisis de factor de seguridad.....	91
Tabla 9 Resumen de factores de seguridad de piezas del mecanismo .....	95
Tabla 10 Características del Joystick.....	97
Tabla 11 Distribución de terminales del controlador .....	99
Tabla 12 Valores de corriente medidos en motores de bipedestación.....	102
Tabla 13 Valores de corriente medidos en motores de reclinación.....	103
Tabla 14 Características de los relés.....	103
Tabla 15 Características básicas de MOSFET usados.....	104
Tabla 16 Especificaciones técnicas de Arduino MEGA 2560 Fuente: (ARDUINO, 2015) .....	109
Tabla 17 Variables del sistema de movilidad.....	114
Tabla 18 Funciones de membresía del eje X.....	116
Tabla 19 Funciones de membresía del eje Y.....	117
Tabla 20 Funciones de membresía del motor izquierdo .....	118
Tabla 21 Funciones de membresía del motor derecho.....	119
Tabla 22 Reglas de control difuso del motor izquierdo .....	120
Tabla 23 Reglas de control difuso del motor derecho.....	121
Tabla 24 Resumen y significado de las reglas de control difuso .....	121
Tabla 25 Operaciones tecnológicas.....	139
Tabla 26 Tiempo de fabricación por pieza, Parte 1.....	149
Tabla 27 Tiempo de fabricación por pieza, Parte 2.....	149
Tabla 28 Tiempo de fabricación por proceso.....	150
Tabla 29 Tiempo de montaje mecánico.....	150

Tabla 30 Tiempo de montaje eléctrico electrónico.....	151
Tabla 31 Tiempo de montaje total.....	151
Tabla 32 Resultado de prueba de motores lineales bipedestación inicial..	153
Tabla 33 Resultado de prueba de motores lineales bipedestación 2.....	154
Tabla 34 Resultados de prueba de motores lineales de reclinación inicial	155
Tabla 35 Resultados de prueba de motores lineales reclinación corregida	156
Tabla 36 Resultados de prueba de motor principal derecho absoluta .....	157
Tabla 37 Resultados de prueba de motor principal izquierdo absoluta.....	158
Tabla 38 Resultados de prueba de motores principales bajo manejo de ancho de pulso inicial.....	158
Tabla 39 Resultados de prueba de motores principales bajo manejo de ancho de pulso corregida.....	159
Tabla 40 Resultados de prueba de pantalla TFT .....	160
Tabla 41 Prueba inicial de lectura de valores de mando analógico .....	163
Tabla 42 Prueba de lecturas de mando analógico calibrado .....	163
Tabla 43 Prueba inicial de mecanismo del proyecto.....	165
Tabla 44 Prueba del mecanismo corregido del proyecto .....	166
Tabla 45 Costos directos: Materiales mecánicos.....	171
Tabla 46 Costos directos: Accesorios mecánicos.....	172
Tabla 47 Costos directos: Elementos eléctricos y electrónicos .....	172
Tabla 48 Costos directos: Costos totales.....	175
Tabla 49 Costos indirectos: Materiales indirectos.....	175
Tabla 50 Costos indirectos: Mano de obra indirecta .....	176
Tabla 51 Costos indirectos: Costos operativos.....	176
Tabla 52 Costos indirectos: Costos totales.....	176
Tabla 53 Costos de fabricación.....	177
Tabla 54 Costo total.....	177

## **RESUMEN**

El presente proyecto muestra el diseño, construcción e implementación de un sistema móvil y de elevación automático de una silla de ruedas para personas con esclerosis lateral amiotrófica (ELA) en base a los problemas físicos, sociales y psicológicos que representa el padecer una enfermedad degenerativa terminal. Permite, mediante mecanismos de bipedestación, evitar trastornos sobre la columna vertebral al momento de trasladar al paciente de la silla a otro lugar. El mecanismo de reclinación logra permutar posiciones, entre sentado y acostado que colabora con el bienestar de la salud. Los mecanismos de elevación y reclinación usan motores eléctricos lineales como mejor solución para solventar el problema y por su facilidad de control. El mecanismo de movilidad automática, permite mejorar el nivel de independencia que posee el paciente. El conjunto de estas tres características aumenta la calidad de vida y ayudan a confrontar los problemas psicológicos del uso de silla de ruedas. El sistema de control posee lógica difusa para solventar dificultades de varias variables de entrada y varias de salida. El sistema mecánico fue dimensionado para funcionar correctamente con una persona de peso promedio. Para facilitar al usuario el manejo de la silla de ruedas, se implementó una interfaz de usuario (HMI), con pantalla táctil para el control general y con un mando analógico (Joystick) para los controles manuales del sistema.

### **PALABRAS CLAVE**

- **BIPEDESTACIÓN**
- **ELA**
- **RECLINACIÓN**
- **SILLA DE RUEDAS**
- **AUTOMATISMO**
- **CONTROL DIFUSO**

## **ABSTRACT**

This project involves the design, construction and implementation of a mobile lifting automated system of a wheelchair for amyotrophic lateral sclerosis (ALS) people based upon the physical, social and psychological issues that carry out the fact of suffer a degenerative terminal illness. It would prevent unhealthful backbone disorders produced at the moment of carry the patient from wheelchair to another place, through integration of bipedestation mechanisms. The back recline mechanism is capable to exchange between sitting and lying positions helping in that way with wellness. The lifting and back recline mechanisms have electric linear motors as better solution for the problem and its controllability. The automatic mobility mechanism allows patients improves their level of independence. These three characteristics combined improve the quality of life and also they help to confront the psychologic problems caused by wheelchair use. The control system implements diffuse logic to solve complications of work out with several input and output variables. The mechanical system was designed to operate properly with a person on average weight. To make it more user friendly, it has a user interface (HMI), with a touch screen for general control and an analog command module (Joystick) for manual controls of the system.

## **KEYWORDS**

- **BIPEDESTATION**
- **ALS**
- **BACK RECLINE**
- **WHEELCHAIR**
- **AUTOMATISM**
- **DIFFUSE CONTROL**

## **CAPÍTULO 1. GENERALIDADES**

### **1.1 Definición del proyecto**

“DISEÑO, CONSTRUCCIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA MÓVIL Y DE ELEVACIÓN AUTOMÁTICO DE UNA SILLA DE RUEDAS PARA PERSONAS CON ESCLEROSIS LATERAL AMIOTRÓFICA.”

### **1.2 Antecedentes**

#### **1.2.1 Esclerosis lateral amiotrófica**

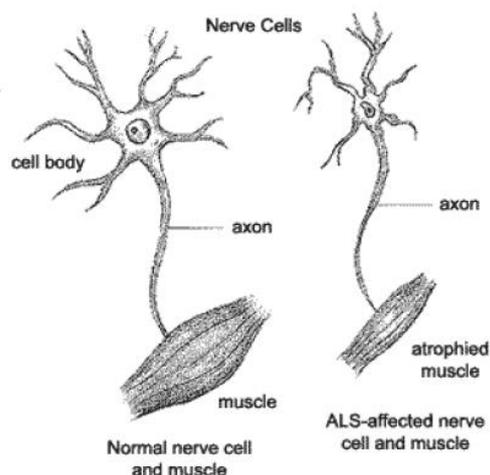
La esclerosis lateral amiotrófica (ELA), es una enfermedad neurodegenerativa progresiva, principalmente se enfoca en la degeneración de las neuronas motoras. Estas neuronas se enfocan principalmente en la transmisión de impulsos a los músculos para su movimiento. La enfermedad ataca primeramente a las células nerviosas del cerebro y de la médula espinal (ALS Association, 2015).

La ELA, aparte es una enfermedad invariablemente fatal (Departamento de neurología CUN, 2015), en el país la fundación FUNDEM brinda apoyo a los pacientes con esta enfermedad, generalmente información y ayudas técnicas ya que esta fundación está especializada en la Esclerosis Múltiple, más no en ELA. Los tratamientos que se deben recibir para controlar la enfermedad no están disponibles en el país, y al momento no existe una cura para esta enfermedad (ASHA, 2015). Por lo que se procede únicamente a control de los síntomas.

Se ha investigado las causas que pueden desenvolver en esta enfermedad, pero lastimosamente no hay resultados que especifiquen una razón. Se ha estimado que el 10% de los diagnósticos de la enfermedad pueden ser defectos genéticos y el otro 90% no se establece una causa posible (Shaw, 2011).

Al momento no existe un procedimiento que determine el diagnóstico de la enfermedad, se llega a establecer la presencia de ELA bajo conclusiones médicas en base a algunos exámenes médicos, luego de establecer degeneración de células nerviosas motoras e incapacidad de transmisión de impulsos nerviosos.

El cuerpo posee una gran variedad de células nerviosas, las cuales están encargadas desde la memoria, pensamientos, los sentidos y funciones corporales. ELA ataca a los movimientos voluntarios. Es decir que los sistemas gástricos y cardíacos no se ven afectados, más no así los músculos, y la respiración.



**Figura 1 Efecto de ELA en células nerviosas**

**Fuente: (ALS Association, 2015)**

En la Figura 1 podemos observar como la degeneración de las células nerviosas motoras incurren en la atrofia muscular, esto provoca una pérdida de fuerza muscular, esta pérdida es gradual y lleva un ritmo lento. La coordinación es igualmente afectada, llega al punto en que la persona con la enfermedad deja de realizar sus actividades cotidianas como el caminar. En un principio se involucra una parte del cuerpo específica, como por ejemplo una pierna o un brazo y luego se extiende en todo el cuerpo (University of Maryland Medical Center, 2015). Las extremidades del cuerpo se pueden ver mucho más delgadas a simple vista, a medida que la enfermedad avanza.

Para ralentizar el proceso es estrictamente necesario fisioterapia y el uso de dispositivos ortopédicos como sillas de ruedas (University of Maryland Medical Center, 2015), de tal forma que se pueda conseguir la máxima función muscular. Aparte es necesario mantener un régimen alimenticio que permita dotar al cuerpo de nutrientes que eviten la degeneración acelerada.

### **1.2.2 Repercusiones del uso de silla de ruedas**

Las sillas de ruedas son ayudas técnicas de gran importancia para una persona discapacitada, ayuda a tratar de seguir con su vida cotidiana, pero existen algunos problemas con el uso prolongado de estas, aun cuando el diseño de las sillas de ruedas está centralizado en el usuario y sus actividades. Para entender de mejor manera los problemas que traen el uso de sillas de ruedas, hay que especificar que se puede clasificar a los usuarios en dos grandes grupos.

El primer grupo son los usuarios, personas discapacitadas con un componente de dolor e inflamación, que adquirieron su discapacidad debido a una enfermedad, como el caso de ELA. Este grupo es el más afectado ya que el solo hecho de mantener una posición durante varias horas incurre en problemas de salud.

El segundo grupo son los usuarios, personas discapacitadas sin componente de dolor, estos usuarios generalmente adquirieron su discapacidad debido a un accidente o a una amputación. Los problemas físicos que enfrentan son menores que los usuarios del primer grupo, pero los problemas psicológicos y sociales son semejantes en ambos grupos (Lino, 2015).

La dificultad de uso en ciertas condiciones de la silla de ruedas es un problema concurrente. Los usuarios en los que su discapacidad involucra dolor es más común este problema. Por ejemplo, el uso de la silla de ruedas sobre superficies no uniformes aumenta considerablemente el dolor del usuario. Aún si las vibraciones provocadas son pequeñas, su constante

aplicación provoca desgaste en la cadera del usuario. En el Ecuador, son pocas las vías y aceras que son aptas para el uso de silla de ruedas.

En el caso de ELA, la deformación y pérdida de fuerza y movilidad dificulta de mayor manera el uso de la silla de ruedas, al perder control sobre los brazos, hace casi imposible que la persona que la use tenga voluntad sobre esta, provocando una dependencia casi total del usuario.

El desgaste de la silla de ruedas con el uso y el tiempo involucra el aumento de dolor para quien la usa. Los materiales con lo que son fabricados el espaldar y el asiento no son lo suficientemente fuertes como para no ceder con el uso, además en la mayoría de las sillas es necesario adicionar implementos que ayuden a sobrellevar este problema, como por ejemplo el uso de cojines anti escara para el asiento y cojines suaves para el espaldar.

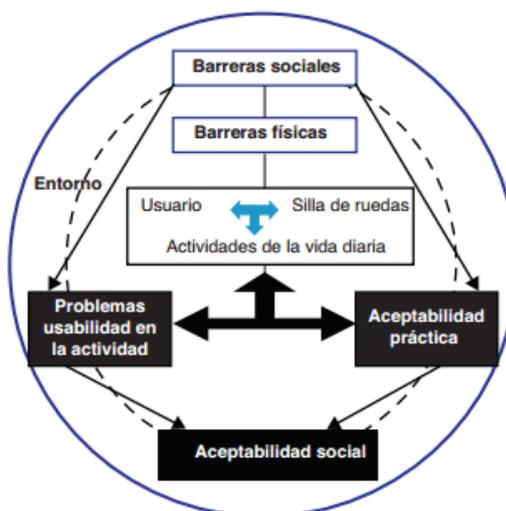
La logística del entorno donde se usa una silla de ruedas marca una diferencia entre los problemas que esta ocasiona, a menudo el tamaño de la silla de ruedas imposibilita la movilidad total dentro de un hogar. Tomando en cuenta que muchas casas no poseen la infraestructura necesaria, por lo que en ciertas veces se deben realizar adaptaciones creativas, que permitan un mejor desempeño. Uno de los principales problemas es el momento que tienen que cambiar de la silla de ruedas a un lugar, este problema abarca más allá de un hogar, ya que es una necesidad básica, por ejemplo al momento de trasladarse de la silla, a la cama, al baño, o a un auto; el cambio de lugar provoca fuertes deformaciones en la cadera y en la columna; *“debo poner un cojín en el sentadero para que no se hunda porque me desnivela la cadera y cuando me bajo de la silla de ruedas noto que se me incrementa el dolor”* (L, ama de casa, 59 años).

La independencia es un problema que depende en gran medida del tipo de usuario, por ejemplo, los usuarios con discapacidad que no poseen componente de dolor poseen una independencia más marcada, en general en su movilidad y su voluntad. Pero usuarios con componentes de dolor, como

es el caso de los pacientes de ELA, poseen una dependencia muy alta en casi todas sus actividades cotidianas.

Se puede decir que la correcta postura marca la diferencia en los problemas que puede traer el uso de silla de ruedas, pero en un paciente que debe usarla alrededor de 10 o más horas al día la silla, es muy difícil pedirle que mantenga una sola posición, ya que esto producirá escaras. Aparte que es muy difícil en pequeños momentos mantener una postura por el hecho de que no se puede lograr una posición adecuada de la pelvis, ya que esta resbala por el asiento. Para hacer más eficiente el uso de la silla de ruedas, la solución más eficiente es el modificarla de acuerdo a la necesidad y condición del usuario (Lino, 2015).

El trastorno común en ambos grupos es el problema psicológico que conlleva el uso de silla de ruedas. Existe una fragilidad y un choque emocional en el momento de la necesidad de usar silla de ruedas, este efecto es progresivo en medida que la persona va dándose cuenta de la necesidad de usar silla para poder continuar y desenvolverse en su entorno. Efectos como la negación son los primeros observados en las personas que usan silla de ruedas. Posteriormente aparece un problema de identidad fruto de la negación, y que tiene efectos negativos en la autoestima. Debe mantenerse un control psicológico amplio, debido a que puede conllevar a casos de depresión por pensamientos trágicos (Costa, Melo, Garanhani, & Fujisawa, 2015). En la Figura 2 se puede apreciar las relaciones que involucra el uso de silla de ruedas de un usuario con su entorno.



**Figura 2 Contraste de usuarios con discapacidad**  
**Fuente: (Herrera & Peláez, 2015)**

La familia para la mayor parte de usuarios, es un pilar fundamental para llevar el problema, puede ser uno de los apoyos de mayor importancia que logre superar los problemas psicológicos (Azevedo & Santos, 2015).

Sentimientos concurrentes de vergüenza atacan a quienes usan silla de ruedas, junto con algunos cambios de la imagen corporal. El usuario tiende a sentirse como broma en el público y más aún en el hogar al ir con el tiempo comprendiendo que necesita de ayuda para realizar las actividades cotidianas, estos sentimientos son mayores conforme sea la discapacidad que se posea. La persona se ve afectada por los prejuicios, de una sociedad mayoritariamente excluyente, que conlleva a un aislamiento social hasta lograr superarse y salir de la negación (Rocha).

### 1.2.3 Discapacidades en el Ecuador

Dentro de la constitución del país se toma muy en serio a los grupos de atención prioritaria que prima en el capítulo 3 de la constitución. Dentro de los cuales se encuentra como pilar fundamental las discapacidades. En el Art. 48, el Estado se compromete en la prevención de discapacidades, además de ello buscará la igualdad de oportunidades y así mismo su integración social. Los proyectos que se buscarán implementar tienen como uno de sus objetivos

establecer programas especializados para la atención integral de las personas con discapacidad, con meta desarrollar en el mayor nivel posible la autonomía y reducir la dependencia (CONSTITUCIÓN POLÍTICA DEL ECUADOR, Sección quinta, De los grupos vulnerables, artículo 48).

Por el momento, dentro del país no se fabrican este tipo de sillas, con sistemas semejantes, todas las sillas eléctricas en el país son importadas y sus características son solo de movimiento, más no poseen sistemas de elevación. Sus costos son muy elevados, rodeando costos de 5000 dólares (BTL Ecuador, equipos de rehabilitación física). Existen modelos manuales o semi-manuales de este sistema en otros países como "LEVO LCEV", que no han sido accesibles en nuestro país por la falta de socialización del producto y sus costos, tomando en cuenta también los costos de importación.



**Figura 3 Silla Semi-Manual**

**Fuente: LEVO**

Distintas instituciones del estado promueven la inclusión de las personas discapacitadas, como lo es el Consejo Nacional de Discapacidades CONADIS y la Secretaría Técnica para la Gestión Inclusiva en Discapacidades SETEDIS; estas se enfocan en tres puntos importantes, que son: inclusión participativa, inclusión productiva, y accesibilidad universal.

La inclusión participativa está enfocada en comités ciudadanos alrededor del territorio nacional que busca acciones de inclusión a nivel de salud,

educación, subsistencia, sociedad y empoderamiento. Es importante en este punto la ejecución de redes de apoyo.

La inclusión productiva brinda asesoría a todos los emprendedores discapacitados, a través de varias herramientas como planes de negocio, o créditos que ayuden a la inserción de las personas en la vida productiva, buscando en lo mayor posible la igualdad de condiciones.

Para el 2010, existían 374251 personas con discapacidad en el país lo que representa el 2,6% de la población total, en los cuales se enfoca la accesibilidad universal, para ello se respalda en la Constitución del Ecuador, Art. 16, Accesos y uso de todas las formas de comunicación visual, auditiva y sensorial, Art. 47, Los establecimientos educativos cumplirán normas de accesibilidad; estos dos artículos apoyados en el Objetivo 2 del Plan Nacional del Buen Vivir; el Art.330 Se garantizará la inserción y accesibilidad en igualdad en condiciones al trabajo; apoyado en el Objetivo 3 del Plan Nacional del Buen Vivir (Art.16, Art. 47, Art. 330 Constitución del Ecuador 2008). Es con estos antecedentes la búsqueda de la accesibilidad universal en la Ley Orgánica de Discapacidades: accesibilidad, accesibilidad en transporte, unidades accesibles, accesibilidad en comunicación y accesibilidad en bibliotecas (Art. 58, Art. 60, Art. 61, Art. 63, Art. 66 Ley Orgánica de Discapacidades).

#### **1.2.4 Cambio de matriz productiva**

Ecuador durante muchos años se ha caracterizado por ser un país netamente exportador de materia prima e importador de productos elaborados durante muchos años. Como se ve en la Figura 4, existe una gran desventaja al ser mayoritariamente importadores de productos elaborados, ya que tenemos una gran pérdida en esta actividad, es por ello que el cambio de matriz productiva es un tema de vital importancia para el país.



**Figura 4 Matriz productiva tradicional del Ecuador**

**Fuente: (SENPLADES, 2012)**

De esta manera, se busca que con ayuda del talento humano se logre cambiar este problema, para generar grandes ventajas, como lo son el nivelar los valores de exportaciones e importaciones y buscar que el país exporte en mayor manera. En la Figura 5 se aprecia el objetivo general del cambio de matriz productiva.



**Figura 5 Objetivo del cambio de matriz productiva**

**Fuente: (SENPLADES, 2012)**

De esta manera se busca generar plazas de empleo, promover sostenibilidad, cambiar importaciones por productos nacionales, tecnificar la industria, elevar la calidad de los elaborados nacionales, diversificar mercados e industrias (Vicepresidencia del Ecuador, 2015).

La mayor cantidad de sillas de ruedas del país son importaciones, debido a la inexistencia de una industria formalizada de elaboración de ayudas

técnicas para discapacitados. Existe en menor tamaño pequeñas personas que se dedican a la elaboración de silla de ruedas manuales, pero no bajo una marca específica ni formal, se las construye bajo necesidad, en cuanto a las sillas de ruedas eléctricas, su desarrollo es mucho menor, debido a que no existe un nacionalismo que promueva este desarrollo.

El desarrollo y elaboración de sillas de ruedas eléctricas, con adaptaciones a la población nacional, es una gran oportunidad de industria, puede colaborar en gran manera al cambio de matriz productiva al sustituir la importación de estas y generar empleo y productos de calidad, ya que en el país existe el conocimiento y los recursos para desarrollar este producto.

### **1.3 Planteamiento del problema**

Este proyecto se enfoca en un paciente de ELA, con una calificación del CONADIS de 80% de discapacidad, esta medida involucra que no posee movilidad en sus extremidades inferiores y movilidad parcial en sus extremidades superiores. Para ello se ha identificado dos problemas a los cuales se buscará dar solución con el presente proyecto.

El primero, un sistema que reduzca los efectos negativos que produce trasladar de la silla a la cama al paciente con ELA, proponiendo el diseñar un mecanismo que se adapte a la silla de tal forma que pueda elevarse o colocar al usuario en una posición semejante a estar de pie, este mecanismo debe poseer un control de altura automático y manual. El control automático serviría para poder alcanzar la posición necesaria para que el usuario pueda ser trasladado sin tener deformaciones en su columna vertebral, el sistema debe alcanzar una altura programada en base a pruebas e investigación. El control manual le dará al usuario independencia al momento de tener que alcanzar objetos demasiado altos o fuera de su alcance, pero deberá poseer sistema de seguridad que evite desbalances en la silla y que pueda caer el usuario al suelo. De esta manera se puede resumir las características que poseerá el equipo:

- Mecanismo que permita la elevación y cambio de postura del usuario. El mecanismo debe ser lo más compacto y sencillo para que se pueda adaptar fácilmente a una silla de ruedas estándar.
- Sistema de control de altura automático. Un sistema que controle con precisión moderada la altura necesaria.
- Sistema de control de altura manual. Se desarrollará sistemas de seguridad que permitan un uso manual de la altura de elevación sin arriesgar la salud del ocupante.

El segundo, será la movilidad, para ello se desarrollará un sistema de transmisión de potencia, para que con uso de motores eléctricos y controlados por un mando ergonómico puedan darle movilidad automática e independiente al usuario, tomando en cuenta que no puede usar sus manos para impulsar las ruedas ya que el usuario no posee fuerza en sus miembros superiores. De esta manera el equipo poseerá las características:

- Sistema de transmisión de potencia. Acoplado a las ruedas de la silla
- Sistema de control. Un mando que permitirá direccionar la silla y sea ergonómico para el usuario
- Sistema de alimentación. Selección de la mejor y más compacta fuente de energía que sea capaz de alimentar los motores de movimiento y el sistema de elevación

Ambos sistemas deben concentrarse en el mando, que con visión en los proyectos complementarios la empresa ha solicitado una pantalla táctil pequeña, que permita ver el estado de la energía y controlar la altura. Para en un futuro acoplarla a un sistema domótico.

#### **1.4 Justificación e importancia**

Es importante poner énfasis en los sectores de atención prioritaria en el país como es el caso de las personas discapacitadas, para poder colaborar con los objetivos del Plan Nacional del Buen Vivir, sobre la inclusión social.

La calidad de vida de una persona con discapacidad depende en gran manera de las ayudas técnicas que posea par la integración con el entorno en el que se desenvuelve, este proyecto busca aumentar considerablemente las condiciones en las que vive una persona discapacitada con ELA, enfermedad que no posee tratamiento ni cura, el impacto psicológico será de gran medida en cuanto a la mejora de independencia que la persona adquiera. Por otro lado, las repercusiones en la salud se reducirán en gran manera, ya que se evitará la deformación de la cadera y la columna vertebral del usuario.

### **1.5 Área de influencia**

El presente proyecto se desarrollará como proyecto final de graduación de la carrera de Ingeniería Mecatrónica para el departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica. Se enfocará en diseño de mecanismos, transmisión de potencia y control automático con el objetivo principal de solventar la necesidad presentada por la empresa SERCOSTAMP.

El área directa de influencia de este proyecto, es la colaboración al mejoramiento de condición de vida de personas discapacitadas. Este producto servirá de motivación para el impulso del desarrollo de ayudas técnicas de mayor tecnología dentro del país.

### **1.6 Objetivos**

#### **1.6.1 Objetivo general**

Diseñar e implementar un sistema mecánico y electrónico en una silla de ruedas estándar mediante la elaboración de un sistema de elevación y de movilidad automático.

#### **1.6.2 Objetivos específicos**

Desarrollar un mecanismo que permita la transformación de la silla de ruedas y sirva de apoyo para el usuario mediante el uso de sistemas de transmisión de movimiento.

Acoplar un sistema mecánico a las ruedas de una silla para discapacitados que permita brindar un grado de independencia de movilidad, controlado desde un mando ergonómico.

Desarrollar un sistema de control que permita supervisar la posición de elevación y la dirección de movimiento de la silla, mediante una interfaz intuitiva.

### **1.7 Alcance**

Mediante el desarrollo del presente proyecto, se busca incursionar en el sector productivo de la elaboración de implementos para discapacidades que no tiene un alto nivel en el país. Se busca impulsar la industria mediante la construcción de un producto de alta calidad. Contribuyendo con el cambio de matriz productiva y aportando con información que beneficie en esta industria.

Se busca mejorar sustancialmente la calidad de vida de uno de los sectores de atención prioritaria, como lo son las personas con discapacidades, específicamente personas con discapacidad motoras, con instrumentos de este tipo que deberían ser de fácil acceso y obtención para estas personas. Para mejorar no solo su condición de salud sino también el impacto psicológico que provoca una deficiencia motriz.

Se implementará un sistema mecánico y de control para una silla de ruedas, de forma que reduzca los daños que provoca el uso prolongado de esta, las repercusiones lumbares en los momentos de trasladar al usuario fuera de la silla a otro sitio y brindar independencia de movilidad para quien la use. El diseño contempla un sistema mecánico que se adapte a las ruedas para otorgar movilidad automática, un mecanismo que se incorpore en el asiento y espaldar de la silla para que mediante un sistema de transmisión de movimiento permita a esta cambiar de posición de sentado a de pie para facilitar el traslado del usuario de la silla a otro lugar, un sistema de control para la movilidad, un sistema de control y adquisición de posición para la transformación de la silla y una interfaz intuitiva desde la cual se pueda controlar todos los sistemas.



## CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1 Introducción

En este capítulo se especifica el fundamento teórico que respalda el diseño, construcción e implementación del proyecto; para ello se analizará los conceptos necesarios del área de mecánica, electrónica y control que intervendrán en el desarrollo.

Se especificará los términos que se usaran y sean de mención a lo largo del proyecto, se hará énfasis en los conceptos que serán necesarios para el desarrollo del proyecto.

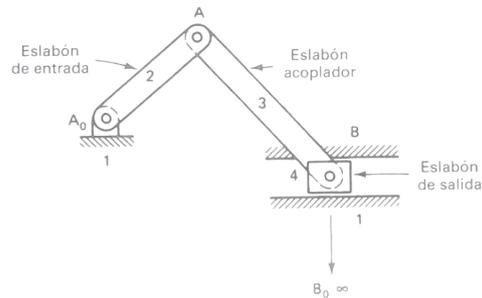
### 2.2 Sistemas mecánicos

En el presente apartado se analiza los conceptos básicos para el diseño de elementos de máquinas, sistema de transmisión de movimiento y sistemas de transmisión de potencia; se establece las relaciones entre los esfuerzos y teorías de falla, como también criterios de diseño y modelos matemáticos útiles al elaborar mecanismos y máquinas.

#### 2.2.1 Sistemas de transmisión de movimiento.

Dentro de los sistemas de transmisión de movimiento, existen distintos tipos de configuraciones entre articulaciones y eslabones que permiten transformar movimientos circulares en lineales y, al contrario. Entre estos tipos tenemos:

**Mecanismos biela, manivela, corredera**, este es un mecanismo típico de eslabones, en el cual un movimiento circular puede fácilmente convertirse en un movimiento lineal oscilatorio. Las ventajas que posee este son la facilidad de construcción e implementación. Este mecanismo es típico verlo en los motores de combustión interna, formando parte de los cigüeñales. Un ejemplo común se puede ver en la Figura 6.



**Figura 6 Mecanismos Biela, manivela, corredera**

**Fuente: (Erdman & Sandor, 2011)**

**Mecanismos de leva**, este mecanismo es de gran utilidad para controles precisos de movimiento, puede transformar un movimiento circular en un movimiento lineal con la peculiaridad que a diferencia del mecanismo biela, manivela, corredera, el movimiento no es estrictamente armónico, por lo que se puede diseñar levas con distintos comportamientos. Gracias a esta propiedad, sus aplicaciones son muy variadas, se usan, como ejemplo, en las válvulas de inyección de gasolina de los motores de los autos. Su fabricación es más complicada, y su costo más elevado por ello. Una leva típica se aprecia en la Figura 7.

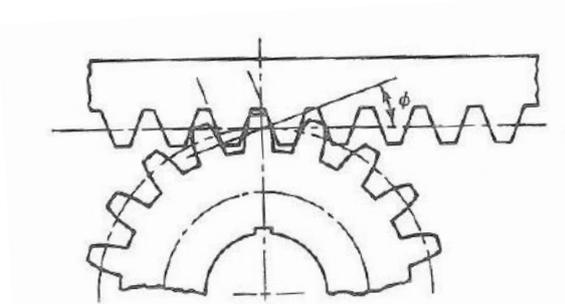


**Figura 7 Mecanismo leva**

**Fuente: (Myszka, 2011)**

**Mecanismos piñón cremallera**, este mecanismo es muy común para movimientos sencillos, usado en rieles, donde no hay exigencia de precisión, su costo es moderado por la fabricación del piñón y la cremallera, usado en

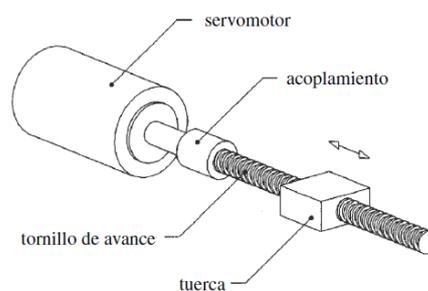
maquinarias industriales de gran tamaño. En la Figura 8 se puede apreciar el esquema de acople de un mecanismo piñón cremallera.



**Figura 8 Mecanismo piñón cremallera**

**Fuente: (Erdman & Sandor, 2011)**

**Mecanismos tornillo tuerca**, este es el mecanismo más común dentro de las máquinas de control numérico, dependiendo el tornillo que se use, se puede obtener una gran precisión de movimiento, su costo es variable dependiendo el tipo. Transforma movimiento circular en movimiento lineal. En la Figura 9 se aprecia el esquema de funcionamiento.



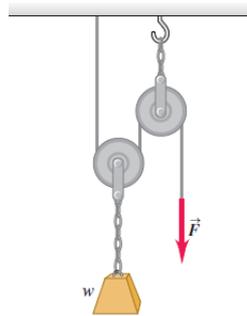
**Figura 9 Mecanismos tuerca tornillo**

**Fuente: (Norton, 2012)**

### 2.2.2 Sistemas de transmisión de potencia

Los mecanismos de transmisión de potencia se utilizan como complementos de los sistemas de transmisión de movimiento. Por lo general se busca obtener ventajas mecánicas de estos sistemas, o alteraciones a la velocidad. Entre estos mecanismos tenemos:

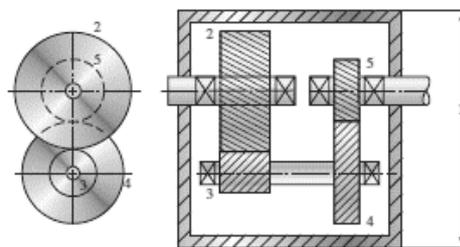
**Poleas**, los arreglos de poleas permiten obtener ventaja mecánica y también reducir o aumentar la velocidad de desplazamiento, por lo general su uso está ligado a movimientos lineales, pero si es adaptable para otros tipos de movimientos. En la Figura 10 se puede apreciar un arreglo de poleas típico, conocido también como polipasto.



**Figura 10 Tren de poleas**

**Fuente: (Hugh & Freedman, 2010)**

**Tren de engranes**, son usados para transmitir potencia, cuando los requerimientos son altos y se necesita precisión de velocidad. Sus aplicaciones típicas son cajas reductoras, donde se busca transmitir grandes cargas. En la Figura 11 se puede apreciar un tren de engranes típico.

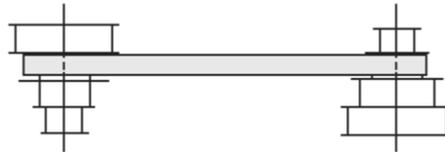


**Figura 11 Tren de engranes típico**

**Fuente: (Budynas & Nisbett, 2011)**

**Bandas**, elementos flexibles de transmisión de potencia, muy comunes en la industria, tienen la ventaja de transmitir potencia a distancias moderadas, a comparación de los engranes que se usan para transmitir potencia a ejes no muy distantes. Poseen la desventaja de un factor de deslizamiento, que reduce la precisión de la transmisión, su durabilidad es menor que los trenes

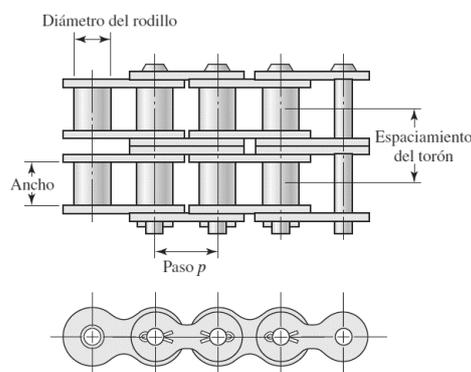
de engranes, pero sus aplicaciones, implementación y costos son mucho menores, al igual que su mantenimiento. En la Figura 12 se puede apreciar una transmisión variable de velocidad a base de bandas.



**Figura 12 Transmisión variable de velocidad**

**Fuente: (Budynas & Nisbett, 2011)**

**Cadenas**, pertenecen igualmente al grupo de elementos flexibles de transmisión de potencia, poseen la ventaja sobre las bandas de carecer de deslizamiento, por lo que su transmisión es más precisa y su relación de transmisión más confiable, no necesitan una tensión tan precisa como las bandas para funcionar, y pueden alcanzar longitudes superiores a las bandas. En la Figura 13 se puede apreciar la constitución típica de una cadena.



**Figura 13 Partes de las cadenas**

**Fuente: (Budynas & Nisbett, 2011)**

## 2.2.3 Conceptos de diseño de elementos de máquinas

### 2.2.3.1 Análisis de carga y esfuerzo

**Esfuerzo**, se le considera como la intensidad que posee una fuerza sobre un área, en concreto un plano específico de un elemento, esta fuerza tiene

una dirección y sentido sobre el plano y dependiendo de esta recibe un nombre. Para calcular el valor de este se toma en cuenta el cociente de la fuerza actuante sobre el diferencial de superficie.

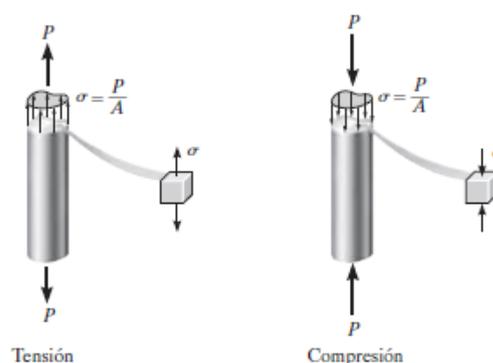
**Esfuerzo normal de tensión**, es el esfuerzo que actúa en dirección perpendicular al plano del elemento y posee un sentido de salida del elemento, se puede decir que es la fuerza que jala al elemento, para calcularla se utiliza la relación expresada en la Ec. 1.

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad \text{Ec. 1}$$

Donde

- $\sigma$  Esfuerzo normal
- $P$  Fuerza normal
- $A$  Área perpendicular

**Esfuerzo normal de compresión**, es el esfuerzo contrario al esfuerzo de tensión en su sentido, es decir que este esfuerzo tiende a empujar al elemento, su relación es la misma que el de tensión, con la diferencia que su signo es negativo. La diferencia entre ambos esfuerzos, se puede apreciar gráficamente en la Figura 14.



**Figura 14 Esfuerzos normales**

**Fuente: (Hibbeler, 2011)**

**Esfuerzo cortante promedio**, este esfuerzo es provocado por una fuerza perpendicular al eje axial de un cuerpo, es decir que es la fuerza aplicada

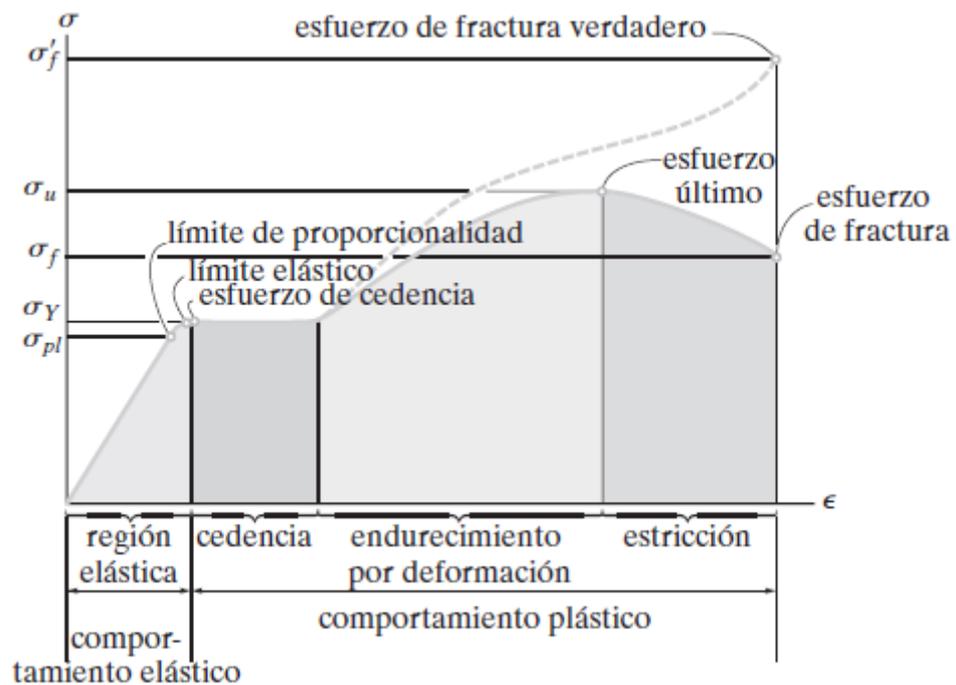
paralelamente al plano de sección de un cuerpo, está expresado mediante la ecuación Ec. 2.

$$\tau_{prom} = \frac{V}{A} \quad \text{Ec. 2}$$

Donde

$\tau_{prom}$  Esfuerzo cortante promedio  
 $V$  Fuerza cortante

**Esfuerzo permisible**, cada elemento posee distintos tipos de esfuerzos y distintos comportamientos a estos, dependiendo de la deformación que sufra el elemento, estas áreas son fácilmente identificables si se analiza en un diagrama el esfuerzo y la deformación unitaria, en la Figura 15 se puede apreciar estas zonas y sus esfuerzos. Se procura que un elemento de máquina se debe trabajar bajo las consideraciones de diseñar dentro de la región elástica de este, caso contrario que sucede en los procesos de manufactura.



**Figura 15 Diagrama esfuerzo- deformación y sus zonas**

**Fuente: (Hibbeler, 2011)**

Para el diseño se toma en cuenta un factor de seguridad, que permita realizar un trabajo con la tranquilidad que el elemento no fallará, este factor es variable dependiendo la aplicación y tiene una estrecha relación entre el esfuerzo de falla y el esfuerzo permisible, esta relación se la puede ver en la ecuación Ec. 3.

$$F. S. = \frac{\sigma_{falla}}{\sigma_{perm}} = \frac{\sigma_{pl}}{\sigma_{perm}} \quad \text{Ec. 3}$$

Donde

- $F.S. \text{ ó } n$  Factor de seguridad
- $\sigma_{falla}$  Esfuerzo de falla
- $\sigma_{pl}$  Esfuerzo máximo de zona elástica
- $\sigma_{perm}$  Esfuerzo permisible

**Deformación nominal,** Cuando se realiza un trabajo de carga, sea cual sea esta, sobre un elemento, este tiende a deformarse, para medirlo se utiliza la expresión de la ecuación Ec. 4.

$$\epsilon = \frac{\delta}{L_0} \quad \text{Ec. 4}$$

Donde

$\epsilon$  Deformación nominal  
 $\delta$  Cambio de longitud  
 $L_0$  Longitud inicial

**Ley de Hooke**, esta ley establece la relación entre la deformación y el esfuerzo, dentro de la zona elástica de los materiales, al ser esta zona lineal, se puede establecer una relación sencilla expresada mediante la ecuación Ec. 5, esta constante de Hooke, es variable entre cada material.

$$\sigma = E\epsilon \quad \text{Ec. 5}$$

Donde

$E$  Módulo de Young o módulo de elasticidad

**Número de Poisson**, la deformación de un material por lo general, no se la realiza en un solo sentido a pesar que sea solo una carga actuante en el cuerpo, en los esfuerzos en un plano. El número de Poisson establece la relación entre la deformación lateral y longitudinal de un cuerpo, mediante la expresión Ec. 6.

$$\nu = -\frac{\epsilon_{lat}}{\epsilon_{long}} \quad \text{Ec. 6}$$

Donde

$\nu$  Coeficiente de Poisson  
 $\epsilon_{lat}$  Deformación lateral  
 $\epsilon_{long}$  Deformación longitudinal

**Esfuerzo- deformación cortante**, en el caso de esfuerzo cortante, también se establece una relación lineal mediante la ecuación Ec. 7, y la constante de linealización está estrechamente relacionada con el módulo de elasticidad y el coeficiente de Poisson mediante la ecuación Ec. 8.

$$\tau = G\gamma \quad \text{Ec. 7}$$

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad \text{Ec. 8}$$

Donde

$G$  Módulo de rigidez o de elasticidad cortante  
 $\gamma$  Deformación cortante

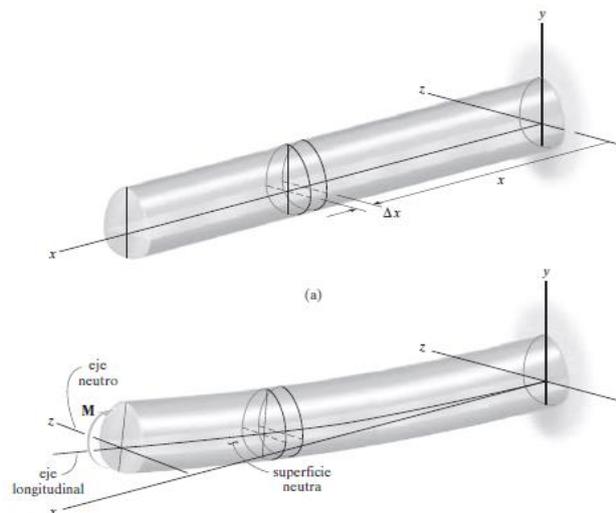
**Flexión**, se le conoce como esfuerzo de flexión al esfuerzo realizado por una fuerza perpendicular al eje axial de un cuerpo buscando flexionarlo o doblarlo, respecto a un punto de giro, como se puede ver en la Figura 16 Flexión de una barra

Fuente: Figura 16, la expresión que determina la flexión está determinada en la ecuación Ec. 9.

$$\sigma = \frac{Mc}{I} \quad \text{Ec. 9}$$

Donde

$M$  Momento resultante de la fuerza  
 $c$  Distancia perpendicular de la fibra al eje neutro  
 $I$  Momento de inercia del área de sección



**Figura 16 Flexión de una barra**

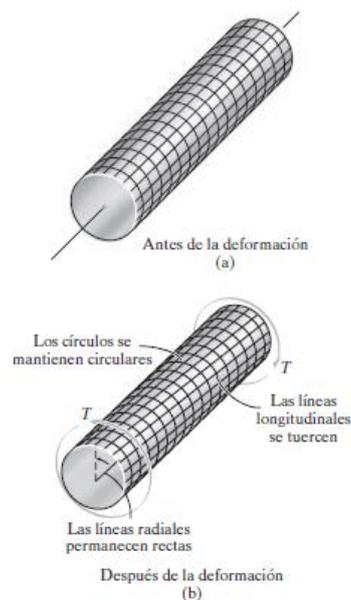
Fuente: (Hibbeler, 2011)

**Torsión**, el esfuerzo de torsión es el producido por un momento que actúa perpendicular al eje axial de un cuerpo, se puede decir que busca torcer el cuerpo, esto se puede apreciar en la Figura 17, y se puede expresar en la ecuación Ec. 10.

$$\tau = \frac{Tc}{J} \quad \text{Ec. 10}$$

Donde

- $\tau$  Esfuerzo de torsión
- $T$  Par de torsión o torque
- $c$  Distancia de la fibra al eje neutro
- $J$  Momento polar de inercia



**Figura 17 Efecto de torsión en un cuerpo**

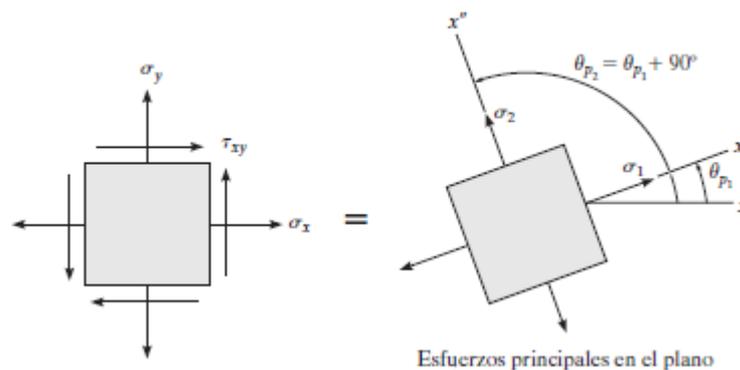
**Fuente: (Hibbeler, 2011)**

**Transformación del esfuerzo**, naturalmente un cuerpo no está sometido a un solo tipo de esfuerzo, sino a varios en distintas direcciones y sentidos, es por ello que es importante poder determinar los esfuerzos máximos o esfuerzos principales, estos se pueden encontrar mediante la ecuación Ec. 11, y representar mediante el estado de esfuerzos mostrados en la Figura 18.

$$\sigma_{1,2} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad \text{Ec. 11}$$

Donde

- $\sigma_{1,2}$  Esfuerzos principales 1 y 2
- $\sigma_x$  Esfuerzo en dirección de x
- $\sigma_y$  Esfuerzo en dirección de y
- $\tau_{xy}$  Esfuerzo cortante en el plano XY



**Figura 18 Transformación de esfuerzos**

**Fuente: (Hibbeler, 2011)**

De esta expresión se puede deducir el esfuerzo cortante máximo, que está expresado en la ecuación Ec. 12.

$$\tau_{m\acute{a}x} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad \text{Ec. 12}$$

Así mismo el esfuerzo promedio se puede expresar mediante la ecuación Ec. 13.

$$\sigma_{prom} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \quad \text{Ec. 13}$$

### 2.2.3.2 Fallas por carga estática

Es importante poder diseñar un sistema que no pueda fallar a cargas estáticas, para proteger la seguridad y la integridad humana, además de brindar una garantía de funcionamiento y una vida útil considerable a un equipo, por ello se han desarrollado distintas teorías de falla que pueden

prevenir daños. Así se establecerá las teorías de falla a usar. Hay que tomar en cuenta que la falla no solo se considera a la destrucción del material, rompimiento o fractura, sino también a la deformación plástica de este.

**Teoría del esfuerzo cortante máximo**, se establece que un elemento fallará, cuando alcance el esfuerzo cortante máximo correspondiente al material del que está constituido. De esta manera se establece que el elemento falla cuando se cumple la relación de la ecuación Ec. 14.

$$\tau_{m\acute{a}x} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \geq \frac{S_y}{2} \quad \text{Ec. 14}$$

Donde

$\tau_{m\acute{a}x}$  Esfuerzo cortante máximo  
 $S_y$  Resistencia a la fluencia

**Teoría de la energía de distorsión**, también conocida como la teoría de Von Mises, establece que el elemento falla cuando su energía de deformación iguala o supera a la del material del que está constituido. Esta relación está establecida en la ecuación Ec. 15, que al cumplirse se dice que el elemento falla. Se puede establecer el esfuerzo cortante equivalente, mediante la teoría de la energía de la distorsión mediante la ecuación Ec. 16.

$$\sigma' \geq S_y \quad \text{Ec. 15}$$

$$\sigma' = \left[ \frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad \text{Ec. 16}$$

Donde

$\sigma'$  Esfuerzo equivalente o von Mises  
 $\sigma_{1,2,3}$  Esfuerzos principales

La ecuación Ec. 16, está en función de los esfuerzos principales, si se desea establecer en sus coordenadas ortogonales XYZ, este esfuerzo equivalente se expresa mediante la ecuación Ec. 17.

$$\sigma' = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[ (\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2) \right]^{\frac{1}{2}} \quad \text{Ec. 17}$$

Donde

$\sigma_{x,y,z}$  Esfuerzo en dirección X, Y o Z  
 $\tau_{xy,yz,zx}$  Esfuerzo cortante en el plano XY, YZ o ZX

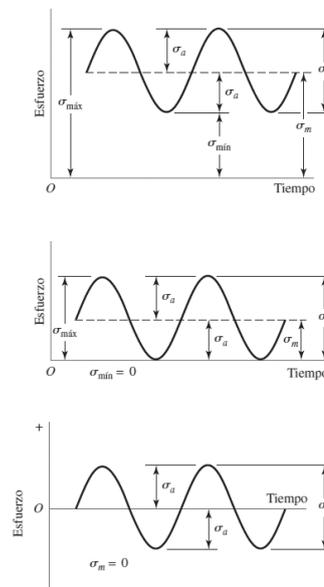
Para el esfuerzo plano se establece la relación Ec. 18 para esfuerzos principales, y la relación Ec. 19 para esfuerzos en el plano XY.

$$\sigma' = (\sigma_1^2 - \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2)^{\frac{1}{2}} \quad \text{Ec. 18}$$

$$\sigma' = (\sigma_x^2 - \sigma_x\sigma_y + \sigma_y^2 + 3\tau_{xy}^2)^{\frac{1}{2}} \quad \text{Ec. 19}$$

### 2.2.3.3 Diseño de ejes

Para el diseño de ejes es importante identificar los tipos de esfuerzo a lo largo del tiempo que pueden sufrir los ejes, en la Figura 19 se puede apreciar los esfuerzos que pueden suscitarse en un trabajo mecánico.



**Figura 19 Tipos de esfuerzo**

**Fuente: (Budynas & Nisbett, 2011)**

Al diseñar ejes, lo primordial es la búsqueda del diámetro al cual el eje no falla, y mediante el criterio de falla de Goodman, este se establece mediante la ecuación.

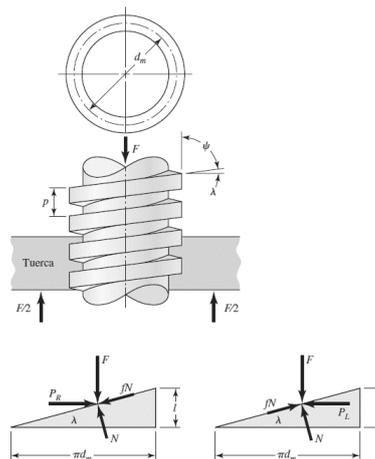
$$d = \left( \frac{16n}{\pi} \left\{ \frac{1}{S_e} [4(M_a)^2 + 3(T_a)^2]^{\frac{1}{2}} + \frac{1}{S_{ut}} [4(M_m)^2 + 3(T_m)^2]^{\frac{1}{2}} \right\} \right)^{\frac{1}{3}} \quad \text{Ec. 20}$$

Donde

- $d$  Diámetro de eje
- $n$  Factor de seguridad
- $S_e$  Resistencia equivalente
- $S_{ut}$  Resistencia última
- $M_a$  Esfuerzo flector alternante
- $T_a$  Esfuerzo cortante alternante
- $M_m$  Momento flector medio
- $T_m$  Esfuerzo flector medio

#### 2.2.3.4 Sujeción mecánica

Dentro de la sujeción mecánica es muy importante el análisis de los tornillos de potencia, elementos que contribuyen a la transmisión de movimiento, las partes que lo constituyen se puede ver en la Figura 20.



**Figura 20 Partes de un tornillo de potencia y sus fuerzas**

**Fuente: (Budynas & Nisbett, 2011)**

Donde

$F$	Carga
$p$	Paso del tornillo
$\lambda$	Ángulo de hélice
$fN$	Fuerza de rozamiento
$N$	Fuerza normal
$P_R$	Fuerza de subida de carga
$P_L$	Fuerza de bajada de carga
$d_m$	Diámetro medio

Entonces, en base a las reacciones sobre un tornillo de potencia, se puede establecer los pares necesarios para elevar la carga (ecuación Ec. 21) y para bajar la carga (ecuación Ec. 22).

$$T_R = \frac{F d_m}{2} \left( \frac{l + \pi f d_m}{\pi d_m - fl} \right) \quad \text{Ec. 21}$$

$$T_L = \frac{F d_m}{2} \left( \frac{\pi f d_m - l}{\pi d_m + fl} \right) \quad \text{Ec. 22}$$

Donde

$T_R$	Par de subida de carga
$T_L$	Par de bajada de carga

### 2.2.3.5 Cojinetes

Los cojinetes son elementos mecánicos que ayudan a eliminar la fricción y evitar pérdidas de energía en elementos de rotación, como ejes, existen de distintos tipos, dependiendo de su aplicación. Los cilíndricos son usados para soportar cargas radiales, mientras que los cónicos soportan cargas axiales. Los de bolas pueden soportar ambas cargas si son moderadas.

En los cojinetes de bolas, se busca establecer la clasificación de catálogo en base a la carga que soporta el cojinete. Esto se obtiene mediante la relación Ec. 23.

$$C_{10}(L_R n_R 60)^{\frac{1}{a}} = F_D (L_D n_D 60)^{\frac{1}{a}} \quad \text{Ec. 23}$$

Donde

$C_{10}$	Clasificación de catálogo
$F_D$	Carga deseada

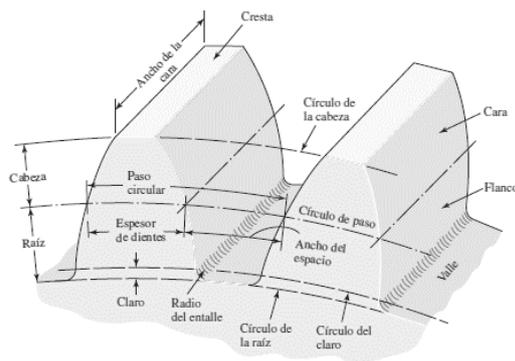
$L_R$	Vida nominal en horas
$L_D$	Vida deseada
$n_R$	Revoluciones nominal rpm
$n_D$	Revoluciones deseadas
$a = 0.3$	Para cojinetes de bolas
$a = \frac{10}{3}$	Para cojinetes de rodillos

Según los catálogos de SKF, la vida y revoluciones nominales ya están establecidas, por lo que la ecuación para rodamientos SKF, queda determinada como Ec. 24.

$$C_{10} = F_D \left( \frac{L_D n_D 60}{10^6} \right)^{\frac{1}{a}} \quad \text{Ec. 24}$$

### 2.2.3.6 Engranés

El diseño de engranes es un tema complejo, se necesita establecer varios valores de constantes que ayuden a la manufactura y resistencia de estos. Primeramente, hay que establecer las relaciones de sus partes que se aprecian en la Figura 2.2.21.



**Figura 2.2.21 Partes de un engrane**

**Fuente: (Budynas & Nisbett, 2011)**

Las ecuaciones que determinan las relaciones, se detallan a continuación:

$$P = \frac{N}{d} \quad \text{Ec. 25}$$

$$m = \frac{d}{N} \quad \text{Ec. 26}$$

$$p = \frac{\pi d}{N} = \pi m \quad \text{Ec. 27}$$

$$pP = \pi \quad \text{Ec. 28}$$

Donde

- $P$  Paso diametral
- $N$  Número de dientes
- $d$  Diámetro de paso
- $m$  Módulo, mm
- $p$  Paso circular

Para el diseño se toma en cuenta las fórmulas de la AGMA, de la cual el esfuerzo de flexión se expresa mediante la ecuación Ec. 29 y el esfuerzo de contacto o picadura se expresa mediante la ecuación Ec. 30.

$$\sigma = W^t K_o K_v K_s \frac{P_d K_m K_B}{F J} \quad \text{Ec. 29}$$

$$\sigma_c = C_p \sqrt{W^t K_o K_v K_s \frac{K_m C_f}{d_p F I}} \quad \text{Ec. 30}$$

Donde

- $\sigma$  Esfuerzo de flexión
- $W^t$  Carga tangencial
- $K_o$  Factor de sobrecarga
- $K_v$  Factor dinámico
- $K_s$  Factor de tamaño
- $P_d$  Paso diametral
- $F$  Ancho de cara
- $K_m$  Factor de distribución de carga
- $K_B$  Factor de espesor de aro
- $J$  Factor geométrico de resistencia a la flexión
- $\sigma_c$  Esfuerzo de contacto
- $C_p$  Coeficiente elástico
- $C_f$  Factor superficial
- $d_p$  Diámetro de paso
- $I$  Factor geométrico de resistencia a la picadura

Las constantes de estas ecuaciones, se expresan mediante las siguientes relaciones.

**Factor dinámico**

$$K_v = \left( \frac{A + \sqrt{V}}{A} \right)^B \quad \text{Ec. 31}$$

Para

$$A = 50 + 56(1 - B)$$

$$B = 0.25(12 - Q_v)^{\frac{2}{3}} \quad \text{Ec. 32}$$

Donde

$K_v$  Factor dinámico  
 $V$  Velocidad en pie/min  
 $Q_v$  Número de calidad

**Factor de relación de la dureza**

$$C_H = 1 + A'(m_G - 1) \quad \text{Ec. 33}$$

Para

$$A' = 8.98(10^{-3}) \left( \frac{H_{BP}}{H_{BG}} \right) - 8.29(10^{-3}).2$$

Donde

$C_H$  Factor de relación de la dureza  
 $H_{BP}$  Dureza Brinell del piñón  
 $H_{BG}$  Dureza Brinell de la corona

**Factor de espesor del aro**

$$m_B = \frac{t_g}{h_t} \quad \text{Ec. 34}$$

Para

$$K_B = \begin{cases} 1.6 \ln \left( \frac{2.242}{m_B} \right) & m_B < 1.2 \\ 1 & m_B \geq 1.2 \end{cases} \quad \text{Ec. 35}$$

Donde

$K_B$  Factor de espesor del aro

$t_g$  Espesor del aro bajo el diente  
 $h_t$  Profundidad total

### Factor de seguridad en flexión

$$S_F = \frac{S_t Y_N}{K_t K_R \sigma} \quad \text{Ec. 36}$$

Donde

$S_t$  Esfuerzo de flexión permisible  
 $Y_N$  Factor de ciclos de esfuerzo  
 $K_t$  Factor de temperatura  
 $K_B$  Factor de confiabilidad  
 $S_F$  Factor de seguridad

### Factor de seguridad de contacto

$$S_H = \frac{S_c Z_N C_H}{K_t K_R \sigma_c} \quad \text{Ec. 37}$$

Donde

$S_c$  Esfuerzo de contacto permisible  
 $Z_N$  Factor de vida de ciclos  
 $C_H$  Factores de relación de dureza  
 $K_t$  Factor de temperatura  
 $K_R$  Factor de confiabilidad  
 $S_H$  Factor de seguridad

## 2.3 Procesos de manufactura

En el presente apartado se analiza los conceptos básicos de los procesos de manufactura, y los materiales posibles a ser usados. Se analiza especialmente los procesos específicos que se usarán, además de sus análisis correspondientes de requerimientos.

## 2.3.1 Proceso de trabajo metálico en láminas

### 2.3.1.1 Materiales en lámina

Los materiales que son posibles forjarse o elaborarse como lámina mecánica son muy variados, ya que la mayor parte de aleaciones pueden ser elaboradas en este producto. Entre estos materiales se enlistará a continuación, los más comunes en distintas categorías.

- Aceros al bajo carbono: Estos aceros son caracterizados principalmente por que no poseen más allá de 0.15% de carbono, su aplicación general es para la fabricación de tuberías y elementos estructurales. Entre estos tenemos tres tipos de aceros:
  - Aceros efervescentes. Posee una superficie de bajo carbono, son propicios para los embutidos, y brinda ventajas de esmaltado.
  - Acero calmado. Un acero que es especialmente bueno en estirados y embutidos altos, a diferencia del acero efervescente, supera el envejecimiento por deformación.
  - Acero libre de impurezas intersticiales. Posee la característica que en el punto de fluencia no muestra cedencia, sus niveles de carbono son muy bajos.
- Aceros de alta resistencia. Estos aceros son el resultado de la necesidad de aplicaciones ligeras y extra fuertes, para obtener la resistencia deseada se usan varios procesos de fabricación que determina el tipo de acero.
  - Conformado en frío. Luego del proceso de laminado común, se le aplica deformación en frío para aumentar su resistencia mecánica, la desventaja que posee es que su ductilidad se reduce considerablemente.
  - Recocido parcial. Para la obtención de una dureza fuerte y una ductilidad que sea considerable, se realiza un trabajo en

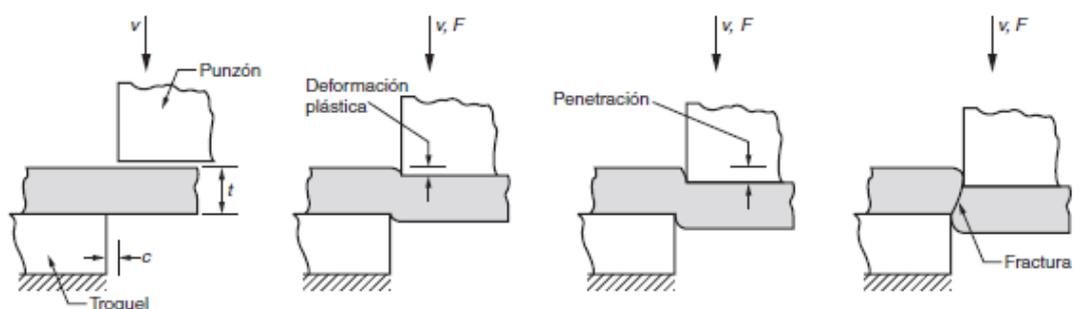
- frío extenso, para luego proceder con un recocido que recupere un poco la ductilidad.
- Recocido total. El proceso es similar al recocido parcial, con la diferencia que al final el recocido se lo realiza durante la recristalización del material.
  - Endurecimiento por solución. Este proceso consiste en una solución de manganeso, fósforo o silicio, para endurecerlo más rápido.
  - Endurecimiento al horno. Consiste en una ventaja mecánica durante la pintura al horno, de esta manera y en presencia de carbono y nitrógeno se busca fortalecer la resistencia aprovechando el envejecimiento por deformación.
- Aceros recubiertos. Para mejorar las propiedades de las láminas sin realizar procesos térmicos sobre los ceros, se usa técnicas de recubrimiento que aumentan considerablemente las propiedades no solo de resistencia del material, entre estos existen:
    - Hojalata. Su aplicación es fundamental en la industria alimenticia, ya que se aprovecha su baja toxicidad. Para obtenerlo se aplica una capa de estaño que aparte es anticorrosivo y evita la oxidación del acero.
    - Galvanizado. Es uno de los procesos más utilizados, especialmente en los electrodomésticos y en las carrocerías de autos. Consiste en recubrir al acero con zinc, para ello existen variados métodos que van desde el sumergimiento de la lámina en zinc hirviendo, a otros más comunes como el electro galvanizado. Posee la ventaja de ser anticorrosivo.
    - Recubrimiento de aluminio. Este proceso se lo realiza para evitar la corrosión que pueda provenir de gases, o altas temperaturas, como por ejemplo los tubos de escape de los autos.

- Aceros inoxidables. Estos aceros, que provienen de una aleación especial, los convierten en la mejor opción cuando se trata de tratamiento de alimentos y químicos, posee un elevado costo que se compensa con sus propiedades anticorrosivas y de alta ductilidad.<sup>1</sup>

### 2.3.1.2 Cizallado

Este es el proceso en el que se corta las láminas de acero, independientemente del material y del espesor de la lámina. La herramienta más usual es la guillotina. El corte es simple y en línea recta.

Este proceso no es catalogado como proceso de deformación plástica ni como proceso de remoción de material, contrario a lo que es visible, la superficie de corte no es perpendicular a la lámina, pero su inclinación es aceptable, por ello después de un proceso de cizallado, es recomendable complementar con un proceso de esmerilado o doblado que permita eliminar las rebabas y los filos vivos de las láminas. Su principio se aprecie en la Figura 22.



**Figura 22 Cizallado de lámina**

**Fuente: (Groover, 2012)**

La perfección del corte depende en gran medida en la separación que posean las cuchillas, no pueden estar ni muy pegadas ni muy separadas. Para

<sup>1</sup> (Schey, 2012)

ello y bajo práctica se ha determinado que el espesor útil va entre el 4 y 12% de espesor de la lámina. Mientras más dúctil sea el material, se procura un espesor menor.

Para calcular la fuerza necesaria para realizar un corte de lámina, basta con aplicar principios de fuerza cortante, tomando en cuenta que mientras avanza el corte se reduce el esfuerzo, se usa una constante para determinar la fuerza promedio. En conclusión, la fuerza necesaria se exprese mediante la ecuación Ec. 38.

$$P_s = C_1 * TS * hl = C_1 K \left(\frac{n}{e}\right)^n hl \quad \text{Ec. 38}$$

Donde:

$P_s$	Fuerza necesaria
$C_1$	Constante de corrección
$TS$	Resistencia a la tensión
$h$	Espesor de la lámina
$l$	Longitud de carrera
$K$	Coefficiente de resistencia
$n$	Exponente de endurecimiento
$e$	Base de logaritmo natural

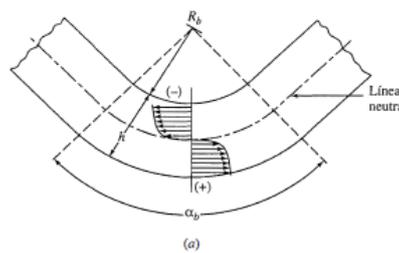
La constante de corrección depende del material, pero se establece 0.85 para aceros dúctiles y 0.65 para frágiles.

### 2.3.1.3 Doblado

Este es un proceso de deformación plástica permanente de materiales, especialmente dedicado sobre láminas, donde juega un papel importante la anisotropía de los materiales y las fibras externas de estos. Su base de funcionamiento es el ejercer un esfuerzo de tensión lo suficientemente grande para trabajar en el área de deformación plástica de diagrama esfuerzo-

deformación; pero evitando no llegar al esfuerzo de tensión último ni tampoco la deformación de ruptura.

La deformación en la línea neutra de los materiales es teóricamente nula, pero en casos donde las láminas son delgadas, esta línea neutra es desplazada. Las fibras externas más lejanas a la línea neutra son las que presenta una mayor deformación como se aprecia en la.



**Figura 23 Esfuerzo transversal en doblado**

**Fuente: (Schey, 2012)**

Aunque el proceso de doblado parezca sencillo, existen límites dependiendo de los materiales, entre ellos son los radios mínimos de doblado, para evitar la fractura que se expresa mediante la ecuación Ec. 39 y Ec. 40

$$R_b = h \left( \frac{1}{2q} \right) - 1 \text{ para } q < 0.2 \quad \text{Ec. 39}$$

$$R_b = h \left( \frac{(1-q)^2}{2q-q^2} \right) \text{ para } q > 0.2 \quad \text{Ec. 40}$$

Donde

$R_b$  Radio de doblado  
 $q$  Reducción de área transversal

La recuperación elástica es un problema dentro del doblado de láminas, teniendo que elaborar matrices con radios distintos a los finales y ángulos de doblado ligeramente variables al deseado para ello se refina los valores mediante la ecuación Ec. 41 para el radio y la ecuación Ec. 42 para el ángulo.

$$\frac{R_b}{R_f} = 1 - 3 \left( \frac{R_b}{h} * \frac{Y_s}{E} \right) + 4 \left( \frac{R_b}{h} * \frac{Y_s}{E} \right)^3 \quad \text{Ec. 41}$$

$$\alpha_f \left( R_f + \frac{h}{2} \right) = \alpha_b \left( R_b + \frac{h}{2} \right) \quad \text{Ec. 42}$$

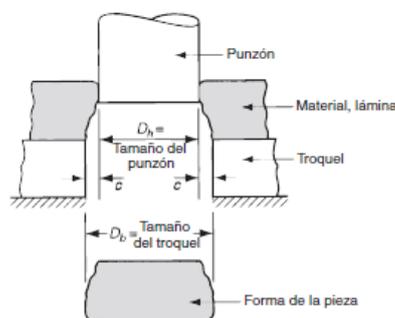
Donde

- $R_f$  Radio de la pieza
- $R_b$  Radio de la matriz
- $Y_s$  Esfuerzo de fluencia
- $E$  Módulo de Young
- $\alpha_f$  Ángulo final de pieza
- $\alpha_b$  Ángulo de matriz

#### 2.3.1.4 Punzonado

El punzonado es un proceso de manufactura usado comúnmente para realizar agujeros sencillos y de formas complejas sobre láminas. Su ventaja es que en gran escala ahorran mucho tiempo, aparte que se puede hacer una gran variedad de tamaños de agujeros.

Las consideraciones que se deben tomar con el punzonado dependen del diseño de troquel y matriz. El troquel es la matriz que posee el agujero a hacerse y el punzón es la herramienta de corte que entra en el troquel con una tolerancia que permite el corte de la lámina. Sus geometrías son similares como se puede apreciar en la Figura 24, los materiales en los que son elaborados por lo general son aceros de alta dureza.



**Figura 24 Tamaños de troquel y punzón**

**Fuente: (Groover, 2012)**

Para los diseños de troquel y punzón se toma en cuenta varias tolerancias que determinan los tamaños y espaciados necesarios en base del material, para ello se toma en cuenta la ecuación

$$C = A_c t \quad \text{Ec. 43}$$

Donde

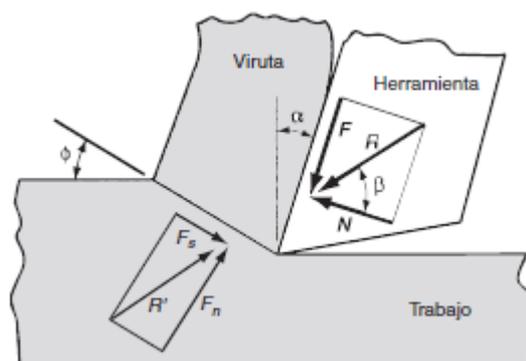
- $C$  Espaciado entre troquel y punzón
- $A_c$  Tolerancia de espacio
- $t$  Espesor del material

### 2.3.2 Operaciones de maquinado

Los procesos de remoción de material poseen la ventaja de obtener con una sola herramienta formas deseadas, aparte poseen un excelente acabado superficial. Estos procesos son útiles en piezas que no son fabricadas en serie y necesitan una alta precisión.

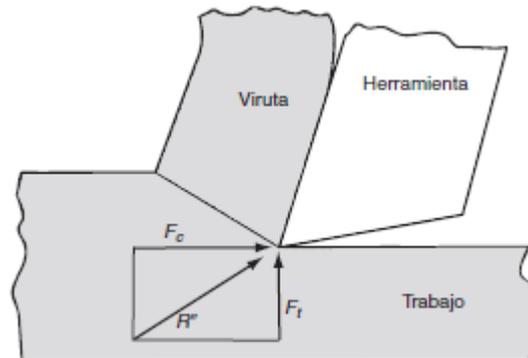
#### 2.3.2.1 Fuerzas de corte

Aunque existe una gran variedad de posibles formas de corte, para el estudio de estas, se procede a idealizar el proceso de tal forma que se pueda analizar y determina los parámetros necesarios de operación de maquinaria. En la Figura 25 se puede ver las fuerzas que actúan sobre la pieza, mientras que en la Figura 26 se aprecia las fuerzas sobre la herramienta.



**Figura 25 Fuerzas sobre pieza de trabajo**

**Fuente: (Groover, 2012)**



**Figura 26 Fuerzas sobre herramienta**

**Fuente: (Groover, 2012)**

De la geometría de las fuerzas, se puede estimar mediante la ecuación Ec. 44, la fuerza de corte necesaria. Que está en función de la acción sobre la herramienta. Ya que esta será la que tiene que ser dimensionada.

$$F_c = \frac{TS * t_0 * w * \cos(\beta - \alpha)}{\sin(\phi) \cos(\phi + \beta - \alpha)} \quad \text{Ec. 44}$$

Donde

- $F_c$  Fuerza de corte
- $t_0$  Profundidad de corte
- $w$  Ancho de corte
- $\phi$  Ángulo de corte
- $\beta$  Ángulo de fricción
- $\alpha$  Ángulo de ataque

Obtenida la fuerza de corte, es necesario obtener la potencia, para dimensionar la carga de la máquina que realizará el corte, esta potencia está expresada en la ecuación Ec. 45.

$$P_c = F_c v \quad \text{Ec. 45}$$

Donde

- $P_c$  Potencia de corte
- $v$  Velocidad de corte

Está acostumbrado a medir la potencia en unidades inglesas, por lo que la modificación de la ecuación Ec. 45 quedaría expresada en la ecuación Ec. 55.

$$HP_c = \frac{F_c v}{33000} \quad \text{Ec. 46}$$

Donde

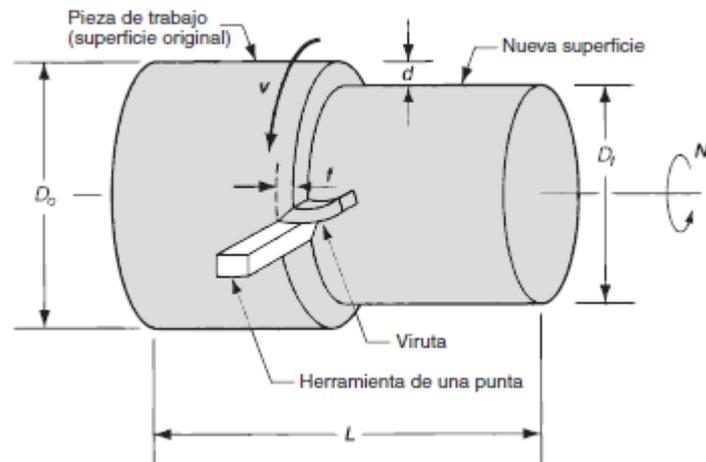
$HP_c$  Potencia de corte, caballos de fuerza

### 2.3.2.2 Torneado

El torneado es un proceso de manufactura que consiste en la remoción de material de una pieza que se encuentra en rotación. Mediante este proceso se puede realizar varias operaciones, las cuales son:

- Refrendado. Consiste en aplanar la cara libre de la pieza.
- Biselado. Consiste en realizar un corte inclinado pequeño en el borde de la pieza.
- Tronzado. Esta operación corta por todo el ancho de la pieza, dividiéndola en dos.
- Roscado. Realiza mediante una herramienta de punta estándar, la rosca en la pieza.
- Perforado. Se realiza con la inserción de una punta en la pieza, paralelamente a la rotación de la pieza.
- Torneado de contorno. Realiza un corte a lo largo de la pieza, dando la forma deseada, esta es la operación más común.

Los parámetros que se aplican al torno, dependen de la geometría que posea la pieza de trabajo, esta geometría se puede apreciar en la Figura 27



**Figura 27 Operación de torneado**

**Fuente: (Groover, 2012)**

El parámetro principal que se debe obtener, es el número de revoluciones con el que gira el tambor del torno, para ello se establece la ecuación Ec. 47.

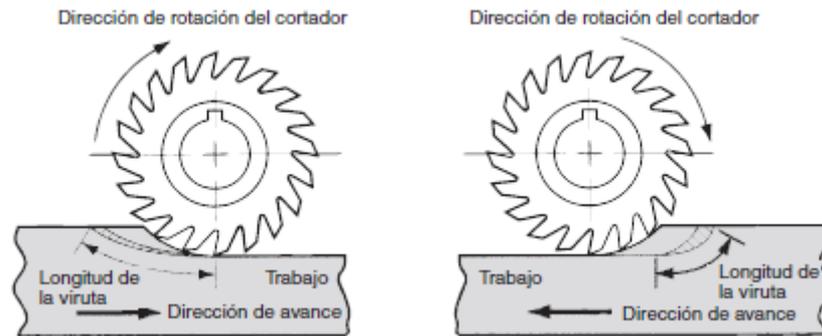
$$N = \frac{v}{\pi D_0} \quad \text{Ec. 47}$$

Donde

- $N$     Revoluciones del torno
- $D_0$     Diámetro inicial de la pieza

### 2.3.2.3 Fresado

Este proceso de manufactura es inverso al torneado, ya que en este la pieza de trabajo gira y la herramienta se mantiene fija; en el fresado la pieza de trabajo se mantiene fija mientras que la herramienta gira. A diferencia del torneado, la herramienta puede tener varios perfiles de corte o cuchillas, dependiendo la aplicación. Su principio de trabajo se puede apreciar en la Figura 28.



**Figura 28 Tipo de fresado**

**Fuente: (Groover, 2012)**

Al igual que el torneado, existe una variedad de operaciones realizables, dependiendo del avance de la herramienta y del tipo de fresa usado, entre estas operaciones, las principales son:

- Fresado frontal total. En esta operación la fresa es de mayor tamaño que la pieza y reduce toda la cara de la pieza.
- Fresado frontal parcial. La fresa trabaja sobre una parte de la cara de la pieza.
- Fresado de ranura. La fresa es de menor tamaño, introduciéndose en la pieza de manera que forma un canal en la pieza.
- Fresado de agujero. La fresa ingresa en la cara de la pieza y forma cavidades dentro de esta.

El parámetro deseado a obtener en este proceso, es la velocidad de giro de la fresa, para esto se calcula en base a la velocidad de corte, mediante la ecuación Ec. 48.

$$N = \frac{v}{\pi D} \quad \text{Ec. 48}$$

Donde

$D$  Diámetro de fresa

#### **2.3.2.4 Procesos de control numérico**

Mediante el uso de las computadoras y el control digital, se ha logrado implementar sistemas de fabricación y manufactura flexibles. Los procesos tradicionales como el torneado y fresado se han embebido en un solo sistema, mediante la incursión de las máquinas CNC, estas consisten en la automatización de los tornos y fresas, para poder obtener piezas de mayor precisión, al reducir las tolerancias de avances y profundidades de corte, así como el control más preciso de velocidades de corte y rotación de pieza y herramienta. De esta manera piezas complejas que tomaban horas en realizarse y varios procesos, pueden resumirse en menor tiempo y en un solo proceso, sin la necesidad de cambiar de máquina, con mejores tolerancias, acabados y formas.

Para la implementación de un proceso de control numérico, se necesita primeramente establecer un diseño CAD, que luego debe traducirse en código G, o ser asistido mediante software CAM, el cual permite la fabricación de manera más sencilla.

#### **2.3.3 Procesos de unión y ensamble**

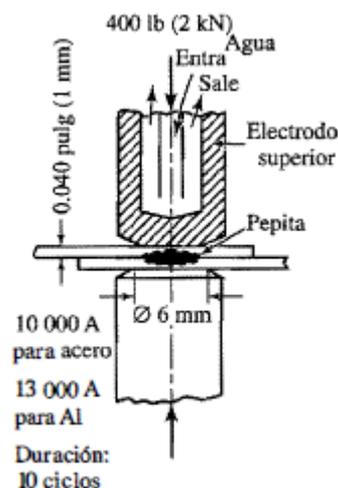
Dentro de los procesos de unión y ensamble que se analizará en este apartado, se pondrá énfasis en la soldadura, ya que los procesos de empernados y otros tipos de unión se analizaron en la sección Conceptos de diseño de elementos de máquinas. La variedad de procesos de soldadura es muy extensa, así que se explicará los procesos más comunes y de fácil acceso en el mercado nacional para la elaboración de máquinas.

##### **2.3.3.1 Soldadura por resistencia**

Este proceso de unión tiene el principio básico de juntar dos placas metálicas y hacer pasar a través de ellas una corriente alterna, de manera que genere el calor suficiente para fusionar las secciones sobre las que se aplicó la corriente. Para ello se usa puntos de contacto focalizados a alta presión que

permiten concentrar la fusión y reducir la resistencia para que la soldadura sea más uniforme. Por lo general, los voltajes aplicados para la soldadura por resistencia son muy bajos (rango de 10 a 30 voltios), pero con corrientes que pueden rodear los 15000 amperios.

El proceso es sencillo, la máquina de soldadura posee dos electrodos que están conectados a un transformador que reduce el voltaje; mediante una palanca se aplica una presión uniforme que une estos contactos. En medio de los electrodos se colocan las placas a ser soldadas, traslapadas, por lo general es un proceso para láminas delgadas. Se aplica la presión necesaria por un periodo corto de tiempo, lo que logra fusionar las placas. Como se ve en la Figura 29. Es importante tomar en cuenta el tiempo de aplicación de la presión, ya que un tiempo prolongado provocará una fundición excesiva que provocará grietas y agujeros en las placas; y un tiempo muy corto no permitirá una fusión completa dando como resultado una soldadura débil.



**Figura 29 Ejemplo de soldadura por resistencia**

**Fuente: (Schey, 2012)**

### 2.3.3.2 Soldadura por arco eléctrico

La soldadura por arco eléctrico es la soldadura más común dentro de los trabajos de metalmecánica, por su facilidad de operación y su bajo costo

relativo de equipos y electrodos. Este proceso consiste en mantener un arco eléctrico entre las piezas de trabajo y el electrodo, lo suficientemente constante para generar el calor que provoque la fusión de los elementos. En algunos casos es necesario un material de aporte y en otros no, dependiendo de la aplicación. Podemos dividir los tipos de soldadura en dos grandes grupos, los de electrodo no consumible y los de electrodo consumible.

### **SOLDADURA POR ELECTRODO NO CONSUMIBLE**

La característica principal de estos procesos, es que el electrodo no se funde, entonces el material de soldadura proviene de la fundición de las placas bases, como es el ejemplo de la soldadura oxiacetilénica, o en otros casos para placas demasiado gruesas se usa material de aporte que puede provenir de una varilla. Existen varios tipos de este tipo de soldadura, los cuales son:

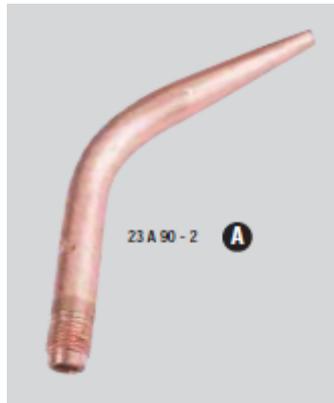
- TIG, o soldadura de arco por electrodo de tungsteno y gas inerte, es un tipo de soldadura que por lo general usa argón para proteger al electrodo. Se caracteriza por poseer una baja penetración, haciéndola ideal para soldadura de tubos y placas metálicas, y usa menor voltaje que otros tipos de soldadura. Su desventaja principal es el costo de los electrodos de tungsteno alto, y su baja velocidad de soldado. En la Figura 30 se puede ver boquillas típicas de soldadura.



**Figura 30 Pistolas para TIG**

**Fuente: (INDURA, 2014)**

- CAW. Este proceso es semejante al proceso TIG, solo que en este caso se usa un electrodo de carbono para generar el arco con la pieza e trabajo.
- OAW. Conocida también como soldadura oxiacetilénica o autógena, esta no usa arco eléctrico, sino que, mediante el calor generado por la combustión del oxígeno con algún gas comburente, como lo es el acetileno o el carbono, provoca la fundición de los elementos. En algunos casos, si las piezas de trabajo son de gran espesor, se usan varillas de aporte de material. En la Figura 31 se puede ver una boquilla típica de soldadura OAW.



**Figura 31 Boquilla OAW**

**Fuente: (INDURA, 2014)**

## **SOLDADURA POR ELECTRODO CONSUMIBLE**

En este proceso el electrodo pasa a ser parte de la unión de las piezas de trabajo, ciertamente el material del electrodo es diferente a las piezas base, pero bajo catálogos se puede revisar que materiales son más óptimos en las aplicaciones necesarias. Los procesos más comunes de electrodo consumible son:

- MIG. Este proceso es muy popular en los procesos de metalmecánica en el país, por su facilidad de procedimiento y su excelente acabado superficial. En este proceso el electrodo es suministrado en forma de alambre por medio de una pistola, que

aparte recubre la soldadura con gas para evitar la rápida oxidación de los elementos. Por lo general el gas usado para este proceso es dióxido de carbono. En la Figura 32 se puede apreciar el equipo completo necesario para esta soldadura.



**Figura 32 Equipo de soldadura MIG**

**Fuente: (INDURA, 2014)**

- SMAW. Este proceso es el más común, debido a su bajo costo en los equipos y electrodos. En este proceso se usa varillas recubiertas que son sostenidas por una pinza, esta está unida a uno de los electrodos de la máquina, mientras que las piezas de trabajo son conectadas con la masa de la máquina, para de esa forma cerrar el circuito eléctrico y generar el arco de soldadura. Existen varios tipos de electrodos dependiendo la aplicación, y el recubrimiento que poseen cumple el mismo trabajo que el gas en la soldadura MIG, su principal desventaja es el tamaño de los electrodos que no puede ser superior a 450 mm, debido al recubrimiento frágil, por lo que esta operación es netamente manual. En la Figura 33 se puede apreciar el equipo necesario para este tipo de soldadura.



**Figura 33 Equipo SMAW**

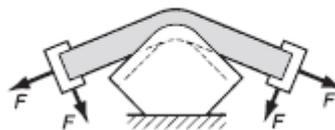
**Fuente: (INDURA, 2014)**

#### **2.3.4 Doblado en material tubular**

Existen varios métodos para el formado de estructuras a partir de tubería metálica. El doblado de tubos es una de las operaciones más habituales en la manufactura. Este proceso tiene la desventaja que existe una deformación irregular. Al estirarse las fibras externas del tubo y comprimirse las internas, produce un aplastamiento perpendicular al giro de doblado.

Entre los diversos métodos de doblado tenemos:

- Estirado. En este proceso, se toma al tubo con agarraderas por los extremos y se procede a aplicar una fuerza contraria, que provoque un esfuerzo de tensión, mientras se deforma conforme a una matriz que posee el ángulo deseado, así como se ve en la Figura 34.

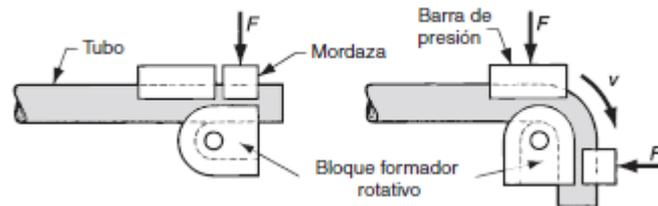


**Figura 34 Estirado de tubo**

**Fuente: (Groover, 2012)**

- Arrastre. Es un proceso semejante al estirado, solo que se aplica fuerza axial solo en un extremo mediante la rotación de la mordaza

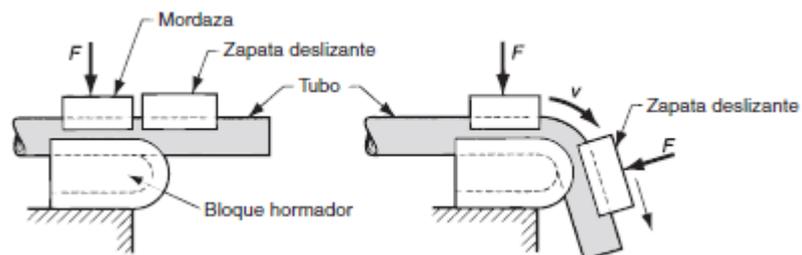
de un solo extremo que provoca el efecto de arrastramiento del tubo, así como se ve en la Figura 35.



**Figura 35 Arrastrado de tubo**

**Fuente: (Groover, 2012)**

- **Compresión.** Este caso se basa en el ejercer fuerza sobre el tubo que se debe encontrar sobre un bloque hormador. Por un lado, se ejerce presión para sostener al tubo, mientras que por el otro se ejerce fuerza sobre una zapata que hace encajar al tubo en el bloque, así como se ve en la Figura 36.



**Figura 36 Doblado por compresión de tubos**

**Fuente: (Groover, 2012)**

## 2.4 Sistemas eléctricos/ electrónicos

En el presente apartado se especifica términos y conceptos eléctricos y electrónicos, usados a lo largo del proyecto, se busca enfatizar en los fundamentos teóricos aplicables.

## 2.4.1 Fundamentos básicos de electricidad y electrónica

### 2.4.1.1 Ley de OHM

Es la principal ley, y en base a cuál se formula varias teorías, se establece mediante la Ec. 49, relaciona el valor de voltaje, corriente y resistencia.

$$V = I * R \quad \text{Ec. 49}$$

### 2.4.1.2 Norma ipc para elaboración de placas PCB

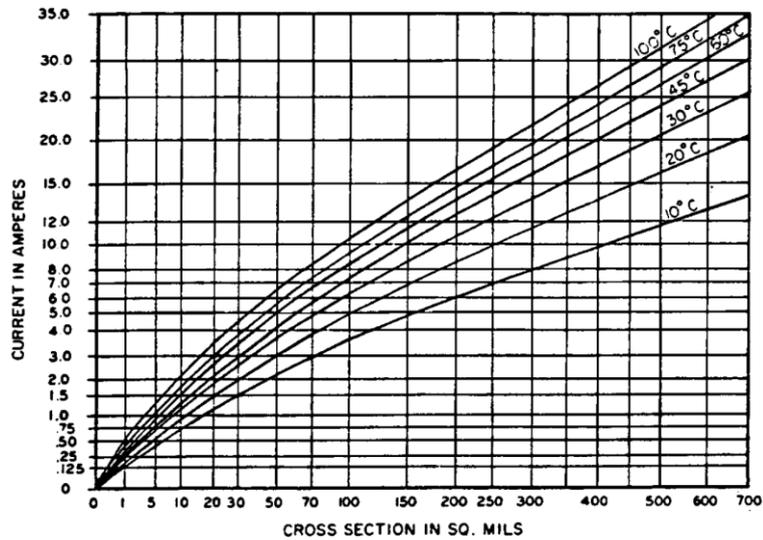
La norma que permite regular y establecer los parámetros correctos para el diseño de placas está contenida en el compendio IPC-2220, de la cual la norma IPC-2221 establece las condiciones generales de los circuitos impresos y la norma IPC-2222 establece los lineamientos específicos para circuitos rígidos impresos.

Lo más importante que se debe tomar de la norma es el correcto dimensionamiento de las pistas de conexión de los circuitos. Para ello y basándonos en la norma se establece el procedimiento.

- Tomar en cuenta los datos del circuito sobre el que se trabaja, los cuales son: corriente de trabajo, variación de temperatura, tipo de placa. El tipo de placa se refiere a la película de cobre, el tamaño más común es de  $10z/\pi e^2$ . La unidad estándar de diseño de placas son milis y se establece en la Ec. 50.

$$1\text{mils} = 1\text{th} = 0.0254\text{mm} = 0.001\text{in} \quad \text{Ec. 50}$$

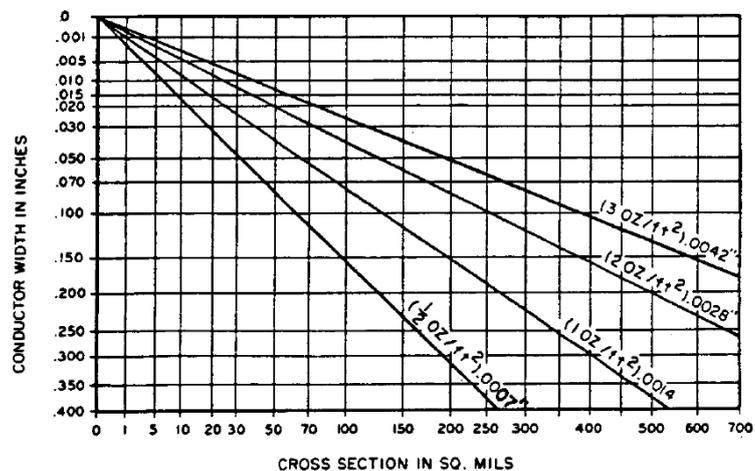
Al tener claro los datos del diseño, en la Figura 37 se realiza un cruce entre las curvas para establecer la sección transversal de cobre necesaria.



**Figura 37 Sección transversal vs Corriente**

**Fuente: (IPC, 2014)**

- Con el dato anterior, se realiza un cruce entre las curvas de la Figura 38, con ello se obtiene el ancho necesario de pista.



**Figura 38 Sección transversal vs Ancho de pista**

**Fuente: (IPC, 2014)**

- Se aproxima los valores a valores estandarizados, expresados en milis.

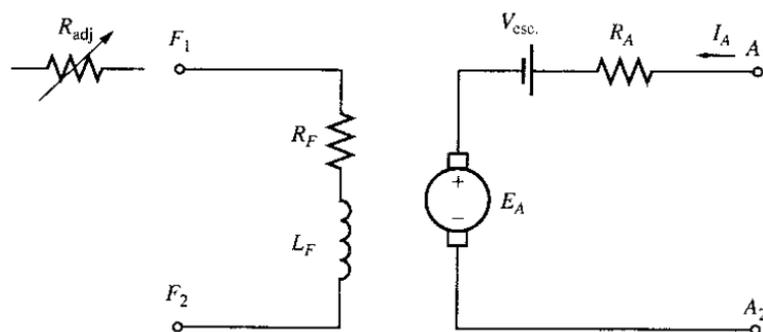
Cabe aclarar que estas figuras son válidas para conectores externos, que serán los usados en las tarjetas electrónicas del proyecto

## 2.4.2 Motores DC

Los motores DC en un pasado predominaban, por su facilidad de variación de velocidad, antes claro de los desarrollos de circuitos de potencia que controlen los motores de corriente alterna. En la actualidad, los motores, de corriente alterna, son los más usados, pero aún se utiliza los motores DC para aplicaciones específicas, como lo es dentro de requerimientos de baja potencia, o sistemas que funcionen a voltajes DC, o de bajo potencial.

### 2.4.2.1 Circuito equivalente del motor DC

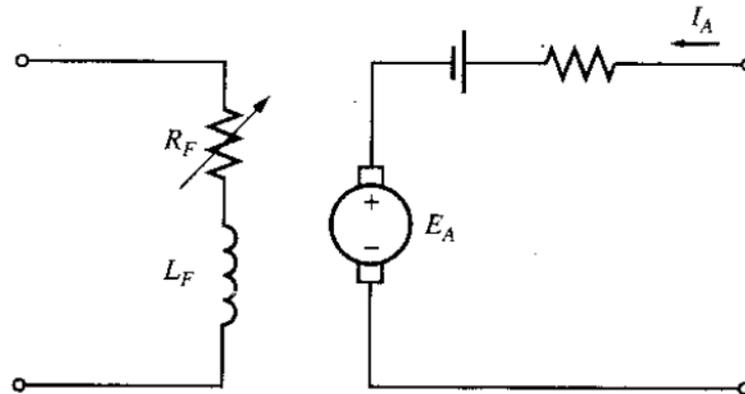
Para efectos de estudio y diseño, es necesario trabajar con un esquema del motor que permita el dimensionamiento de los componentes de control y potencia del sistema. Para ello en la Figura 39 se aprecia el circuito equivalente del motor DC; donde  $E_A$ , como fuente, y  $R_A$  como resistencia, son el equivalente del rotor, tomando en cuenta como  $V_{esc}$  como la caída de tensión en las escobillas. El estator está representado por la resistencia  $R_F$  y la bobina  $L_F$ , siendo la resistencia  $R_{adj}$  externa al estator. Estas producen el flujo magnético.



**Figura 39 Circuito equivalente del motor DC**

**Fuente: (Chapman, 2011)**

En la Figura 40 se aprecia el circuito simplificado del motor donde no se toma en cuenta el valor de tensión de las escobillas y la resistencia externa variable se simplifica con la interna del estator.



**Figura 40 Circuito simplificado del motor DC**

**Fuente: (Chapman, 2011)**

El par inducido del motor está representado en la ecuación Ec. 51.

$$\tau_{ind} = K\phi I_A \quad \text{Ec. 51}$$

Donde

- $\tau_{ind}$  Par inducido
- $K$  Constante de fabricación
- $\phi$  Flujo magnético en el rotor
- $I_A$  Corriente en el rotor

#### 2.4.2.2 Pérdidas en motores DC

Existen varias fuentes de caídas de tensión en un motor, el estudio de estas fuentes mejora el rendimiento del sistema y el consumo de energía. Entre estas fuentes tenemos las siguientes.

**Pérdidas eléctricas**, en los motores ocurren dos tipos de pérdidas eléctricas, la una es en el devanado del rotor y la otra en el devanado de estator, estas se expresan mediante la ecuación Ec. 52 y la ecuación Ec. 53.

$$P_A = I_A^2 R_A \quad \text{Ec. 52}$$

$$P_F = I_F^2 R_F \quad \text{Ec. 53}$$

Donde

- $P_A$  Pérdida en el rotor

$P_F$	Pérdida en el estator
$I_A$	Corriente del rotor
$I_F$	Corriente del estator
$R_A$	Resistencia del rotor
$R_F$	Resistencia del estator

**Pérdidas en las escobillas**, estas pérdidas se registran en el contacto del potencial de las escobillas. Se expresan mediante la ecuación Ec. 54.

$$P_{BD} = V_{BD}I_A \quad \text{Ec. 54}$$

Donde

$P_{BD}$	Pérdida en las escobillas
$V_{BD}$	Caída de voltaje en las escobillas

**Pérdidas mecánicas**, estas pérdidas son muy complicadas de cuantificar, debido a la gran variedad de factores que la provocan, estas van desde la inercia del rotor por su geometría, la resistencia al aire, rozamiento propio, fricción de rodamientos. Estas pérdidas son discriminadas en el análisis del proyecto.

#### 2.4.2.3 Motor DC de imán permanente

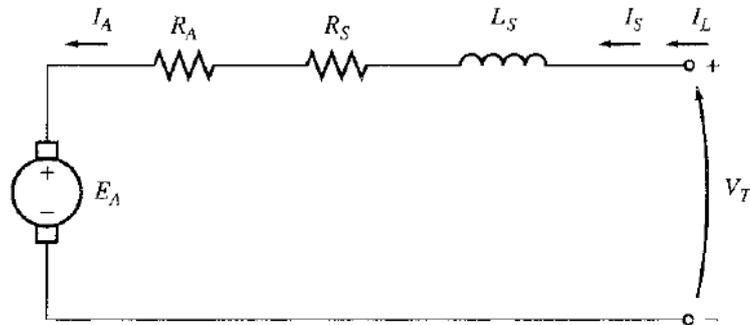
Este motor se caracteriza por tener sus polos contruidos de imanes permanentes, poseen la ventaja de no poseer pérdidas de campo en el estator, y tampoco pérdidas en los circuitos de campo externo. Debida a estas características, estos motores pueden construirse más pequeños que los motores de derivación.

Poseen la desventaja de que, poseer un torque mucho menor que un motor DC serie, debido a que los imanes no suelen proveer de un campo tan fuerte como lo hacen otros tipos de motores.

#### 2.4.2.4 Motor DC serie

Este motor tiene la característica de que el devanado del estator, se encuentra en serie con el devanando del rotor como se puede ver en

la Figura 41. Por lo tanto, este motor tiene la misma corriente en el estator e inductor. Su característica de construcción le permite obtener grandes fuerzas y momentos.

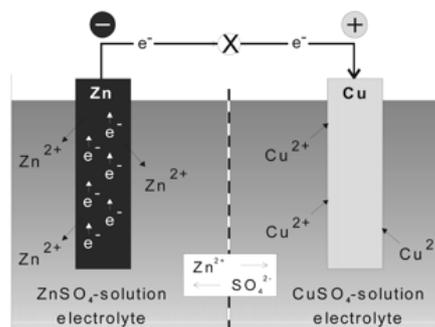


**Figura 41 Circuito equivalente de un motor serie**

**Fuente: (Chapman, 2011)**

#### 2.4.2 Baterías y reguladores de voltaje

Un batería es el arreglo de celdas electroquímicas para la generación de energía eléctrica. El ánodo de una batería es el electrodo positivo, mientras que el cátodo es el electrodo negativo, la corriente fluye del ánodo al cátodo. La generación de energía eléctrica se realiza mediante una transformación química, generalmente realizada con elementos pesados, por lo que son tóxicos. En la Figura 42 se aprecia el esquema de una batería.



**Figura 42 Esquema de una batería**

**Fuente: (Winter & Brodd, 2014)**

Los electrodos por lo general se encuentran en un ambiente electrolítico, el electrolito es el material que provee una conductividad iónica.

Los materiales de los que están compuestos los electrodos son variables dependiendo su fabricación, en la Tabla 1 se aprecia combinaciones típicas y el voltaje producido.

**Tabla 1**  
**Tipos de baterías**

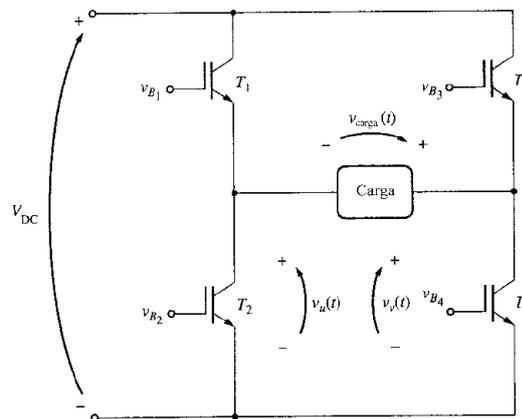
common name	nominal voltage	anode	cathode	electrolyte
primary				
Leclanché (carbon-zinc)	1.5	zinc foil	MnO <sub>2</sub> (natural)	aq ZnCl <sub>2</sub> -NH <sub>4</sub> Cl
zinc chloride (carbon-zinc)	1.5	zinc foil	electrolytic MnO <sub>2</sub>	aq ZnCl <sub>2</sub>
alkaline	1.5	zinc powder	electrolytic MnO <sub>2</sub>	aq KOH
zinc-air	1.2	zinc powder	carbon (air)	aq KOH
silver-zinc	1.6	zinc powder	Ag <sub>2</sub> O	aq KOH
lithium-manganese dioxide	3.0	lithium foil	treated MnO <sub>2</sub>	LiCF <sub>3</sub> SO <sub>3</sub> or LiClO <sub>4</sub> <sup>a</sup>
lithium-carbon monofluoride	3.0	lithium foil	CFx	LiCF <sub>3</sub> SO <sub>3</sub> or LiClO <sub>4</sub> <sup>a</sup>
lithium-iron sulfide	1.6	lithium foil	FeS <sub>2</sub>	LiCF <sub>3</sub> SO <sub>3</sub> and/or LiClO <sub>4</sub> <sup>a</sup>
rechargeable				
lead acid	2.0	lead	PbO <sub>2</sub>	aq H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
nickel-cadmium	1.2	cadmium	NiOOH	aq KOH
nickel-metal hydride	1.2	MH	NiOOH	aq KOH
lithium ion	4.0	Li(C)	LiCoO <sub>2</sub>	LiPF <sub>6</sub> in nonaqueous solvents <sup>a</sup>

Fuente: (Winter & Brodd, 2014)

La ventaja que poseen las baterías, es que existen en gran variedad de tamaño, capacidad de carga, voltaje, pueden entregar pulsos altos de voltaje y no requieren de bombas ni de filtros.

### 2.4.3 Puente H

El puente H, es una configuración de transistores que permite controlar el sentido de giro de los motores DC, es una configuración típica en la que se mediante el control de las corrientes de base de los transistores se conmuta los circuitos. En la Figura 43 se aprecia la configuración típica del puente H.



**Figura 43 Puente H**

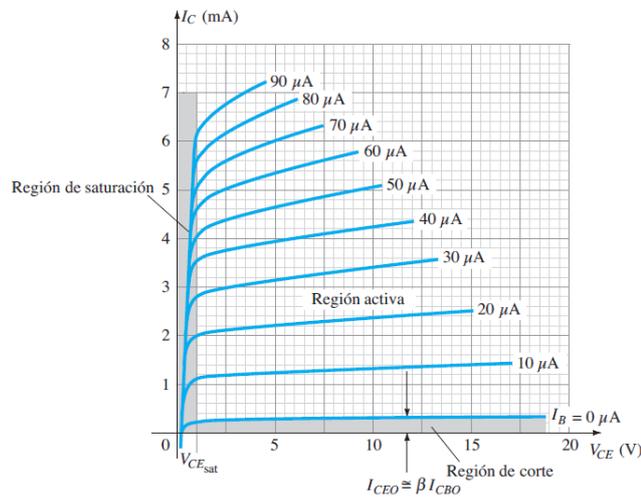
**Fuente: (Chapman, 2011)**

Según la Figura 43, al activarse la entrada 1 y 4, el motor girará en un sentido, y al conmutarse la salida 2 y 3, la polaridad en la carga se invertirá, por lo que el motor girará en sentido contrario.

#### 2.4.3.1 Transistores de unión bipolar BJT

EL transistor es un componente electrónico, compuesto de tres capas de semiconductor, dopadas, PNP o NPN. Para circuitos de baja potencia, es común el uso de transistores de unión bipolar, a modo de interruptor, esto se logra gracias del uso de las zonas de saturación y corte de los transistores.

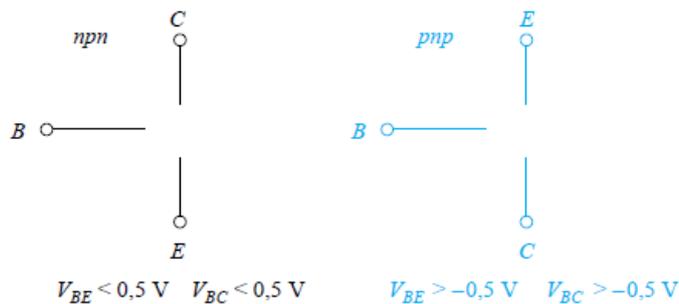
Las curvas características de los transistores, como la Figura 44, muestran claramente las regiones de un transistor.



**Figura 44 Curvas características de los transistores**

**Fuente: (Boylestad & Nashelsky, 2011)**

**Transistor en corte**, en esta región no entra corriente al componente, de tal manera que los tres terminales representan contactos abiertos, esta configuración es equivalente a un interruptor en estado abierto. En la Figura 45 se puede ver el estado del transistor en corte.

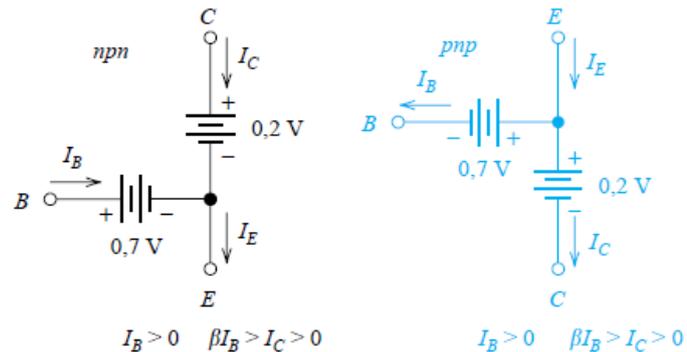


**Figura 45 Transistor en corte**

**Fuente: (Hambley, 2011)**

**Transistor en saturación**, en esta región se puede apreciar que la corriente del emisor es igual a la suma de las corrientes del colector y de la

base, por lo que se puede decir que es equivalente a un interruptor cerrado, donde toda la corriente del colector pasa al emisor. La corriente de la base suele ser por lo general muy baja, por lo que se discrimina, en la Figura 46 se puede apreciar el estado de saturación del transistor.



**Figura 46 Transistor en saturación**

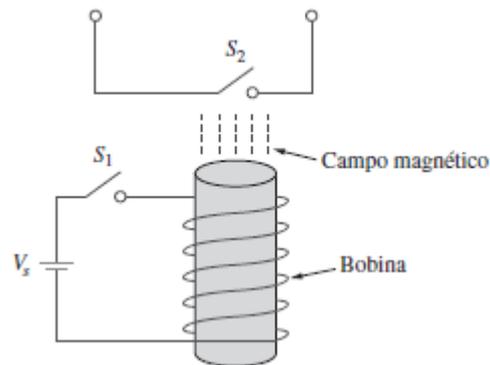
**Fuente: (Hambley, 2011)**

#### 2.4.4 Acoplamiento control- potencia

En un sistema automático, se debe tomar en cuenta el aislamiento de la etapa de control y la etapa de potencia, los acoples es una parte crucial, ya que deben en lo mejor posible optimizar el desempeño del sistema. Para ello existen varios tipos de acoples que pueden ayudar a mejorar el diseño.

##### 2.4.4.1 Acople de relés

Los relés son elementos de contacto mecánico, su funcionamiento se basa en un contacto de accionamiento electromagnético. En la se puede apreciar un circuito de relé. Al pasar corriente por una bobina, esta genera un campo magnético el cual atrae a un contacto, lo que le obliga a cambiar de estado. El aislamiento conseguido es muy bueno, debido a que no existe ni una conexión eléctrica entre ambas etapas del circuito.



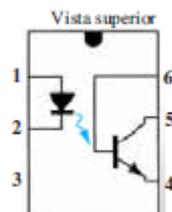
**Figura 47 Circuito de relé**

**Fuente: (Alexander & Sadiku, 2012)**

Las principales desventajas del acople por relés son el ruido y la velocidad de accionamiento, al ser un contacto mecánico se necesita de un alto tiempo de accionamiento respecto a los elementos de estado sólido, y la conexión y desconexión induce un ruido eléctrico que puede afectar a los circuitos de control.

#### 2.4.4.2 Acople óptico

El acople opto electrónico es un componente de alto aislamiento, su composición básica es de un led infrarrojo y un foto-diodo, foto transistor o foto triac, dependiendo la aplicación, en la Figura 48 se puede apreciar el esquema interno de un encapsulado de aislamiento óptico.



**Figura 48 Encapsulado de fototransistor**

**Fuente: (Alexander & Sadiku, 2012)**

Es común complementar el acople óptico con tiristores o transistores de potencia, para cargas de alta potencia.

### 2.4.4.3 Transistores de efecto de campo FET

El acople de relés basa su funcionamiento en la aplicación de un campo magnético, mientras que este tipo de transistores basa su funcionamiento en la aplicación de un campo eléctrico. Los transistores de efecto de campo son mucho más estables que los BJT. Dentro de los FET, tenemos tres tipos.

**JFET**, este es el transistor de efecto de campo de unión, su símbolo se aprecia en la Figura 49.

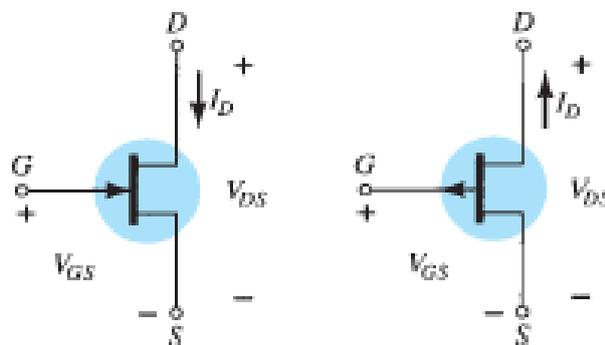


Figura 49 Símbolo JFET, canal n y canal p

Fuente: (Alexander & Sadiku, 2012)

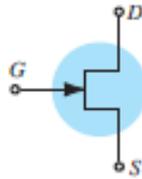
**MOSFET**, este es el transistor de efecto de campo semiconductor de óxido metálico, su símbolo se aprecia en la Figura 50, este es el más popular de los transistores de efecto de campo, aunque es prescindible tomar precauciones en su manipulación.



Figura 50 Símbolo MOSFET, canal n y canal p

Fuente: (Alexander & Sadiku, 2012)

**MESFET**, este es el transistor de efecto de campo de semiconductor metálico, su símbolo se aprecia en la Figura 51, este transistor es el más costoso pero su precio lo compensa la velocidad de accionamiento que posee.



**Figura 51 Símbolo MESFET**  
**Fuente: (Alexander & Sadiku, 2012)**

### 2.4.5 Arduino

Arduino es un sistema embebido de software y hardware abierto, maneja como microcontroladores la gama de procesadores de ATMEL, su difusión es muy extensa lo que le hace relativamente barato para las funcionalidades que presta. Aparte es un sistema modular con opción de ampliación mediante el uso de escudos. Su lenguaje de programación está basado en C++, por tal razón tiene gran facilidad de aprendizaje. En la Figura 52 se aprecia un Arduino MEGA 2560, uno de los sistemas más completos y que posee mayor cantidad de soporte.



**Figura 52 Arduino MEGA 2560**  
**Fuente: (ARDUINO, 2015)**

### 2.5 Metodología

La metodología utilizada se basará en la propuesta de Karl T. Ulrich y Steven D. Eppinger en el libro “Diseño y desarrollo de productos”, la cual se

fundamenta en un proceso genérico de desarrollo que consta de pasos básicos que pueden ser modificados durante el proyecto, estos son:

**Planeación:** Conocida como fase cero, en la cual se identificará necesidades, oportunidades y posibles soluciones, se enfocará en estudiar el problema para poder posteriormente dar la mejor solución a este.

**Desarrollo del concepto:** En esta fase y en base al análisis de la fase anterior, se desarrollará varias alternativas para el desarrollo del producto, que luego serán analizadas y de entre ellas se elegirá la más eficiente y útil para el caso.

**Diseño a nivel sistema:** Se basa en un diseño general de la solución especificando y fraccionando el problema en subsistemas para que de tal forma se pueda solventar poco a poco todo el problema de la manera más eficiente.

**Diseño de detalle:** Luego de tener fraccionado el problema en varios subsistemas y con una idea general de la sinergia de los componentes, se desarrollará a detalle las soluciones individuales del problema que logren optimizar el proceso.

**Pruebas y refinamiento:** En base a someter a pruebas los diseños elegidos se buscará pulir detalles que pueden pasar desapercibidos en el proceso de desarrollo, de esta manera asegurar una solución óptima.

## **CAPÍTULO 3. DISEÑO MECATRÓNICO**

### **3.1 Planificación QFD**

Mediante el despliegue de la función de la calidad, se busca que el diseño del proyecto sea robusto y se desarrolle sobre los requerimientos del usuario. Para ello se han analizado los requisitos que el usuario de este proyecto solicita.

#### **3.1.1 Identificación de los requisitos del usuario**

En base a los requerimientos del usuario final del proyecto, se ha podido identificar los requisitos sobre los cuales se debe enfocar el diseño. Estos son:

- Cómodo
- Seguro
- Fuerte
- Fácil de usar
- Larga duración de uso
- Bajo costo
- Resistente
- Estético

#### **3.1.2 Identificación de los requisitos técnicos**

Enunciados los requisitos del usuario, se plantea soluciones a ellos, tomando en cuenta que los requisitos del usuario son cualitativos y los requisitos técnicos son posibles soluciones.

- Materiales
- Protecciones
- Motores
- HMI
- Baterías
- Cantidad de elementos
- Estructura
- Acabados

### 3.1.3 Función de la calidad

Establecidos los requisitos del usuario y los requisitos técnicos, se procede a desplegar la función de la calidad. Esta se aprecia en la Tabla 2.

**Tabla 2**  
**Función de la calidad**

		Mejoramiento							
		↓	↑			↑	↓		
Importancia del usuario	Peso relativo	Materiales	Protecciones	Motores	HMI	Baterías	Cantidad de elementos	Estructura	Acabados
		18	15%	●			●		
20	16%	○	●	○		○		○	
13	10%	○	○	●		○		○	
20	16%				●				
15	12%			○		●			
10	8%	○	Δ	●		○	●	○	Δ
18	15%	○		●				●	○
10	8%	Δ			○		○	Δ	●
Tasa de importancia técnica		2,86	1,85	3,82	3,00	2,13	0,97	2,43	1,39
Peso relativo		16%	10%	21%	16%	12%	5%	13%	8%

### 3.1.4 Análisis de resultados

En la Tabla 3 se puede apreciar los resultados del análisis de la casa de la calidad, se ha identificado las relaciones positivas y negativas al igual que las funciones a maximizar y minimizar en el diseño.

**Tabla 3**  
**Resultados QFD**

Requisito técnico	Peso ponderado
Materiales	16%
Protecciones	10%
Motores	21%
HMI	16%
Baterías	12%
Cantidad de elementos	5%
Estructura	13%
Acabados	8%

Como resultado de la función se puede determinar que los motores son la prioridad en el diseño, siendo esta la parte fundamental. A estos les precede los materiales y la interfaz de diseño. Se realizarán simulaciones que puedan verificar la calidad de los materiales que se usarán. La interfaz igualmente tiene un peso igual a los materiales, para ello se realizará un diseño intuitivo.

La estructura y baterías tienen pesos semejantes, estos, aunque no son prioritarios, son de mucho cuidado, ya que estos parámetros pueden influenciar en gran manera en los costos del proyecto.

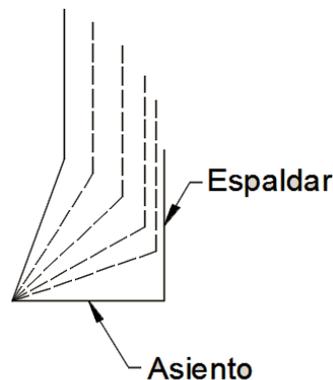
### 3.2 Diseño de los componentes mecánicos

Para cumplir con los objetivos del proyecto, se busca solventar dos problemas fundamentales, los cuales son la movilidad y el levantamiento del

usuario. Los detalles de solución se presentarán por separado, para que en el análisis de diseño se pueda contemplar el acoplamiento de ambas soluciones.

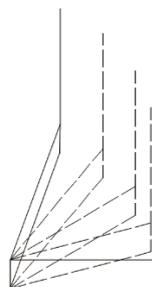
### 3.2.1 Alternativa de sistema de bipedestación

La bipedestación se caracteriza por tener gran seguridad de desempeño, el sistema debe ser compacto para que pueda acoplarse fácilmente a la estructura de la silla. También debe tomarse en cuenta que, en el proceso de bipedestación, el espaldar debe mantenerse vertical para evitar que la persona sea expulsada de la silla, produciendo un movimiento semejante a la Figura 53.



**Figura 53 Movimiento deseado del espaldar**

Para lograr el movimiento de levantamiento del asiento y sin modificar la inclinación se usará un mecanismo de barras paralelas. Este mecanismo está expresado en la Figura 54. De esta manera con aplicar un movimiento rotacional sobre una de las barras horizontales, se logra mantener la posición del espaldar.



**Figura 54 Mecanismo alternativo de barras paralelas**

### 3.2.2 Parámetros de diseño de sistema de bipedestación

El sistema de bipedestación se rige bajo los parámetros especificados en la Tabla 4. La tolerancia de estos parámetros es relativamente alta debido a que el sistema no se maneja bajo un estricto control de altura de elevación.

**Tabla 4**

**Parámetros de diseño de bipedestación**

Parámetros de diseño de bipedestación		
Detalle	Valor	Unidad
Velocidad de extensión	<15	mm/s
Peso de persona a mover	70	Kg
Ángulo máximo de elevación	70	°

El parámetro de ángulo máximo de elevación está basado en poder posicionar al usuario de pie sin que este resbale o quede en una posición que pueda provocar un daño físico.

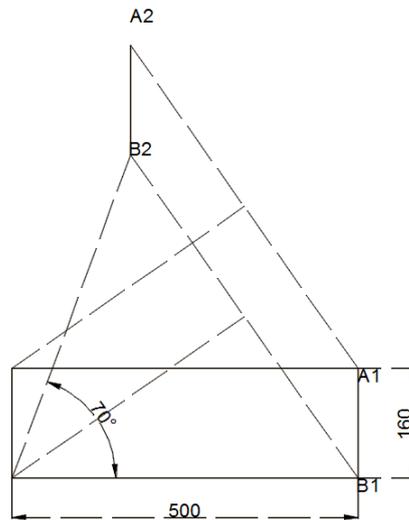
### 3.2.3 Desarrollo del sistema de bipedestación

Se trabaja empezando con las medidas de los eslabones del mecanismo, de tal manera que tenga concordancia con el usuario.

En la Figura 55 se aprecia el diseño del mecanismo a usarse en el proyecto. El diagrama fue obtenido siguiendo los pasos:

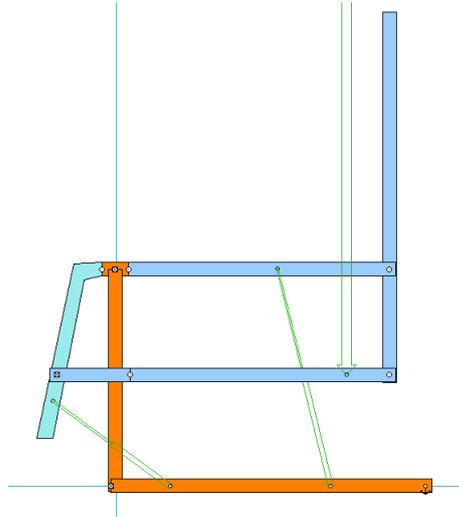
- Dibujar el segmento A1B1
- Extender desde B1, el primer punto de giro a una distancia de 500mm, medida que corresponde desde la rodilla a la cadera
- Dibujar desde el primer punto de giro un segmento de inclinación 70° y un largo de 500mm.
- Dibujar el segmento A2B2, estos serán la posición inicial y final del mecanismo
- Unir con líneas de construcción A1A2 y B1B2
- Trazar bisectrices desde A1A2 y B1B2

- Trazar un segmento paralelo a A1B1 desde un punto de la bisectriz, puede ser cualquier punto, pero se ha seleccionado el origen.
- Unir el origen con B1 y su otro extremo con A1.



**Figura 55 Diseño del mecanismo de movimiento**

En la Figura 56 se aprecia el mecanismo modelado en el software de simulación Working Model, este mecanismo permitirá realizar el análisis dinámico del proyecto. Se recopilará información sumamente importante en base a sus resultados.

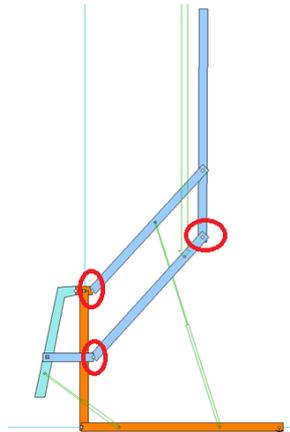


**Figura 56 Modelo para simulación dinámica**

### 3.2.3.1 Análisis dinámico del sistema de bipedestación

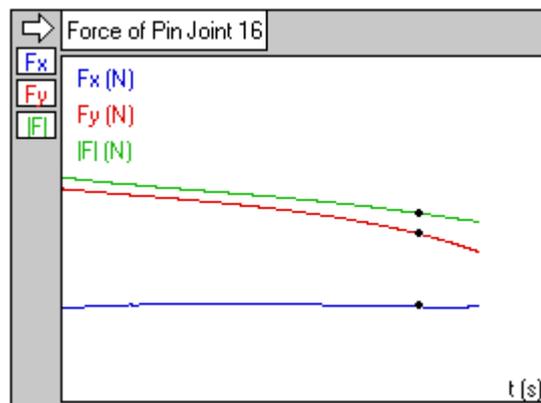
En la Figura 57 se aprecia la simulación del mecanismo de bipedestación, se aplicó una fuerza sobre el asiento del mecanismo equivalente al peso de una persona de 95Kg para realizar la prueba. También se puede apreciar en la figura, tres de los puntos más críticos y que mayor esfuerzo soportaron durante la simulación (señalados en una circunferencia). Estos puntos se analizarán uno por uno y están ubicados en:

- Punto de unión entre la base y el mecanismo
- Punto de unión entre el espaldar e el mecanismo
- Punto de unión entre las barras inferiores del mecanismo



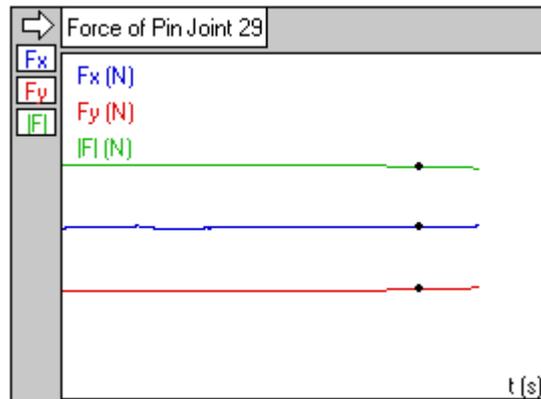
**Figura 57 Simulación dinámica de bipedestación**

En la Figura 58 se puede apreciar la fuerza resultante y su comportamiento en función del tiempo para el punto de unión entre la base y el mecanismo. Se puede notar que conforme el mecanismo se levanta, los esfuerzos son mayores, pero con una tasa de crecimiento relativamente baja.



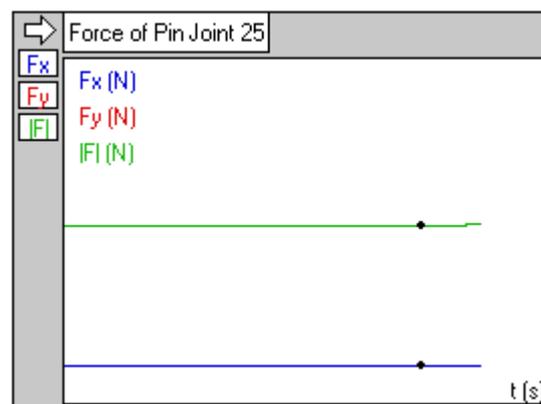
**Figura 58 Gráfica fuerzas en el pivote base-mecanismo.**

En la Figura 59 se puede apreciar las fuerzas en las coordenadas X e Y, en el punto de unión de las barras inferiores. Cabe notar que el esfuerzo en estos, mientras el mecanismo se levanta, se mantiene relativamente constante. Esto se puede explicar debido a que, durante el proceso de bipedestación, esta barra únicamente transmite movimiento.



**Figura 59 Gráfica fuerzas en el pivote barra1-barra2**

En la Figura 60 se puede apreciar las fuerzas en el punto de unión entre el espaldar y la barra inferior 2. Se puede notar que el esfuerzo es constante, con la diferencia que el valor de la fuerza a lo largo de Y es superior a todas las fuerzas analizadas en el proceso.



**Figura 60 Gráfica fuerzas en el pivote Espaldar-barra2**

En la Figura 61 se puede apreciar los valores simulados en el momento de máximo esfuerzo, en el punto de unión de la base y el mecanismo de bipedestación. Estos valores permiten verificar y someter a prueba el material. Las reacciones entre X e Y, son semejantes a lo largo del movimiento.

Force of Pin Joint 16	
$F_x$	$F_x$ -302.166 N
$F_y$	$F_y$ 225.594 N
$ F $	$ F $ 377.090 N

**Figura 61 Fuerza máxima en pivote base-mecanismo**

En la Figura 62 se puede apreciar los valores máximos de fuerza alcanzados en la bipedestación, en el punto de unión de las barras. Se puede notar que el valor de fuerza a lo largo del eje X es despreciable con respecto al valor de fuerza a lo largo del eje Y. Aun así, este punto posee los valores más pequeños de esta simulación.

Force of Pin Joint 29	
$F_x$	$F_x$ 2.483 N
$F_y$	$F_y$ -142.997 N
$ F $	$ F $ 143.019 N

**Figura 62 Fuerza máxima en el pivote barra1-barra2**

En la Figura 63 se puede apreciar los valores de fuerza máximo en el punto de unión de la barra 2 y el espaldar. Se puede notar que en este punto se consiguieron los valores más altos.

Force of Pin Joint 25	
$F_x$	$F_x$ 2.483 N
$F_y$	$F_y$ 739.127 N
$ F $	$ F $ 739.131 N

**Figura 63 Fuerza máxima en el pivote espaldar-barra2**

En la Figura 64 se puede apreciar el diseño en 3D del mecanismo de bipedestación que permite tener una visión más general del comportamiento del proyecto. Este modelo se ha realizado en base al diseño del mecanismo del inicio de este apartado y del modelo de simulación dinámica de la Figura 56.

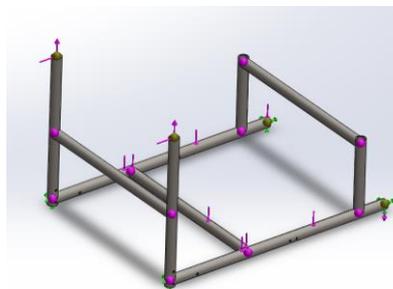


**Figura 64 Diseño 3D de mecanismo de bipedestación**

### 3.2.3.2 Análisis estático del sistema de bipedestación

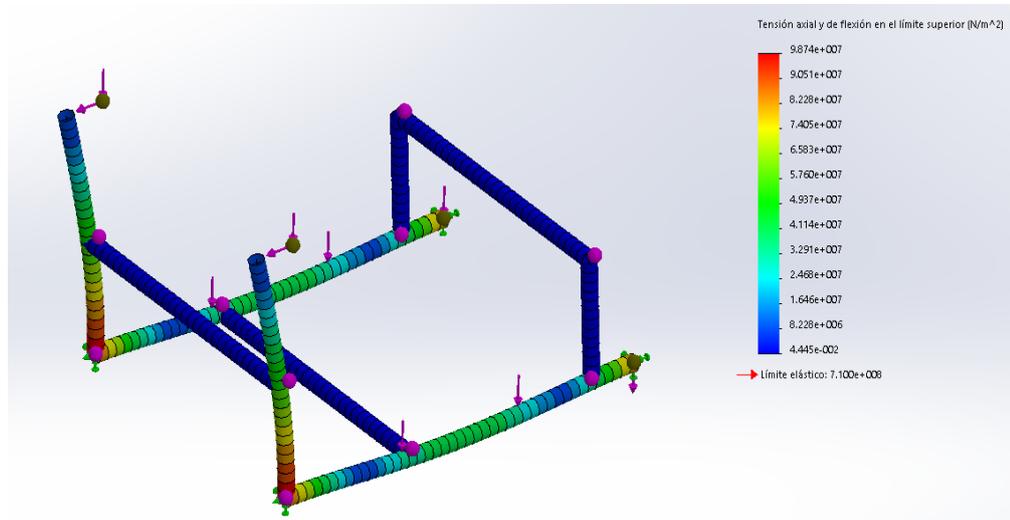
En la Figura 65 se detalla el modelo en 3D de la base de la silla. Este modelo ha sido diseñado en base a los requerimientos de funcionalidad. También se han agregado las cargas que recibirá a lo largo de su prueba. Entre estas cargas, que se notan en la figura, se ha involucrado:

- Fuerzas en el punto de unión de la base y el mecanismo de movimiento.
- Peso recibido sobre la estructura del usuario
- Peso recibido por las baterías y los accesorios.



**Figura 65 Distribución de cargas en la base**

En la Figura 66 se puede apreciar los esfuerzos de tensión que soporta la base bajo simulación al momento de realizar el proceso de bipedestación. Para la simulación se usaron los valores máximos de carga.



**Figura 66 Simulación de esfuerzo en la base, bipedestación**

Se calcula el valor del facto de seguridad para comprobar la eficiencia de la estructura mediante la Ec. 55.

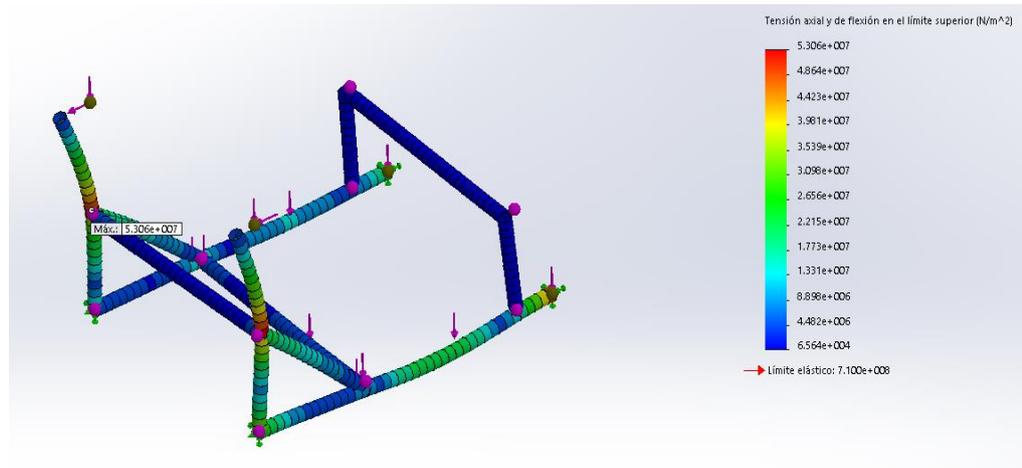
$$\eta_s = \frac{\delta_{perm}}{\delta_{sim}}$$

$$\eta_s = \frac{710}{98.74}$$

$$\eta_s = 7.2$$

**Ec. 55**

El factor de seguridad de 7 da la confianza de funcionamiento. Este es el primer modelo. Se realizó un segundo modelo para comparar resultados y seleccionar el más eficiente en la construcción. La simulación del segundo modelo bajo las mismas condiciones se especifica en la Figura 67.



**Figura 67 Simulación de esfuerzos en la base, segundo modelo, reclinación**

Se calcula el valor del factor de seguridad para comprobar la eficiencia de la estructura mediante la Ec. 56.

$$\eta_s = \frac{\delta_{perm}}{\delta_{sim}}$$

$$\eta_s = \frac{710}{53.06}$$

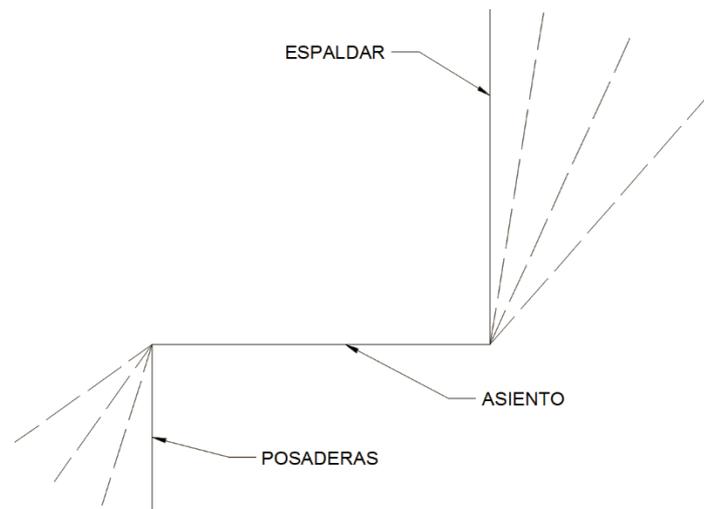
$$\eta_s = 13.4$$

**Ec. 56**

En esta simulación el factor de seguridad es superior, esto bajo las condiciones de bipedestación.

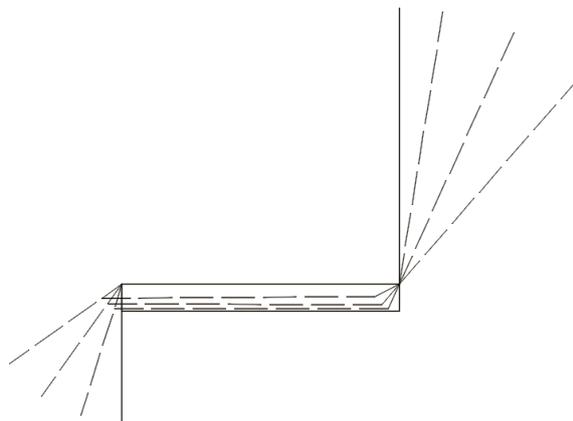
### 3.2.4 Alternativa de diseño de reclinación

La reclinación se caracteriza por su bajo requerimiento de desempeño, comparado con los esfuerzos que tiene que sobrepasar el sistema de bipedestación. El sistema debe compactarse y no interferir con el sistema de bipedestación. También se debe tomar en cuenta que, durante el movimiento, el asiento no debe inclinarse. El movimiento debe ser semejante a la Figura 68.



**Figura 68 Movimiento deseado en la reclinación**

Para lograr el movimiento de reclinación, al igual que en el mecanismo de bipedestación, se utilizará un sistema de barras paralelas. Este mecanismo está expresado en la Figura 69. De esta manera se puede evitar el inclinar innecesariamente el asiento al momento de cambiar de posición.



**Figura 69 Mecanismo de barras paralelas en la reclinación**

### 3.2.5 Parámetros de diseño del sistema de reclinación

La Tabla 5 establece los parámetros mínimos que debe cumplir el mecanismo. La tolerancia de estos parámetros, a diferencia del anterior

mecanismo, son relativamente bajos debido, a que no se necesita un estricto control de la inclinación que se reclinará.

**Tabla 5**

**Parámetros d diseño de reclinación**

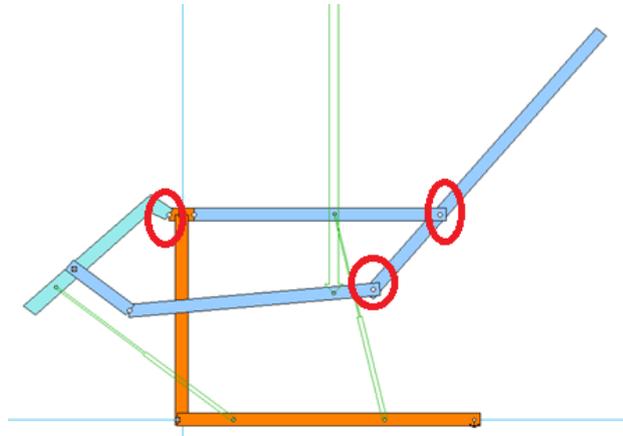
Parámetros de diseño de reclinación		
Detalle	Valor	Unidad
Velocidad de extensión	<15	mm/s
Peso de persona a mover	70	Kg
Ángulo mínimo de reclinación	20	°

**3.2.6 Desarrollo del sistema de reclinación**

**3.1.6.1 análisis dinámico del sistema de reclinación**

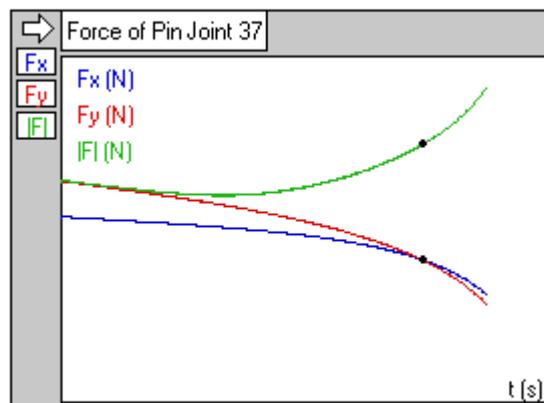
En la Figura 70 se aprecia la simulación del mecanismo de reclinación, se aplicó una fuerza sobre el asiento del mecanismo equivalente al peso de una persona de 95Kg para realizar la prueba. También se puede apreciar en la figura, tres de los puntos más críticos y que mayor esfuerzo soportaron durante la simulación (señalados en una circunferencia). Estos puntos se analizarán uno por uno y están ubicados en:

- Punto de unión entre la base y el mecanismo
- Punto de unión superior entre el espaldar e el mecanismo
- Punto de unión inferior entre el espaldar e el mecanismo



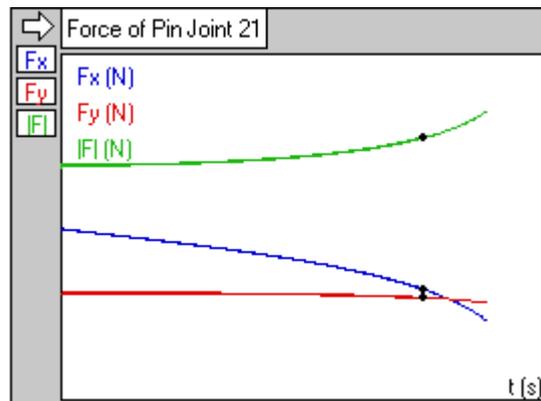
**Figura 70 Simulación dinámica de inclinación**

En la Figura 71 se puede apreciar la fuerza resultante y su comportamiento en función del tiempo para el punto de unión entre la base y el mecanismo. Se puede notar que conforme el mecanismo se reclina, los esfuerzos son mayores, la tasa de crecimiento es alta, siendo la resultante sobre el eje Y la que crece con mayor velocidad.



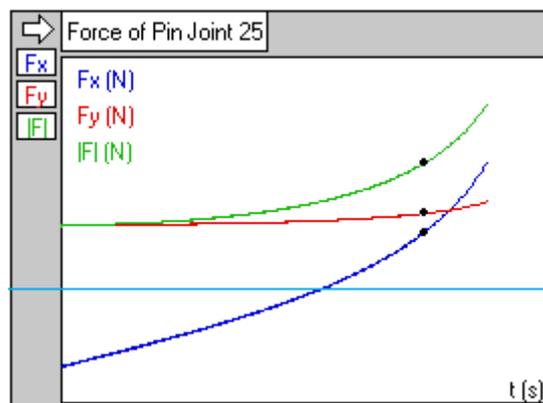
**Figura 71 Gráfica fuerzas en el pivote posaderas-base**

En la Figura 72 se puede apreciar las fuerzas resultantes en el punto de unión del espaldar y la barra. Se puede notar que la fuerza resultante sobre el eje Y se mantiene constante, mientras que la fuerza resultante sobre el eje X crece en función del tiempo.



**Figura 72 Gráfica fuerzas en el pivote espaldar-barra**

En la Figura 73 se puede apreciar las fuerzas resultantes en la unión inferior del espaldar con el mecanismo. En este caso se puede observar el crecimiento de la resultante sobre el eje X y también que la resultante sobre el eje Y crece, pero con una tasa muy inferior a X.



**Figura 73 Gráfica fuerzas en el pivote espaldar-barra2**

En la Figura 74 se observan los valores máximos obtenidos en el proceso de inclinación, en el punto de unión del mecanismo con la base. Se nota que los valores finales en X e Y son semejante. Los valores en este punto son los menores de la simulación.

Force of Pin Joint 37	
$F_x$	$F_x$ -250.498 N
$F_y$	$F_y$ -252.708 N
$ F $	$ F $ 355.824 N

**Figura 74 Fuerza máxima en el pivote posaderas-base**

La Figura 75 muestra los valores resultantes de fuerza en el punto de unión superior del espaldar con el mecanismo. Se puede notar la semejanza de los valores en X e Y al final del movimiento.

Force of Pin Joint 21	
$F_x$	$F_x$ -698.865 N
$F_y$	$F_y$ -796.650 N
$ F $	$ F $ 1059.746 N

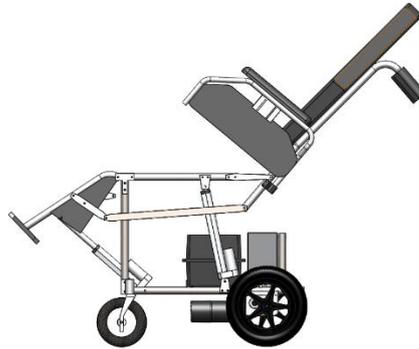
**Figura 75 Fuerza máxima en el pivote espaldar-barra**

La Figura 76 muestra los valores resultantes de fuerza en el punto de unión inferior del espaldar con el mecanismo. Aparte de la semejanza entre los valores a lo largo de X e Y, también se puede notar su semejanza con los valores del punto anterior.

Force of Pin Joint 25	
$F_x$	$F_x$ 698.865 N
$F_y$	$F_y$ 796.475 N
$ F $	$ F $ 1059.615 N

**Figura 76 Fuerza máxima en el pivote espaldar-barra2**

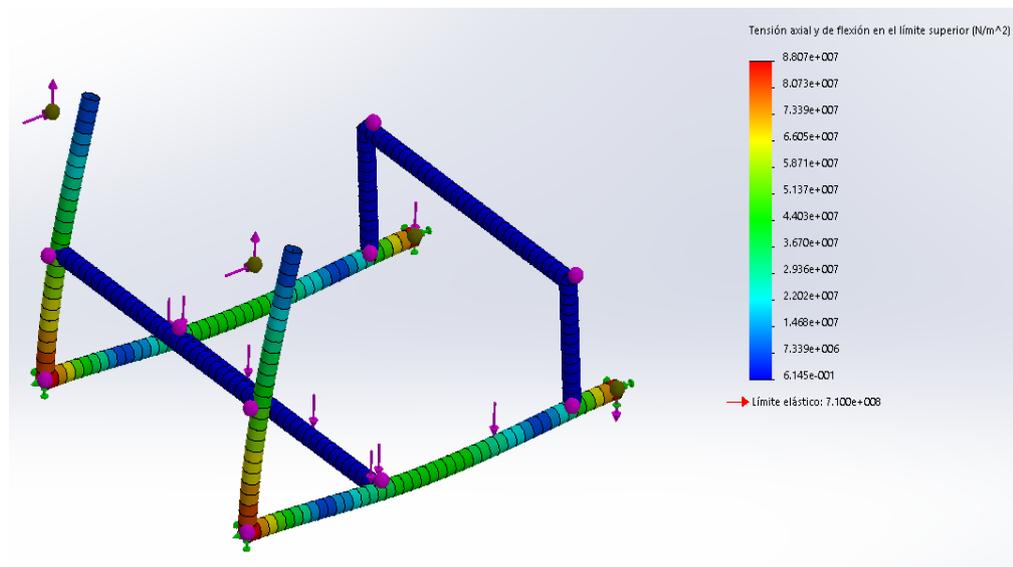
En la Figura 77 se puede apreciar el diseño en 3D del mecanismo de bipedestación que permite tener una visión más general del comportamiento del proyecto. Este modelo se ha realizado en base al diseño del mecanismo del inicio de este apartado y del modelo de simulación dinámica de la Figura 56.



**Figura 77 Diseño 3D de mecanismo de reclinación**

### 3.2.6.2 Análisis estático del sistema de reclinación

En la Figura 78 se puede apreciar los esfuerzos de tensión que soporta la base bajo simulación al momento de realizar el proceso de reclinación. Para la simulación se usaron los valores máximos de carga.



**Figura 78 Simulación de esfuerzo en la base, reclinación**

Se calcula el valor del factor de seguridad para comprobar la eficiencia de la estructura mediante la Ec. 57.

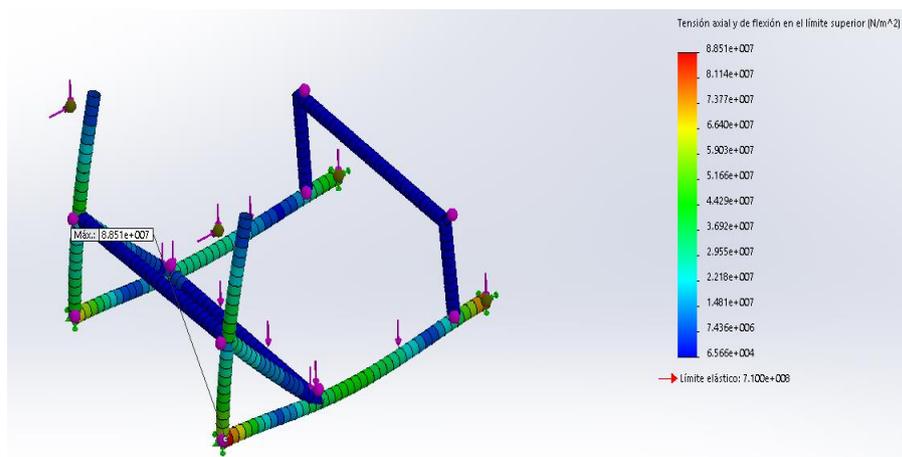
$$\eta_s = \frac{\delta_{perm}}{\delta_{sim}}$$

$$\eta_s = \frac{710}{88.07}$$

$$\eta_s = 8.1$$

**Ec. 57**

El factor de seguridad de 8 da la confianza de funcionamiento. Este es el primer modelo. Al igual que en la bipedestación se realizó un segundo modelo para comparar resultados y seleccionar el más eficiente en la construcción. La simulación del segundo modelo bajo las mismas condiciones se especifica en la Figura 79.



**Figura 79 Simulación de esfuerzos en la base, segundo modelo, reclinación**

Se calcula el valor del facto de seguridad para comprobar la eficiencia de la estructura mediante la Ec. 58.

$$\eta_s = \frac{\delta_{perm}}{\delta_{sim}}$$

$$\eta_s = \frac{710}{88.5}$$

$$\eta_s = 8$$

**Ec. 58**

En esta simulación el factor de seguridad es semejante al primer modelo, esto bajo las condiciones de inclinación.

### **3.2.7 Alternativa de sistema de movimiento**

El movimiento se caracteriza por poseer dirección, tanto en avance como en retroceso. La silla posee 4 ruedas, dos delanteras y dos posteriores. Las ruedas delanteras, son típicas de silla para discapacitados, es decir giran en distintas direcciones acorde al movimiento de la silla. Las ruedas traseras originales, son ruedas de 24" como la Figura 80. Estas ruedas son usadas comúnmente debido a que, impulsando cada una a distinta velocidad se logra obtener dirección.



**Figura 80 Rueda original de la silla**

La silla original sobre la cual se trabajará es la ilustrada en la Figura 81. Esta es una silla estándar, totalmente manual.



**Figura 81 Esquema de la silla original**

Para lograr el movimiento de la silla y conseguir dirección, se colocará un motor en cada rueda, de tal forma se simulará el movimiento independiente

que realizan las manos al mover la silla normalmente, de tal forma la silla tendrá por parte de movimiento el esquema de la Figura 82.



**Figura 82 Esquema de sistema de movimiento**

### 3.2.8 Parámetros de diseño de sistema de movimiento

Las sillas de ruedas eléctricas del mercado poseen una velocidad promedio de 5 km/h (TECNUM, 2015). El diseño se basará en los datos de la Tabla 6, que son necesarios cumplir para un óptimo desempeño.

**Tabla 6**

#### Parámetros de diseño de movimiento

Parámetros de diseño de movimiento		
Detalle	Valor	Unidad
Velocidad máxima	5	km/h
Peso de persona a mover	95	kg
Pendiente a vencer	15	°

**Los datos de desempeño de la silla están basados en la información del usuario que se aprecia en la**

Tabla 7.

Tabla 7

## Datos del usuario de la silla

Datos del usuario		
Detalle	Valor	Unidad
Peso	85	kg
Altura	1.8	m
Porcentaje de discapacidad total	80	%
Porcentaje de discapacidad mental	0	%
Porcentaje de discapacidad de miembros superiores	20	%
Porcentaje de discapacidad de miembros inferiores	90	%

## 3.2.9 Desarrollo del sistema de movimiento

Al igual que en los anteriores sistemas, se procede a analizar la simulación de la estructura en la condición de sentado. Esta es la condición de movimiento. Se analiza para ambos modelos.

En la Figura 83 se aprecia la simulación sobre el primer modelo de la estructura, bajo las cargas de peso máximo.

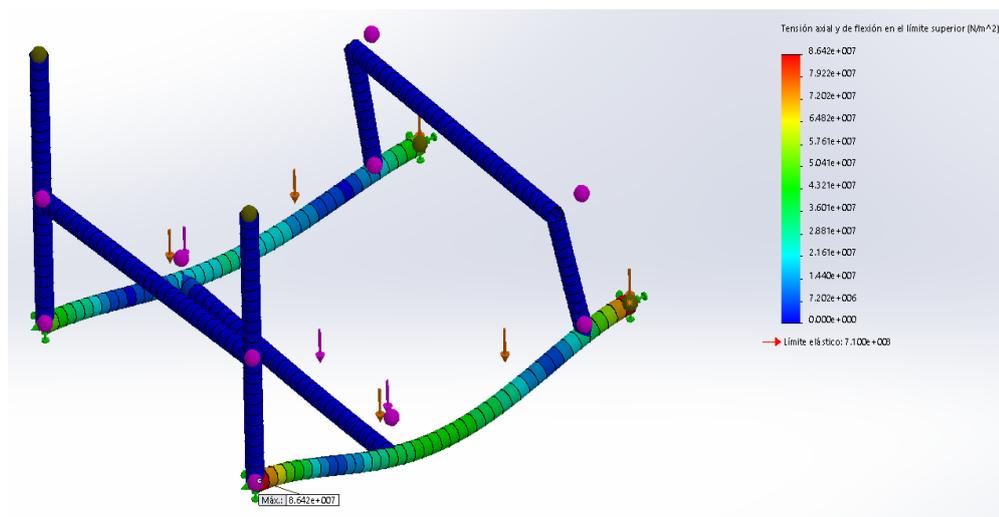


Figura 83 Simulación de los esfuerzos en la base, posición de movimiento

Se calcula el valor del facto de seguridad para comprobar la eficiencia de la estructura mediante la Ec. 59.

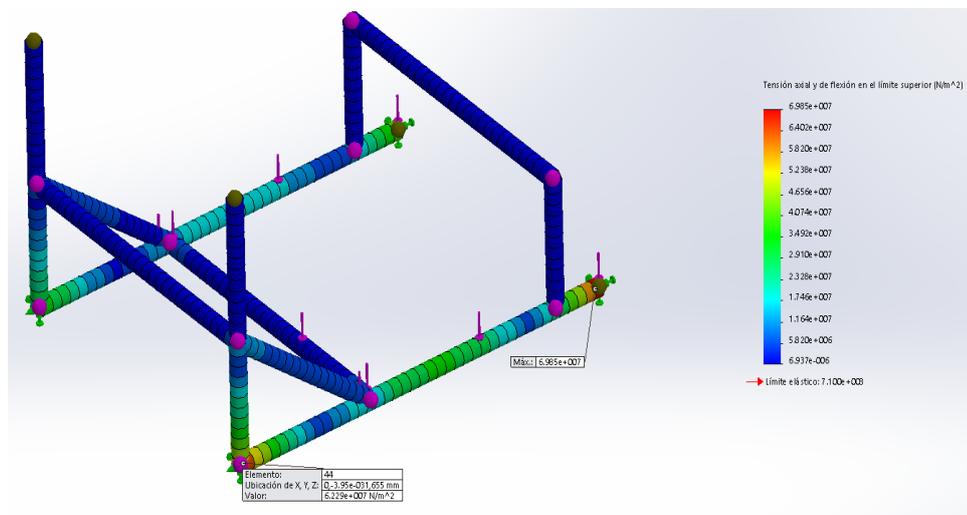
$$\eta_s = \frac{\delta_{perm}}{\delta_{sim}}$$

$$\eta_s = \frac{710}{86,4}$$

$$\eta_s = 8.2$$

**Ec. 59**

El factor de seguridad de 8 da la confianza de funcionamiento. Este es el primer modelo. Al igual que en la bipedestación y reclinación se realizó un segundo modelo para comparar resultados y seleccionar el más eficiente en la construcción. La simulación del segundo modelo bajo las mismas condiciones se especifica en la Figura 84.



**Figura 84 Simulación de los esfuerzos en la base, posición de movimiento, segundo modelo**

Se calcula el valor del facto de seguridad para comprobar la eficiencia de la estructura mediante la Ec. 60.

$\delta$

**Ec. 60**

$$\eta_s = 11.4$$

El factor en este caso es superior al factor del primer modelo.

Para realizar la selección del modelo, se compara los factores de seguridad obtenidos en los resultados de las simulaciones. Estos se resumen en la Tabla 8.

**Tabla 8**  
**Resultados de análisis de factor de seguridad**

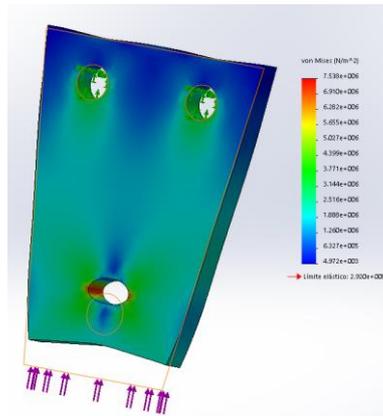
<b>Sistema</b>	<b>Primer modelo</b>	<b>Segundo modelo</b>
<b>Bipedestación</b>	7.2	<b>13.4</b>
<b>Reclinación</b>	<b>8.1</b>	8
<b>Movilidad</b>	8.2	<b>11.4</b>

Se puede apreciar que el modelo con la mejor respuesta es el segundo, este será el que se construirá y someterá a pruebas.

### **3.2.10 Análisis de las piezas que conforman el mecanismo**

En el presente apartado se procede a simular las piezas que conforman el mecanismo y son sometidas a cargas. Para ello se simuló en base a las fuerzas máximas obtenidas en el diseño de los sistemas de bipedestación, reclinación y movilidad.

En la Figura 85 se observa la simulación obtenida del Bracket de motor, esta pieza soporta la carga de peso del usuario. El material usado es acero inoxidable cromado, seleccionado por su propiedad física y su falta de necesidad de un tratamiento adicional para evitar la corrosión.



**Figura 85 Simulación de esfuerzos en bracket de motor**

Se calcula el valor del factor de seguridad para comprobar la eficiencia de la estructura mediante la Ec. 61.

$$\eta_s = \frac{\delta_{perm}}{\delta_{sim}}$$

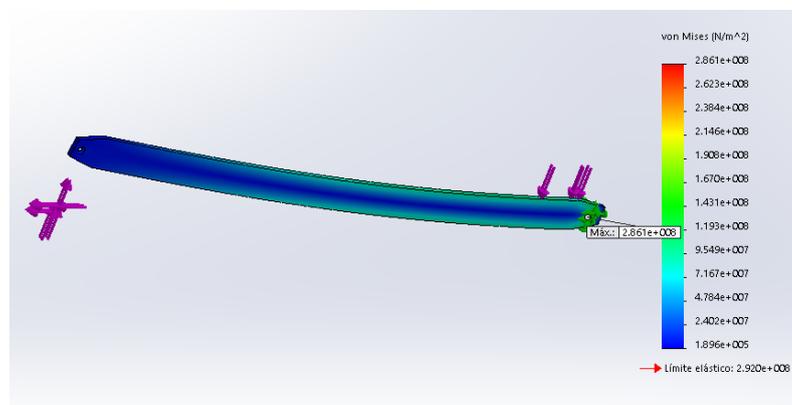
$$\eta_s = \frac{292}{7.53}$$

$$\eta_s = 38.8$$

**Ec. 61**

El factor en este caso es alto, muy por encima del requerimiento, lo que brinda confianza en el desempeño.

En la Figura 86 se puede observar la simulación para la barra 2, esta barra soporta directamente el peso del usuario, pues sobre esta se arma el cojín de asiento.



**Figura 86 Simulación de esfuerzos en barra2**

Se calcula el valor del facto de seguridad para comprobar la eficiencia de la estructura mediante la Ec. 62.

$$\eta_s = \frac{\delta_{perm}}{\delta_{sim}}$$

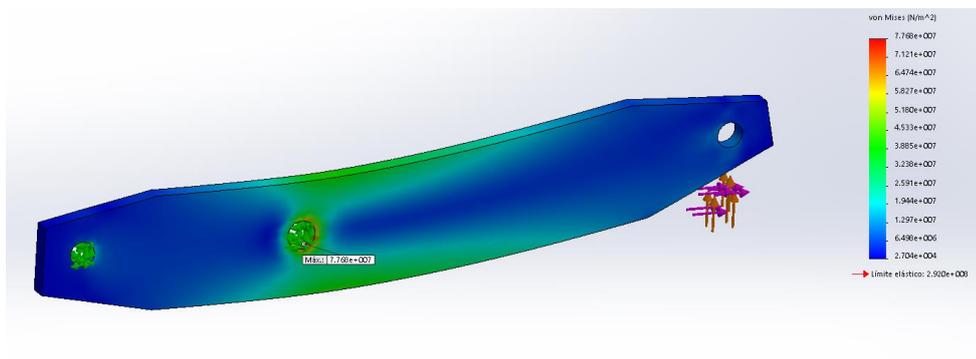
$$\eta_s = \frac{710}{292}$$

$$\eta_s = 2.4$$

**Ec. 62**

El factor en este caso es bajo, pero 2.4 representa un valor aceptable en el diseño de la pieza.

En la Figura 87 se puede observar la simulación para la barra 1, esta barra comunica el movimiento de la barra 2.



**Figura 87 Simulación de esfuerzos en barra 1**

Se calcula el valor del facto de seguridad para comprobar la eficiencia de la estructura mediante la Ec. 63.

$$\eta_s = \frac{\delta_{perm}}{\delta_{sim}}$$

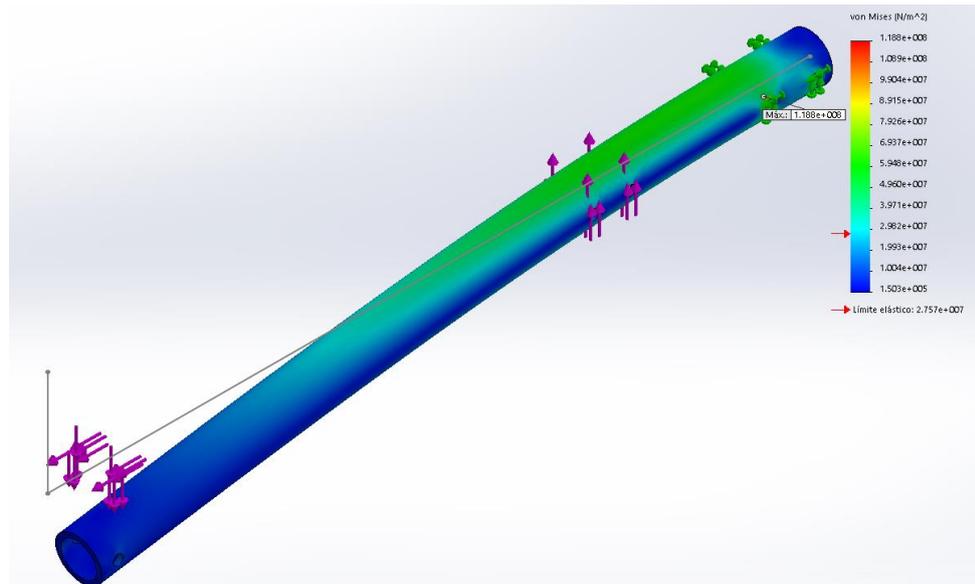
$$\eta_s = \frac{292}{7.76}$$

$$\eta_s = 37.6$$

**Ec. 63**

El factor en este caso es alto, muy por encima del requerimiento, lo que brinda confianza en el desempeño.

En la Figura 88 se puede observar la simulación para la barra principal que recibe el movimiento del actuador lineal, esta barra soporta directamente la fuerza del motor.



**Figura 88 Simulación de esfuerzos en barra**

Se calcula el valor del factor de seguridad para comprobar la eficiencia de la estructura mediante la Ec. 64.

$$\eta_s = \frac{\delta_{perm}}{\delta_{sim}}$$

$$\eta_s = \frac{27.6}{1.18}$$

$$\eta_s = 23.4$$

**Ec. 64**

El factor en este caso es alto, muy por encima del requerimiento, lo que brinda confianza en el desempeño.

En la Tabla 9 se resume, los factores de seguridad para las piezas del mecanismo del proyecto.

**Tabla 9****Resumen de factores de seguridad de piezas del mecanismo**

<b>Pieza</b>	<b>Factor de seguridad</b>
<b>Bracket de motor</b>	38.8
<b>Barra 2</b>	2.4
<b>Barra 1</b>	37.6
<b>Barra principal</b>	23.4

**3.3 Diseño del sistema eléctrico y electrónico**

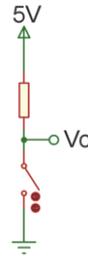
En el presente apartado se detalla los parámetros eléctricos y electrónicos del proyecto, tanto de la parte de control como la parte de potencia.

**3.3.1 Diseño de la electrónica de control****3.3.1.2 Sensores y control**

Para obtener la información de la posición del asiento de la silla se usará dos tipos de sensores, los cuales son fines de carrera para la parte más baja, y sensores de posición angular para la información del lugar exacto y su inclinación.

**Fines de carrera.** El fin de carrera se colocará en el punto más bajo del asiento, de tal forma que por medio de este se pueda conocer que el actuador se encuentra en su posición más corta.

Para una correcta implementación se deben evitar los falsos positivos y ceros lógicos, por ello se procede a usar una resistencia Pull-Up, es decir que la entrada lógica se encontrará en nivel bajo (0), mientras se encuentre en posición sentado, y cambiará a nivel alto (1), cuando empiece a levantarse o se encuentre en primera instancia en esta posición. En la Figura 89 se puede observar la conexión eléctrica del sensor.



**Figura 89 Esquema de resistencia Pull-Up**

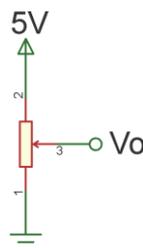
Para evitar que exista una corriente que pueda dañar al controlador se debe procurar que esta sea menor a los 100mA, para ello dimensionamos la resistencia Pull-Up, tomando en cuenta el voltaje de alimentación de 5 voltios de la placa de control. Obtenemos el valor teórico de la resistencia mediante la Ec. 49.

$$R = \frac{5}{0.1}$$

$$R = 50 \Omega$$

Para asegurar que el valor calculado es funcional, establecemos un valor comercial de 330Ω, de esta manera la corriente es baja y de fácil acceso.

**Sensores de posición angular.** Para tener un control de la inclinación se propone colocar sensores de posición angular en el punto de giro del asiento, para ello se usará potenciómetros giratorios, de tal forma que se obtenga una señal de voltaje análogo dependiendo del ángulo de giro. La salida analógica será receptada por medio del controlador y su variación dependerá del divisor de voltaje obtenido en la conexión, como se indica en la Figura 90.



**Figura 90 Conexión sensor de posición angular**

Mediante su forma de conexión obtenemos un valor mínimo de 0 voltios y un máximo de 5 voltios, que representarán un valor de 0 a 1024 dentro del controlador.

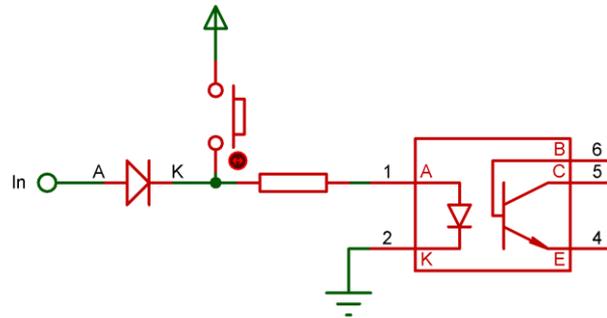
**Sensor de dirección JOYSTICK.** Este sensor será la manera de manejar la dirección y velocidad de movimiento de la silla, está compuesto por dos potenciómetros giratorios y un interruptor normalmente abierto con conexión de un terminal a voltaje de alimentación.

Los potenciómetros se manejarán de la misma manera expresada en la Figura 90, y el interruptor de la misma manera expresada en la Figura 89. Los valores que posee el mando de dirección se expresan en la Tabla 10.

**Tabla 10**  
**Características del Joystick**

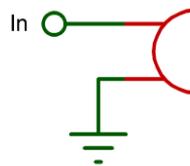
Valores de Joystick		
Etiquetas	Eje X	Eje Y
Valor total	4.42	4.42
Valor máximo negativo	0.12	0.14
Valor máximo positivo	4.42	4.42
Valor en origen	3.71	3.76

**Salidas lógicas del controlador.** El controlador posee salidas lógicas que serán necesarias acoplar para controlar la parte de potencia, para ello se usarán opto transistores, de tal forma se necesita enviar la señal que permita saturar el opto transistor pero que no queme el led del integrado. Se necesitará una forma de probar el funcionamiento sin el control, para casos de mantenimiento. Para ello se implementará pulsadores de prueba en la placa de control. De tal forma el circuito a usarse para la señal de control será el dibujado en la Figura 91.



**Figura 91 Circuito de control**

**Zumbador.** Se necesita una señal sonora que ayude a identificar las pulsaciones y la interacción con el usuario, para ello se usara un zumbador de 5 voltios, el cual emitirá un sonido al energizarse, su conexión será directa al controlador por necesitarse que la señal sea altamente audible. Su conexión se aprecia en la Figura 92.



**Figura 92 Forma de conexión del zumbador**

### 3.3.1.3 Diseño de la placa pcb de control

Para la placa de control se estima los valores de temperatura ambiente de 25° Celsius, y una corriente máxima de 500mA, para ello y observando la Figura 37, se estima la sección transversal necesaria, como:

$$A = 5 \text{ mils}^2$$

Con este valor se realiza e corte sobre la Figura 38, para obtener el valor de ancho de pista necesario, como:

$$\begin{aligned} \text{Ancho} &= 0.005 \text{ pulgadas} \\ \text{Ancho} &\approx 5\text{mil} \text{ ó } 5\text{TH} \end{aligned}$$

Este es el ancho de pista mínimo que necesita el circuito para funcionar sin problemas. Con este dato, se puede elaborar todo el circuito de control.

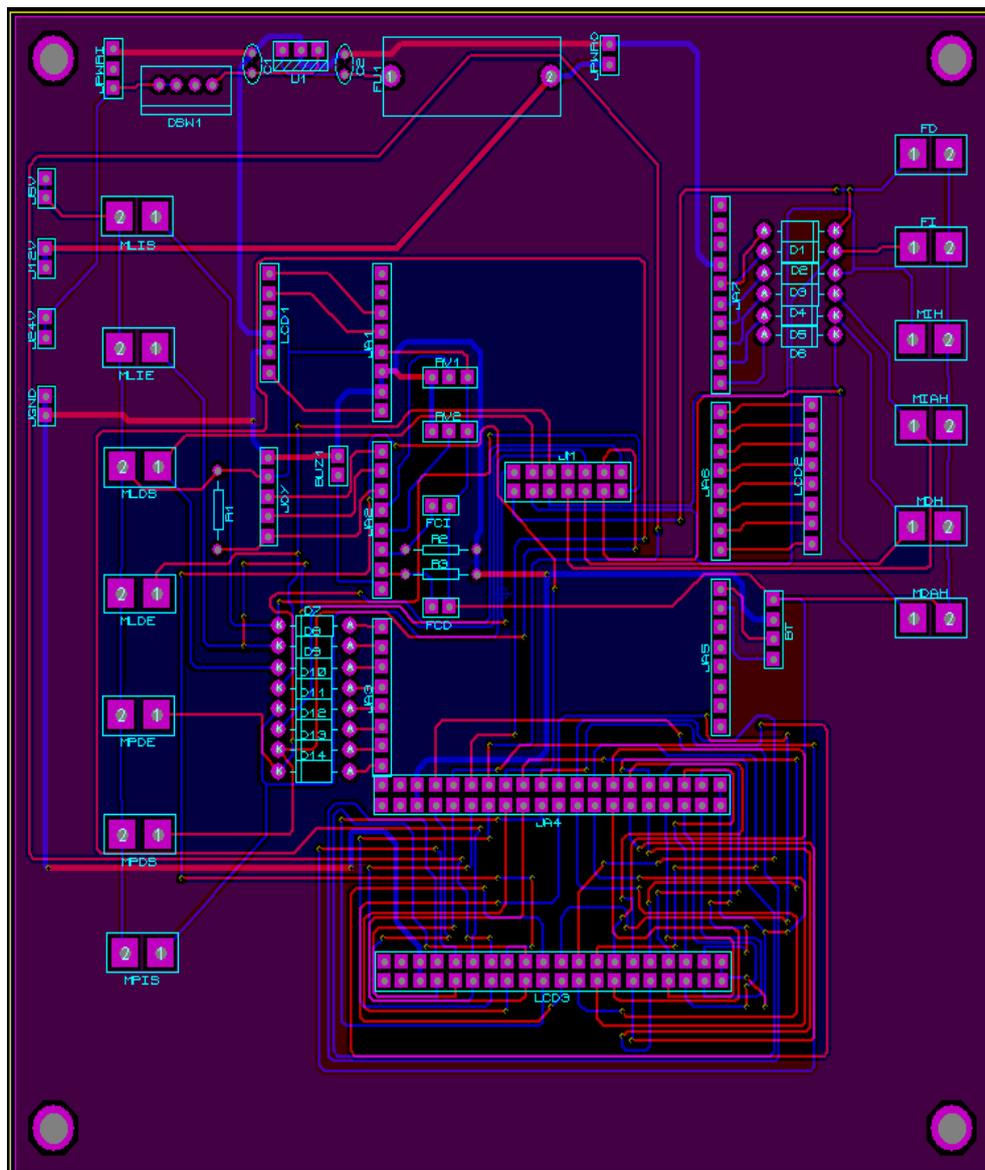
El controlador que se usará es un Arduino MEGA 2560, y los terminales que se dispondrán para la comunicación son los detallados en la Tabla 11.

**Tabla 11**

**Distribución de terminales del controlador**

Terminal	Tipo	Descripción
D0-D7	Salida digital	Reservado para LCD
D8	Salida digital	Motor móvil derecho
D9	Salida digital	Motor móvil derecho
D10	Salida digital	Motor móvil izquierdo
D11	Salida digital	Motor móvil izquierdo
D12	Salida digital	Freno izquierdo
D13	Salida digital	Freno derecho
D22-D53	Salida digital	Reservado para LCD
A0	Entrada análoga	Señal eje x de Joystick
A1	Entrada análoga	Señal eje y de Joystick
A2	Entrada digital	Interruptor de Joystick
A3	Entrada análoga	Sensor de posición angular 1
A4	Entrada análoga	Sensor de posición angular 2
A5	Entrada digital	Fin de carrera 1
A6	Entrada digital	Fin de carrera 2
A7	Salida digital	Zumbador
A8	Salida digital	Actuador lineal de bipedestación izquierdo 1
A9	Salida digital	Actuador lineal de bipedestación izquierdo 2
A10	Salida digital	Actuador lineal de bipedestación derecho 1
A11	Salida digital	Actuador lineal de bipedestación derecho 2
A12	Salida digital	Actuador lineal de piernas izquierdo 1
A13	Salida digital	Actuador lineal de piernas izquierdo 2
A14	Salida digital	Actuador lineal de piernas derecho 1
A15	Salida digital	Actuador lineal de piernas derecho 2

La placa final de ruteo se aprecia en la Figura 93, para la elaboración de esta se tomó en cuenta los valores mínimos que se pueden utilizar en las pistas.

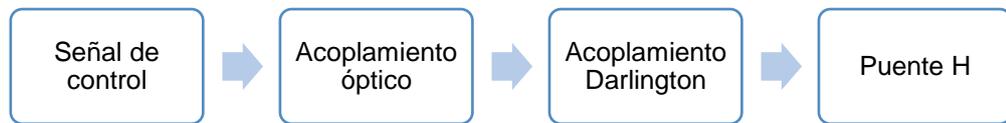


**Figura 93 Ruteo de placa de control**

Para la sujeción de la placa, se dispuso de agujeros para pernos M4 a una distancia de 8mm de distancia de los bordes.

### 3.3.2 Diseño de la electrónica de potencia

Para el diseño del acoplamiento control-potencia, se identificarán varias etapas que permitirán garantizar un correcto funcionamiento y mejorará a seguridad del circuito. Estas etapas se pueden ver en la Figura 94.



**Figura 94 Etapas del acoplamiento control-potencia**

El acoplamiento óptico se analizó en el diseño de la electrónica de control, por ello, este apartado hace referencia desde el acoplamiento Darlington de la etapa de potencia.

### 3.3.2.2 ACOPLAMIENTO DARLINGTON

A la salida del opto transistor que recibe la señal del controlador empezará el acoplamiento con la parte de potencia, para ello se usará un arreglo Darlington. Para facilitar la construcción del equipo, en el arreglo Darlington se utilizará el integrado TIP122, este corresponde ya a un arreglo Darlington.

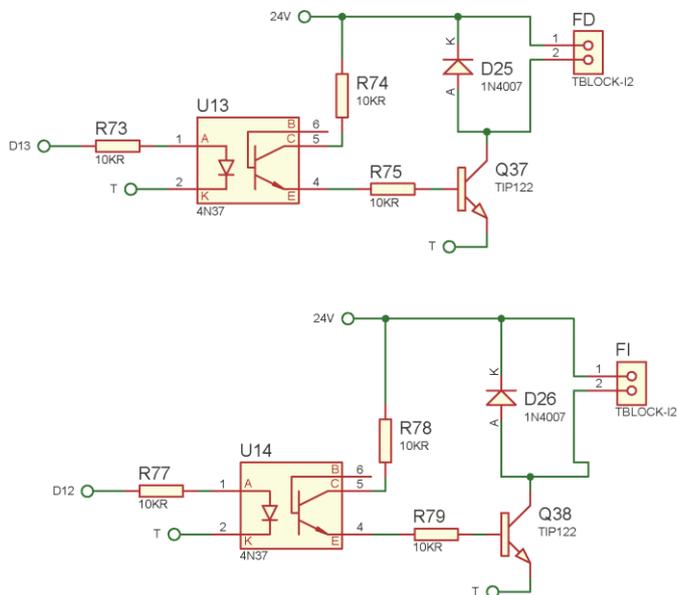
Existen tres tipos de elementos de potencia que deben activarse en distintos tiempos, y cada una posee características diferentes. Los componentes son: frenos de motores, motores lineales y motores principales.

#### Frenos de motores

Dentro de cada motor principal existe una bobina que mantiene al motor frenado todo el tiempo para seguridad del usuario. Para conocer los requerimientos de funcionamiento se realizaron pruebas de activación de los frenos, de esta manera se determinó que la corriente de trabajo en continuo del freno  $I_{fr}$  es:

$$I_{fr} = 0.5A$$

El integrado TIP122 puede resistir como máximo una corriente de 8A en pulso y 5A en trabajo continuo, por lo que su funcionalidad está muy por encima del requerimiento. La conexión de los frenos se aprecia en la Figura 95.



**Figura 95 Circuito de conexión de frenos de motores**

El acople Darlington del TIP122 es suficiente para el control de los frenos de los motores principales debido a su baja corriente de trabajo continuo.

### Motores lineales

Estos motores necesitan tener la posibilidad de poder cambiar de sentido de giro según se requiera, por lo que es necesario poder realizar primeramente un puente H que ayude con esta necesidad. Bajo medidas de carga, los motores se han sometido a medidas de corriente para obtener su rango de trabajo, estos valores están expresados en la Tabla 12 y la Tabla 13.

**Tabla 12**

### Valores de corriente medidos en motores de bipedestación

Descripción	Valor (A)
Subida sin carga	2.2
Bajada sin carga	1.4
Subida con carga	4.3
Bajada sin carga	1.9

**Tabla 13****Valores de corriente medidos en motores de reclinación**

<b>Descripción</b>	<b>Valor (A)</b>
Reclinación sin carga	1
Enderezar sin carga	0.9
Reclinación con carga	1.3
Enderezar sin carga	1.2

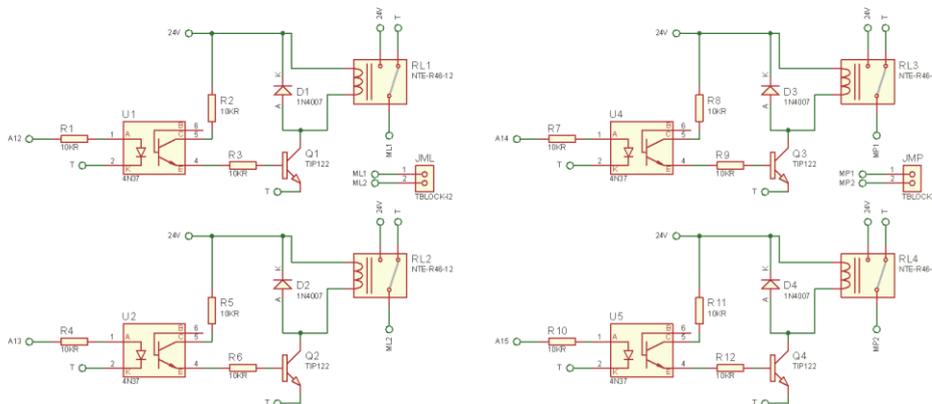
De los valores medidos se puede establecer los rangos en los que va a trabajar los motores. En base a los requerimientos se establece el circuito de conexión de los motores lineales como la Figura 96. Se utiliza un puente H con relés debido a que no es necesario tener una velocidad de conmutación alta en el encendido de los motores y tampoco en el cambio de sentido del motor.

Las características de los relés usados en el diseño se expresan en la Tabla 14. De estos se puede ver que las características de desempeño son superiores a los requerimientos de los motores.

**Tabla 14****Características de los relés**

<b>Descripción</b>	<b>Valor</b>
Voltaje de bobina	24 VDC
Corriente de trabajo continuo de salida	10A
Voltaje de trabajo continuo de salida	28VDC

Debido a que los motores son bobinas al igual que los relés, se utilizan diodos de protección que eviten retornos de corriente que puedan dañar el resto del circuito, como se ve en la Figura 95 y la Figura 96.



**Figura 96 Circuito de conexión de motores lineales**

### 3.3.2.3 DISEÑO DEL PUENTE H

#### Motores principales

Los motores principales deben tener la propiedad de cambiar de sentido de giro en cualquier momento y aparte también tener una velocidad de conmutación sumamente rápida para poder controlar su velocidad con la modulación de ancho de pulso del controlador.

Para facilitar el control y debido a la potencia requerida, se usarán MOSFETS de alta corriente en trabajo continuo y alta velocidad de conmutación. Los motores en hoja técnica usan un máximo de 14A en máxima carga.

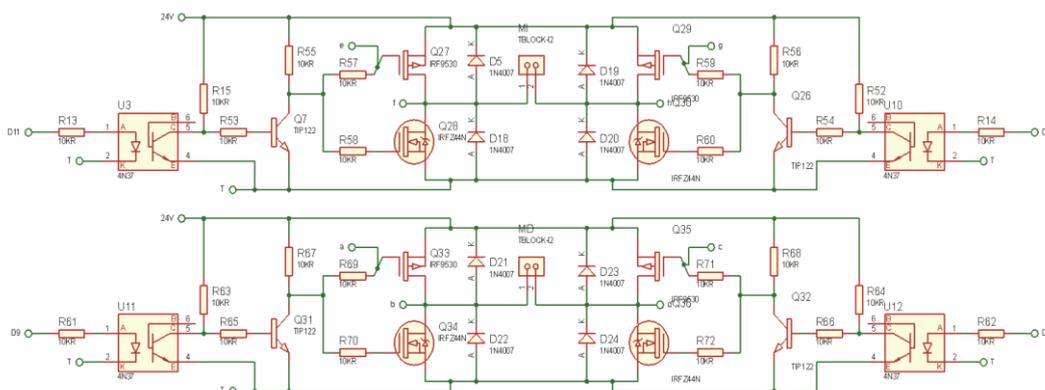
Se usarán los MOSFET IRFZ44N, un transistor de canal N para la parte baja del puente H y MOSFET IRF9540, un transistor de canal P para la parte alta del puente H. Las características principales se detallan en la Tabla 15.

**Tabla 15**

#### Características básicas de MOSFET usados

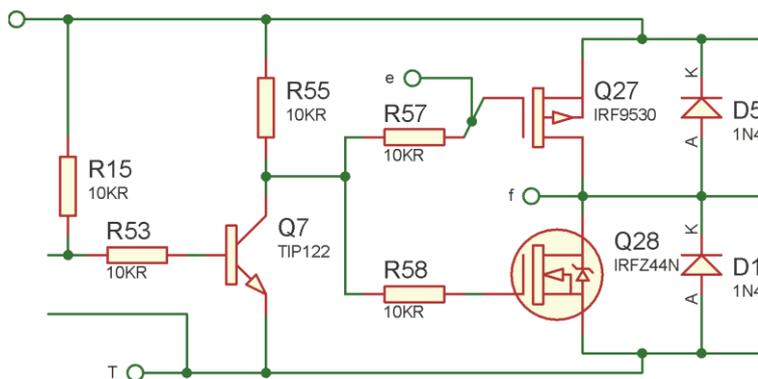
Descripción	IRF9540	IRFZ44N
Corriente de pulso	-72 A	170 A
Corriente en continuo	-19 A	49 A
Voltaje máximo	-100 V	55 V

Al usar la combinación de transistores de canal N y canal P, se facilita la activación del puente H y el disparo de estos. El circuito total del puente H se detalla en la Figura 97.



**Figura 97 Puente H de motores principales, vista total**

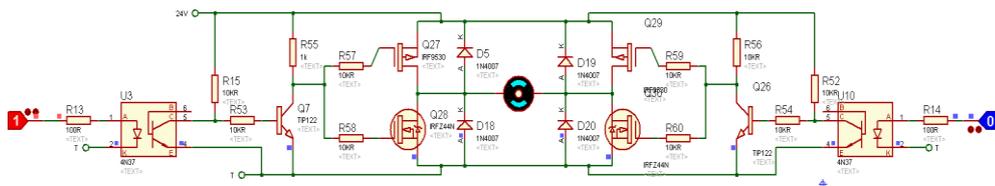
De acuerdo con la Figura 94, para la conexión del motor se usa distintos acoples que brindan mayo seguridad en la configuración. En la Figura 98 se puede notar el acople Darlington con el TIP122 que viene después del acople óptico y que conecta con los MOSFET que encienden el puente H.



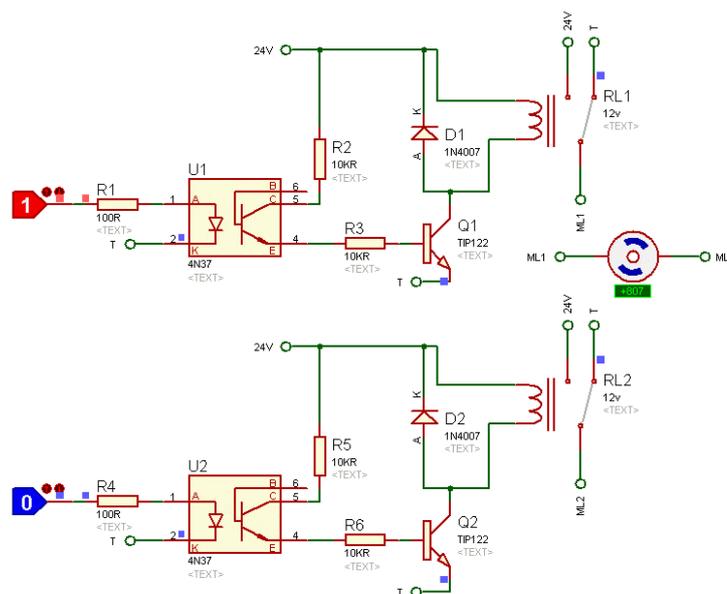
**Figura 98 Puente H de motores principales, vista medio puente**

### 3.3.2.4 SIMULACIÓN ELECTRÓNICA

En base al apartado anterior y el diseño realizado, se procede a simular el circuito con ayuda del software ISIS Proteus, es cual nos permite ver la correcta funcionalidad del puente H de los motores principales en la Figura 99 y el funcionamiento del puente H de los motores lineales en la Figura 100.



**Figura 99 Simulación puente H de motores principales**



**Figura 100 Simulación de puente H motores lineales**

Después de verificar el correcto funcionamiento de los circuitos diseñados mediante simulación electrónica, se puede continuar con el diseño de la placa de potencia para su construcción e implementación.

### 3.3.2.5 DISEÑO DE LA PLACA PCB DE POTENCIA

Para la placa de potencia se estima los valores de temperatura ambiente de 25° Celsius, y una corriente máxima de 5A para los motores lineales y 15A

para los motores principales, para ello y observando la Figura 37, se estima la sección transversal necesaria, para los motores principales como:

$$A_{MP} = 400 \text{ mils}^2$$

La sección trasversal necesaria para los motores lineales como:

$$A_{MP} = 70 \text{ mils}^2$$

Con este valor se realiza el corte sobre la Figura 38, para obtener el valor de ancho de pista necesario, para los motores principales como:

$$\begin{aligned} \text{Ancho} &= 0.1 \text{ pulgadas} \\ \text{Ancho} &\approx 100\text{mil} \text{ ó } 100TH \end{aligned}$$

El ancho de pista necesario para los motores lineales como:

$$\begin{aligned} \text{Ancho} &= 0.05 \text{ pulgadas} \\ \text{Ancho} &\approx 50\text{mil} \text{ ó } 50TH \end{aligned}$$

Este es el ancho de pista mínimo que necesita el circuito para funcionar sin problemas. Con estos datos, se puede elaborar todo el circuito de potencia.

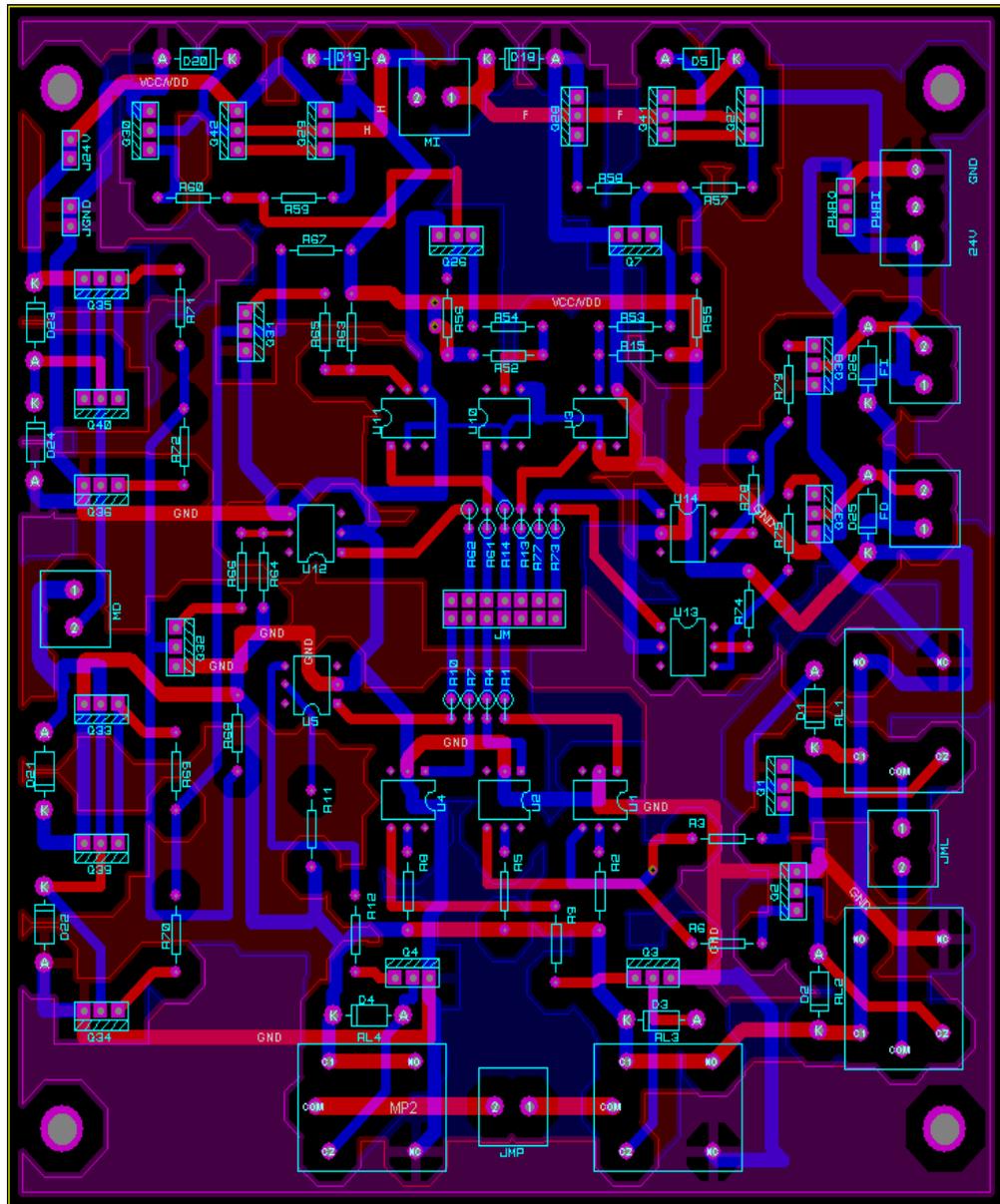
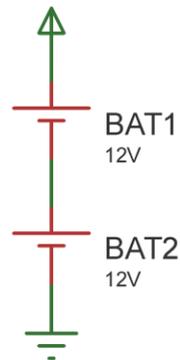


Figura 101 Ruteo del circuito de potencia

### 3.3.2.6 FUENTE DE ALIMENTACIÓN

Para la fuente de alimentación se usa dos baterías de 12v y de 33Ah cada una, que puedan suplir la potencia necesaria. Estas baterías son las seleccionadas debido a su facilidad de obtención en el mercado local. Dado que el sistema funciona con 24 V, las baterías son conectadas en serie como la Figura 102.



**Figura 102 Conexión serie de las baterías**

### 3.4 Diseño del sistema de control

Para el presente proyecto, se usará como controlador el Arduino MEGA 2560, por sus prestaciones y su facilidad de implementación. Sus características se detallan en la Tabla 16.

**Tabla 16**

#### **Especificaciones técnicas de Arduino MEGA 2560**

**Fuente: (ARDUINO, 2015)**

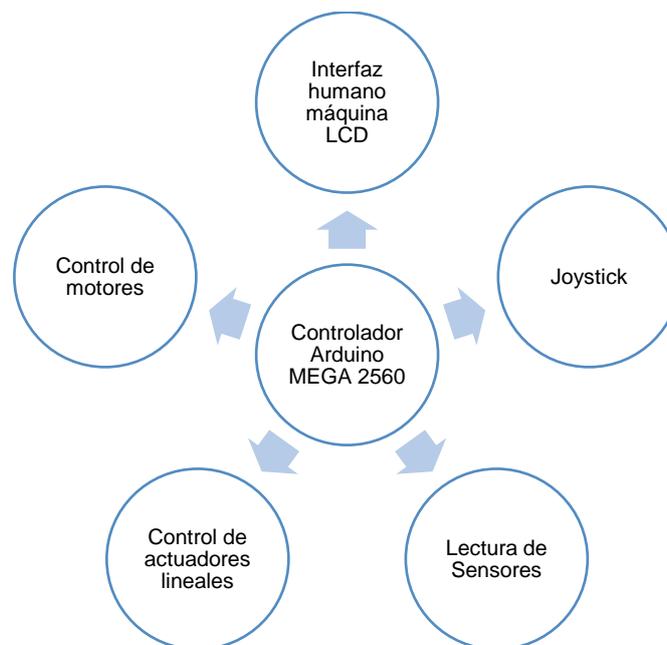
Características	Especificación
Microcontrolador	ATmega2560
Voltaje de operación	5V
Voltaje de entrada	7-12V
Límite de voltaje	6-20V
Terminales digitales I/O	54 (15 PWM)
Terminales analógicos de entrada	16
Corriente DC por terminal I/O	20 mA
Corriente DC por terminal 3.3V	50 mA
Memoria Flash	256 KB de los cuales 8 KB son usados en bootloader
SRAM	8 KB
EEPROM	4 KB
Reloj	16 MHz

Continua

Longitud	101.52 mm
Ancho	53.3 mm
Peso	37 g

### 3.4.1 Tarjeta de adquisición de datos

El microcontrolador Arduino MEGA 2560, será la tarjeta que adquirirá los datos del sistema y entregará las señales de control, así también será el procesador del interfaz humano máquina. El sistema se compondrá entonces de una serie de bloques tomando como centro al microcontrolador Arduino MEGA 2560. En la Figura 103 se aprecia la constitución total del sistema.



**Figura 103 Organización del sistema del proyecto**

### 3.4.2 Requerimientos de funcionamiento

El producto final desarrollado debe contener un sistema de control que permita al usuario sentirse seguro y confiado de las acciones que vaya a realizar. Para ello se debe establecer algunas características del sistema de control que permita guiar el diseño del control, estas características son

- Manejo intuitivo
- Flexibilidad de control

- Seguro y cómodo

#### **3.4.2.1 Movilidad**

La movilidad es uno de los puntos clave de la silla, así que su control tiene que ser eficiente, debe responder de correcta manera con los cambios de dirección y debe poder manejarse de una manera intuitiva. Para ello se establecerá dos tipos de interfaz de control, los cuales son:

- Mando por control Joystick
- Mando por control de pantalla táctil

Ambos mandos deben ser conmutables fácilmente y su respuesta debe ser la misma.

El mando por control de Joystick se caracteriza por poseer dos ejes, estos controlaran la velocidad y la dirección en conjunto.

El mando por control de pantalla táctil, poseerá una superficie que simule un sistema de coordenadas dentro de una circunferencia, que permitirá mediante la pulsación en la zona de esta, dirigir la silla y su velocidad.

#### **3.4.2.2 Bipedestación**

La bipedestación necesita menores exigencias de precisión en su control que el sistema de movilidad, pero si posee igual exigencia de seguridad. Al igual que el anterior sistema, este posee características específicas que guían el diseño, las cuales son:

- No permitir movilidad mientras funcione la bipedestación
- Mando manual y mando automático
- Botón de paro de emergencia.

El control se realizará mediante la pantalla táctil y la conmutación entre el modo automático y manual será igualmente en la pantalla táctil. El paro de emergencia se implementará con el interruptor del joystick.

### 3.4.2.3 Reclinación

La reclinación es el sistema de menor exigencia de precisión, ya que es simplemente usado para el cambio de postura del usuario. Aún al no ser muy exigente, posee sus parámetros de diseño y características que son:

- Modo automático y modo manual
- No se permite la movilidad mientras funcione la reclinación
- Al intentar iniciar la movilidad en una reclinación completa, esta debe regresar automáticamente a su estado inicial y dar paso a la movilidad.
- Botón de paro de emergencia

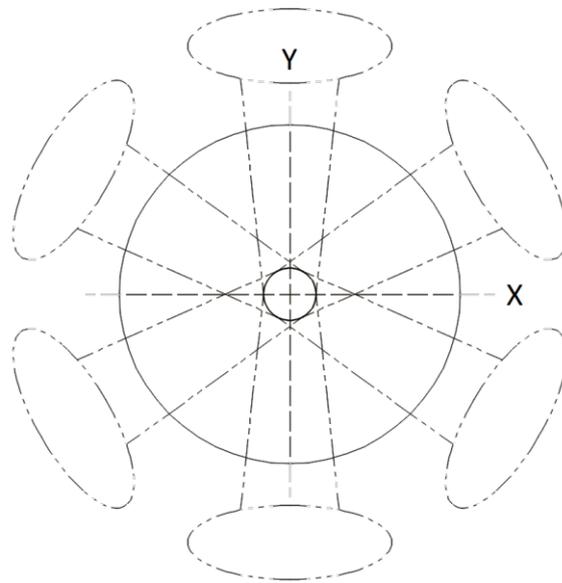
El control y paro de emergencia será similar al sistema de bipedestación.

### 3.4.3 Programación del sistema de movilidad

#### ANÁLISIS DEL SISTEMA

Para el control de la movilidad de la silla, se debe tomar en cuenta las variables de entrada que tenemos y las variables que necesitaremos controlar. Al tener en cuenta que es necesario controlar la velocidad y la dirección, se puede arcar dos variables de entrada. Los motores, si bien controlan el movimiento de la silla, para lograr una correcta dirección su comportamiento es independiente.

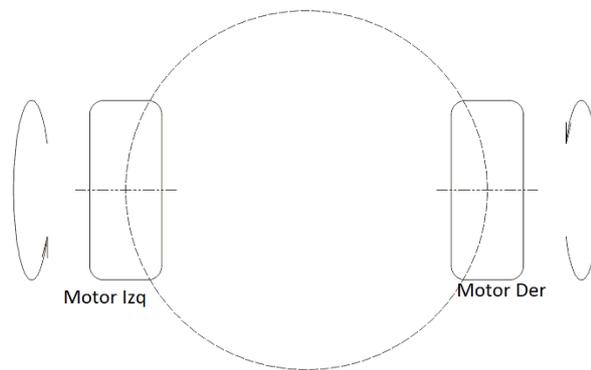
**VARIABLES DE ENTRADA.** La dirección es controlada por dos métodos que deben presentar una misma respuesta en semejantes condiciones. Por ello se usa la semejanza de movimientos que se puede obtener con el joystick, la Figura 104 expresa los movimientos del mando.



**Figura 104 Movimientos del Joystick**

El tipo de movimiento del joystick tiende a formar un círculo imaginario, de esta manera para el control por medio de la pantalla táctil se buscará una lógica semejante. Usando un círculo que simule al Joystick se logrará tener una misma lógica de entrada. Como se observa en la Figura 104, se puede dividir el movimiento en ejes cartesianos, donde el eje y determine la velocidad y el eje x la dirección. De este modo se tiene dos variables de entrada, que serían dirección en x y dirección en y.

**Variables de salida.** El sistema posee cuatro llantas, dos delanteras y dos posteriores, de las cuales las delanteras son de libre movimiento y las posteriores son motrices. Para conseguir que la silla ejecute giros su comportamiento es distinto. Como ejemplo en la Figura 105 se puede ver el movimiento que debe realizar los motores para ejecutar un giro completo a la izquierda.



**Figura 105 Ejemplo de independencia de movimiento de motores**

Por lo tanto, el sistema de control debe estar enfocado a tener dos variables de salidas independientes que se debe controlar.

**Tipo de sistema.** Analizadas las variables de entrada y las variables de salida se pueden resumir en la Tabla 17. Con este dato se elegirá realizar la metodología de control por medio de lógica difusa, debido a que esta permite una mejor manipulación en sistemas MIMO. Un control PID de dos entradas y dos salidas complicaría en gran manera el desempeño e implementación del sistema.

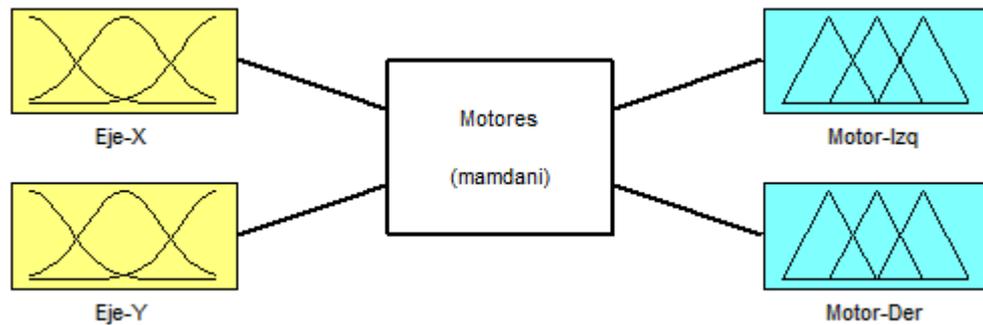
**Tabla 17**

**Variables del sistema de movilidad**

Variables de entrada	Variables de salida
Dirección eje x	Velocidad del motor izquierdo
Dirección eje y	Velocidad del motor derecho

Con estos datos, se puede empezar a realizar la programación del control por medio de lógica difusa.

**Control difuso.** Seleccionado el control que se realizará, se puede esquematizar el sistema en la Figura 106. Primero se deberá establecer las funciones de membresía de cada variable, para continuar con establecer las relaciones de entrada y salida mediante las reglas de fusificación.



**Figura 106 Esquema de control difuso del sistema**

### **FUNCIONES DE MEMBRESÍA**

Las funciones de membresía describen el comportamiento difuso de las variables de entrada y salida, estas se describen de acuerdo a la variable. Primer estableciendo los límites que estas tendrán.

Para las variables de entrada, se entenderá que la señal de entrada es análoga y para un mejor desarrollo se la escalará entre valores de -100 a 100. En el caso del eje X esto significará que el valor -100 representa una dirección totalmente a la izquierda, el valor 100 representa una dirección totalmente a la derecha y el valor 0 representa el centro, es decir, sin acción sobre la dirección X. En el caso del eje Y esto significará que el valor -100 representa una dirección totalmente de retroceso, el valor 100 representa una dirección totalmente de avance y el valor 0 representa igualmente el centro, es decir, sin acción sobre la dirección Y.

Para las variables de salida, se entenderá que la señal de salida para control de velocidad es PWM, por lo tanto, los valores estarán comprendidos entre -255 a 255, tomando en cuenta que no puede haber valores negativos de PWM, el sentido negativo de estos representa un giro inverso. Aunque las variables de salida son independientes, ambas poseen lógicas semejantes de distinta acción. Por ello si se habla de un valor de -255, representa un sentido totalmente inverso a máxima velocidad, el motor se encuentra en retroceso.

Si se habla de un valor de 255, representa un sentido totalmente positivo a máxima velocidad, el motor se encuentra en avance.

### **Funciones de membresía de eje X.**

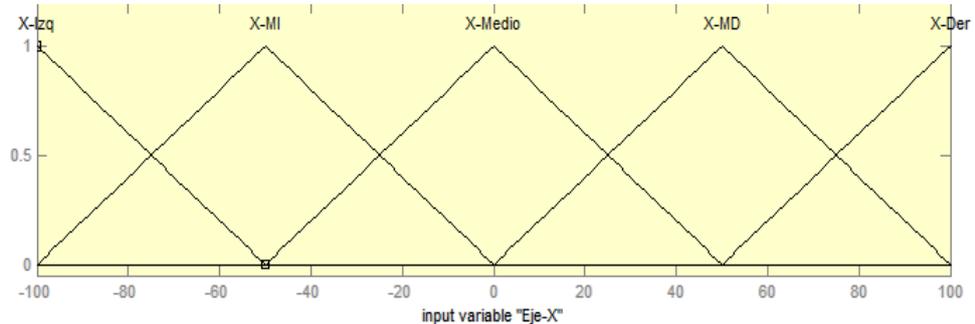
En la Tabla 18 se puede analizar el resumen de las funciones de membresía del eje x del control. Para entenderlo se hablaría de 5 rangos específicos en los que se puede dividir el rango de detección de la posición del control.

**Tabla 18**

### **Funciones de membresía del eje X**

Funciones de membresía eje X		
Denominación	Valores	Descripción
X-Izq	[-100,-100,-50]	Dirección total a la izquierda
X-MI	[-100,-50,0]	Dirección medio izquierda
X-Medio	[-50,0,50]	Dirección al origen
X-MD	[0,50,100]	Dirección medio derecha
X-Der	[50,100,100]	Dirección total a la derecha

Para entender de mejor manera la selección de rangos, la Figura 107 muestra como estos se establecen. Para evitar puntos de incertidumbre entre un rango y otro, los rangos se cruzan entre sí, esto ayuda a mejorar el desempeño de las funciones. De esta manera se aprecia que -100, es totalmente a la izquierda, -50 medio izquierda, 0 centro, 50 medio derecha y 100 totalmente a la derecha. Los rangos intermedios entre estos se calcularán en el proceso del control.



**Figura 107 Gráfica de las funciones de membresía del eje X**

### **Funciones de membresía de eje Y.**

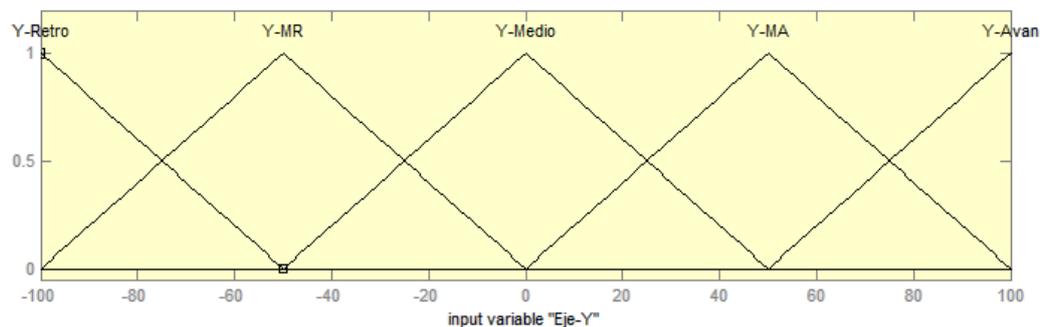
De la misma manera que las funciones de membresía del eje X, el eje Y se comporta de la misma manera, simplemente cambiando el sentido de horizontal a vertical. Al ser el desplazamiento el mismo, los valores de las funciones son iguales que los valores de las funciones del eje X. Esto se puede apreciar en la Tabla 19.

**Tabla 19**

### **Funciones de membresía del eje Y**

Funciones de membresía eje Y		
Denominación	Valores	Descripción
Y-Retro	[-100,-100,-50]	Dirección total de retroceso
Y-MR	[-100,-50,0]	Dirección de medio retroceso
Y-Medio	[-50,0,50]	Dirección nula
Y-MA	[0,50,100]	Dirección de medio avance
Y-Avan	[50,100,100]	Dirección total de avance

Los rangos de la posición del eje Y es análogo a los rangos de la posición del eje X, por eso la Figura 107 es semejante a la Figura 108 que corresponde al gráfico de las funciones de membresía del eje Y.



**Figura 108 Gráfica de las funciones de membresía del eje Y**

### **Funciones de membresía de motor izquierdo.**

Las funciones de membresía de los motores representan los valores y el comportamiento que se busca pueda adquirir cada motor dependiendo de las variables de entrada. Estas funciones son igualmente divididas en rangos que bajo cálculos adquirirán los motores. La salida ha sido dividida igualmente en 5 rangos, que representan giros de retroceso rápido, giro de retroceso medio, motor en reposo, giro de avance medio y giro de avance rápido.

Para el motor izquierdo las funciones de salida se expresan en la Tabla 20, que posee la denominación de la regla y la descripción de esta.

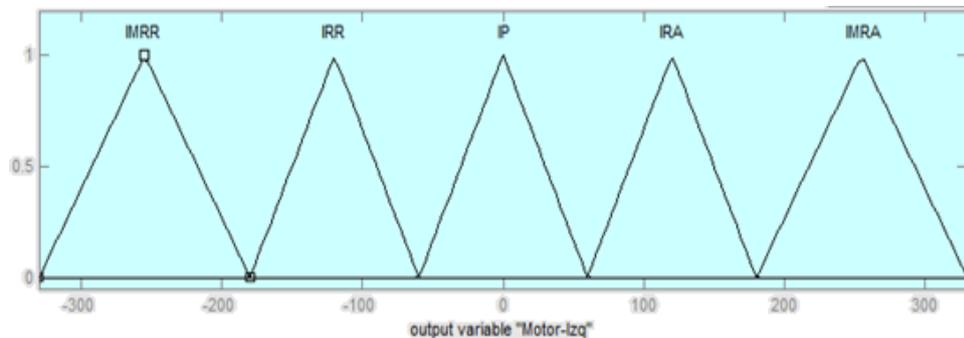
**Tabla 20**

### **Funciones de membresía del motor izquierdo**

Funciones de membresía motor izquierdo		
Denominación	Valores	Descripción
IMRR	[-255,-255,-180]	Giro total de retroceso
IRR	[-180,-120,-60]	Giro de medio retroceso
IP	[-60,0,60]	Motor parado
IRA	[60,120,180]	Giro de medio avance
IMRA	[180,255,255]	Giro total de avance

Las funciones de membresía del motor izquierdo se aprecian de mejor manera en la Figura 109, en esta puede apreciarse que los valores máximos de salida son -255 y 255 que representa el valor máximo que se asigna en ancho de pulso en el controlador. Así mismo el valor en reposo es 0 y los

valores medios son -120 y 120 para retroceso medio y avance medio respectivamente.



**Figura 109 Gráfica de las funciones de membresía del motor izquierdo**

#### **Funciones de membresía de motor derecho.**

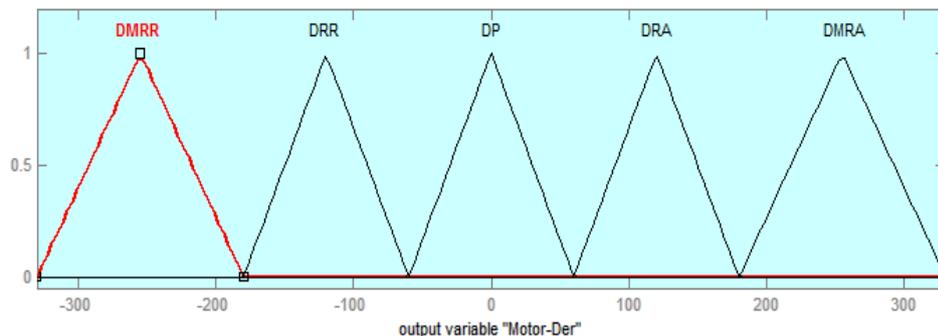
Para el motor derecho las funciones de membresía son semejantes, en la Tabla 21 se puede apreciar la denominación, los valores y la descripción de cada una de las funciones.

**Tabla 21**

#### **Funciones de membresía del motor derecho**

Funciones de membresía motor derecho		
Denominación	Valores	Descripción
DMRR	[-255,-255,-180]	Giro total de retroceso
DRR	[-180,-120,-60]	Giro de medio retroceso
DP	[-60,0,60]	Motor parado
DRA	[60,120,180]	Giro de medio avance
DMRA	[180,255,255]	Giro total de avance

De la misma manera, las funciones del motor derecho graficadas son semejantes que la del motor izquierdo, como se aprecia en la Figura 108.



**Figura 110 Gráfica de las funciones de membresía del motor derecho**

### REGLAS DE CONTROL DIFUSO

Las reglas de control difuso, representan la relación entre las variables de entrada y las variables de salida. La elaboración de estas reglas son la parte más importante del control, ya que en base a estas se podrá apreciar el desempeño. Al ser un control análogo, el cuidado de la elaboración es muy minucioso.

En la Tabla 22 se aprecia la elaboración de las reglas de control del motor izquierdo, para entender su función se toma la primera regla que es la intersección de las funciones de membresía del eje Y con las funciones de membresía del eje X. La primera regla establece la intersección entre “Y-Retro” y “X-Izq”, y su resultado es “IRR”. Esto significa que cuando el control esté en la posición total de retroceso y la posición total izquierda, el motor izquierdo se comportará en retroceso de máxima velocidad.

**Tabla 22**

#### Reglas de control difuso del motor izquierdo

	Y-Retro	Y-MR	Y-Medio	Y-MA	Y-Avan
<b><i>X-Izq</i></b>	IRR	IP	IMRR	IP	IRA
<b><i>X-MI</i></b>	IP	IRR	IRR	IRA	IP
<b><i>X-Medio</i></b>	IMRR	IRR	IP	IRA	IMRA
<b><i>X-MD</i></b>	IMRR	IMRR	IRA	IMRA	IMRA
<b><i>X-Der</i></b>	IMRR	IRR	IMRA	IRA	IMRA

En la Tabla 23, se aprecia las reglas de control del motor derecho. Para comprender mejor, se toma a ejemplo la primera intersección, al igual que en las reglas del motor izquierdo. La primera regla establece la intersección entre “Y-Retro” y “X-Izq”, y su resultado es “DMRR”. Esto significa que cuando el control esté en la posición total de retroceso y la posición total izquierda, el motor izquierdo se comportará en retroceso de máxima velocidad.

Como resultado de las dos primeras intersecciones, ambos motores retrocederán, pero al ser que uno retrocede en mayor velocidad que el otro, la dirección será izquierda en retroceso de alta velocidad.

**Tabla 23**

**Reglas de control difuso del motor derecho**

	Y-Retro	Y-MR	Y-Medio	Y-MA	Y-Avan
<i>X-Izq</i>	DMRR	DRR	DMRA	DRA	DMRA
<i>X-MI</i>	DMRR	DMRR	DRA	DMRA	DMRA
<i>X-Medio</i>	DMRR	DRR	DP	DRA	DMRA
<i>X-MD</i>	DP	DRR	DRR	DRA	DP
<i>X-Der</i>	DRR	DP	DMRR	DP	DRA

En base a todas las funciones de membresía y las reglas de control, se puede apreciar en la Tabla 24 el resumen de todas las 25 reglas resultantes que deberán ser simuladas y programadas en el control del proyecto.

**Tabla 24**

**Resumen y significado de las reglas de control difuso**

	EJE X	EJE Y	M I	M D	SIGNIFICADO
1	X-IZQ	Y-Avan	IRA	DMRA	Si el eje X vale: X-IZQ, y el eje Y vale: Y-Avan, Entonces el motor izquierdo es IRA y el motor derecho es DMRA
2	X-IZQ	Y-MA	IP	DRA	Si el eje X vale: X-IZQ, y el eje Y vale: Y-MA, Entonces el motor izquierdo es IP y el motor derecho es DRA
3	X-IZQ	Y-Medio	IMRR	DMRA	Si el eje X vale: X-IZQ, y el eje Y vale: Y-Medio, Entonces el motor izquierdo es IMRR y el motor derecho es DMRA

Continua 

4	X-IZQ	Y-MR	IP	DRR	Si el eje X vale: X-IZQ, y el eje Y vale: Y-MR, Entonces el motor izquierdo es IP y el motor derecho es DRR
5	X-IZQ	Y-Retro	IRR	DMRR	Si el eje X vale: X-IZQ, y el eje Y vale: Y-Retro, Entonces el motor izquierdo es IRR y el motor derecho es DMRR
6	X-MI	Y-Avan	IP	DMRA	Si el eje X vale: X-MI, y el eje Y vale: Y-Avan, Entonces el motor izquierdo es IP y el motor derecho es DMRA
7	X-MI	Y-MA	IRA	DMRA	Si el eje X vale: X-MI, y el eje Y vale: Y-MA, Entonces el motor izquierdo es IRA y el motor derecho es DMRA
8	X-MI	Y-Medio	IRR	DRA	Si el eje X vale: X-MI, y el eje Y vale: Y-Medio, Entonces el motor izquierdo es IRR y el motor derecho es DRA
9	X-MI	Y-MR	IRR	DMRR	Si el eje X vale: X-MI, y el eje Y vale: Y-MR, Entonces el motor izquierdo es IRR y el motor derecho es DMRR
10	X-MI	Y-Retro	IP	DMRR	Si el eje X vale: X-MI, y el eje Y vale: Y-Retro, Entonces el motor izquierdo es IP y el motor derecho es DMRR
11	X-Medio	Y-Avan	IMRA	DMRA	Si el eje X vale: X-Medio, y el eje Y vale: Y-Avan, Entonces el motor izquierdo es IMRA y el motor derecho es DMRA
12	X-Medio	Y-MA	IRA	DRA	Si el eje X vale: X-Medio, y el eje Y vale: Y-MA, Entonces el motor izquierdo es IRA y el motor derecho es DRA
13	X-Medio	Y-Medio	IP	DP	Si el eje X vale: X-Medio, y el eje Y vale: Y-Medio, Entonces el motor izquierdo es IP y el motor derecho es DP
14	X-Medio	Y-MR	IRR	DRR	Si el eje X vale: X-Medio, y el eje Y vale: Y-MR, Entonces el motor izquierdo es IRR y el motor derecho es DRR
15	X-Medio	Y-Retro	IMRR	DMRR	Si el eje X vale: X-Medio, y el eje Y vale: Y-Retro, Entonces el motor izquierdo es IMRR y el motor derecho es DMRR
16	X-MD	Y-Avan	IMRA	DP	Si el eje X vale: X-MD, y el eje Y vale: Y-Avan, Entonces el motor izquierdo es IMRA y el motor derecho es DP
17	X-MD	Y-MA	IMRA	DRA	Si el eje X vale: X-MD, y el eje Y vale: Y-MA, Entonces el motor izquierdo es IMRA y el motor derecho es DRA
18	X-MD	Y-Medio	IRA	DRR	Si el eje X vale: X-MD, y el eje Y vale: Y-Medio, Entonces el motor izquierdo es IRA y el motor derecho es DRR
19	X-MD	Y-MR	IMRR	DRR	Si el eje X vale: X-MD, y el eje Y vale: Y-MR, Entonces el motor izquierdo es IMRR y el motor derecho es DRR

20	X-MD	Y-Retro	IMRR	DP	Si el eje X vale: X-MD, y el eje Y vale: Y-Retro, Entonces el motor izquierdo es IMRR y el motor derecho es DP
21	X-DER	Y-Avan	IMRA	DRA	Si el eje X vale: X-DER, y el eje Y vale: Y-Avan, Entonces el motor izquierdo es IMRA y el motor derecho es DRA
22	X-DER	Y-MA	IRA	DP	Si el eje X vale: X-DER, y el eje Y vale: Y-MA, Entonces el motor izquierdo es IRA y el motor derecho es DP
23	X-DER	Y-Medio	IMRA	DMRR	Si el eje X vale: X-DER, y el eje Y vale: Y-Medio, Entonces el motor izquierdo es IMRA y el motor derecho es DMRR
24	X-DER	Y-MR	IRR	DP	Si el eje X vale: X-DER, y el eje Y vale: Y-MR, Entonces el motor izquierdo es IRR y el motor derecho es DP
25	X-DER	Y-Retro	IMRR	DRR	Si el eje X vale: X-DER, y el eje Y vale: Y-Retro, Entonces el motor izquierdo es IMRR y el motor derecho es DRR

## MÉTODO DE DEFUSIFICACIÓN

El método de defusificación que se usará es el método de pesos ponderados, este método permitirá de una manera más eficiente la programación del control. Este se basa en que la salida es el mínimo valor de todos aquellos que generan el valor más alto de la función de membresía.

Calculando para valores de ejemplo de cálculo, si  $X=-80$  y  $Y=80$ , entonces se obtienen que cumplen cuatro reglas en base a las Figura 107, Figura 108 y la Tabla 22. En la Tabla 24 se aprecia que cumple la regla 1, 2, 6 y 7.

Los resultados se expresan en las Ec. 65, Ec. 66, Ec. 67 y Ec. 68, para la regla 1, 2, 6 y 7 respectivamente.

$$\alpha_1 = \min(0.6 \quad 0.6) = 0.6 \quad \text{Ec. 65}$$

$$\alpha_2 = \min(0.6 \quad 0.4) = 0.4 \quad \text{Ec. 66}$$

$$\alpha_3 = \min(0.4 \quad 0.6) = 0.4 \quad \text{Ec. 67}$$

$$\alpha_4 = \min(0.4 \quad 0.4) = 0.4 \quad \text{Ec. 68}$$

Para cada regla, los resultados según la Tabla 22 y la Figura 109, se expresan en las Ec. 69, Ec. 70, Ec. 71 y Ec. 55

$$z_1 = 120 \quad \text{Ec. 69}$$

$$\begin{aligned} z_2 &= 0 && \text{Ec. 70} \\ z_3 &= 0 && \text{Ec. 71} \\ z_4 &= 120 && \text{Ec. 72} \end{aligned}$$

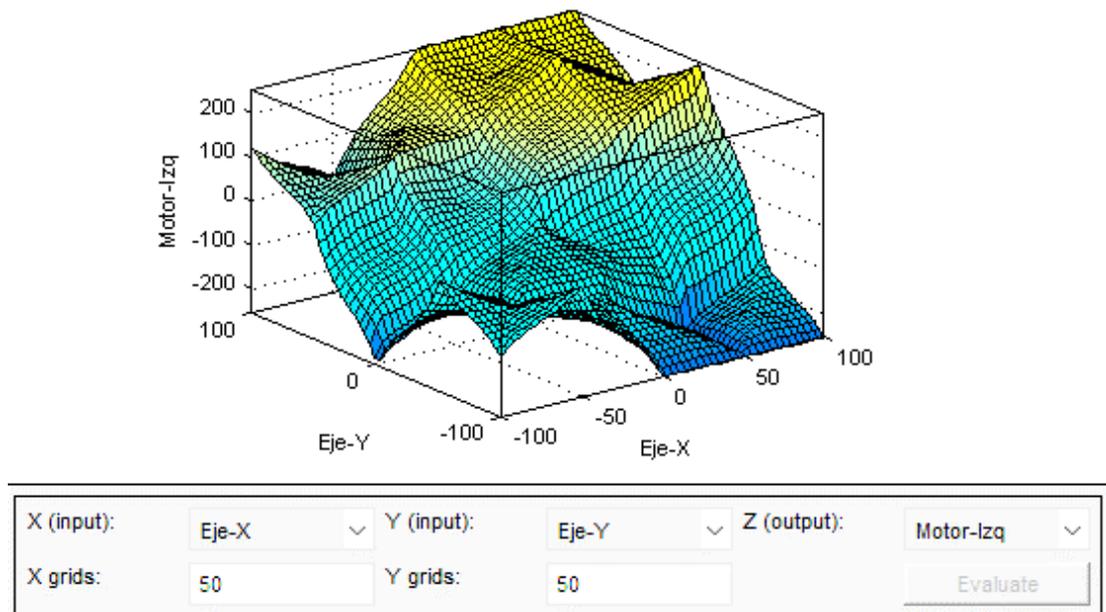
El valor final se calcula mediante la Ec. 55, y este será el valor que el controlador debe enviar al motor izquierdo.

$$\begin{aligned} z^* &= \frac{z_1\alpha_1 + z_2\alpha_2 + z_3\alpha_3 + z_4\alpha_4}{\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4} \\ z^* &= \frac{120 * 0.6 + 0 * 0.4 + 0 * 0.4 + 120 * 0.4}{0.6 + 0.4 + 0.4 + 0.4} && \text{Ec. 73} \\ z^* &= 66.67 \end{aligned}$$

Este proceso se repite para el motor derecho y para todos los valores en el tiempo.

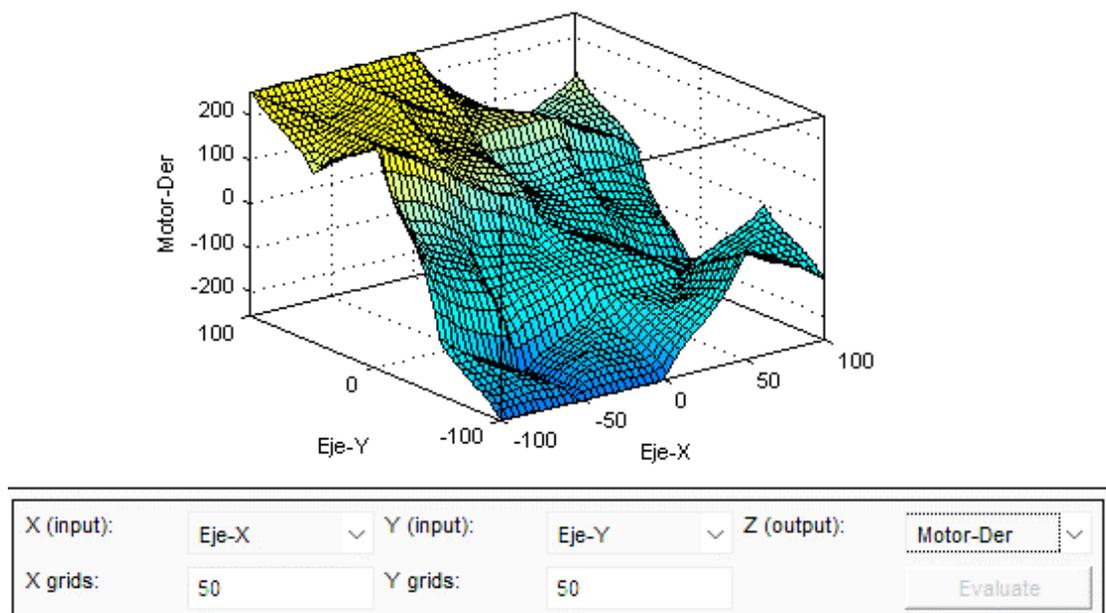
### **SIMULACIÓN DEL SISTEMA**

Mediante el uso del software MatLab, se procede a la simulación del sistema y de las reglas de control para verificar el comportamiento del control diseñado. En la Figura 111 y la Figura 112 se puede apreciar la superficie de control del motor izquierdo y el motor derecho respectivamente. Se aprecia en color amarillo los valores más altos y positivos, mientras que en color azul se aprecia los valores más altos y negativos.



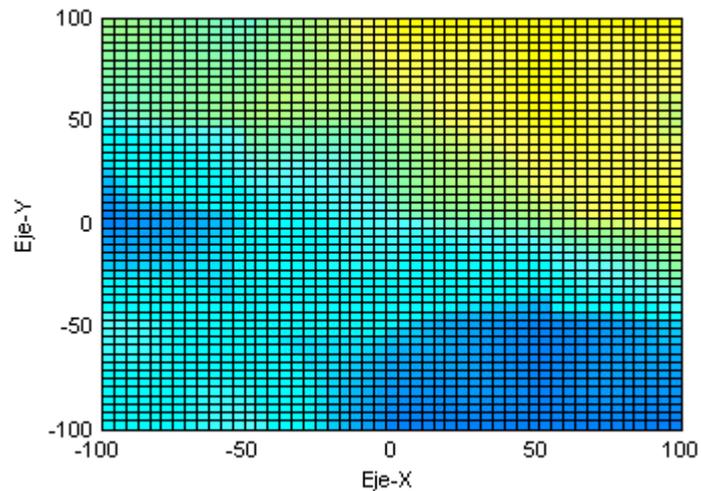
**Figura 111 Superficie de control del motor izquierdo**

Las gráficas expresan a breves rasgos una concordancia con el comportamiento deseado. Al analizarlas y compararlas se puede apreciar resultados básicos, como por ejemplo tomando el caso de solo avance sin dirección izquierda o derecha, ambas la Figura 111 y la Figura 112, dan como resultado un ancho de pulso máximo.

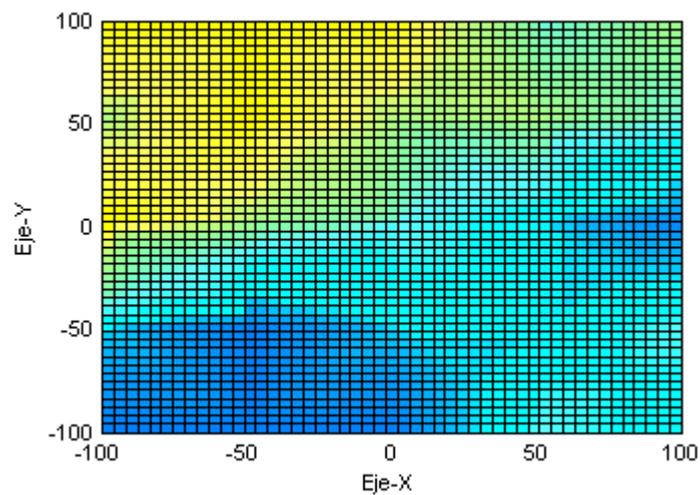


**Figura 112 Superficie de control del motor derecho**

La Figura 113 y la Figura 114 representa una vista plana, para un mejor análisis del comportamiento del control diseñado, en esta cabe recordar que la intensidad de color representa la velocidad del ancho de pulso.

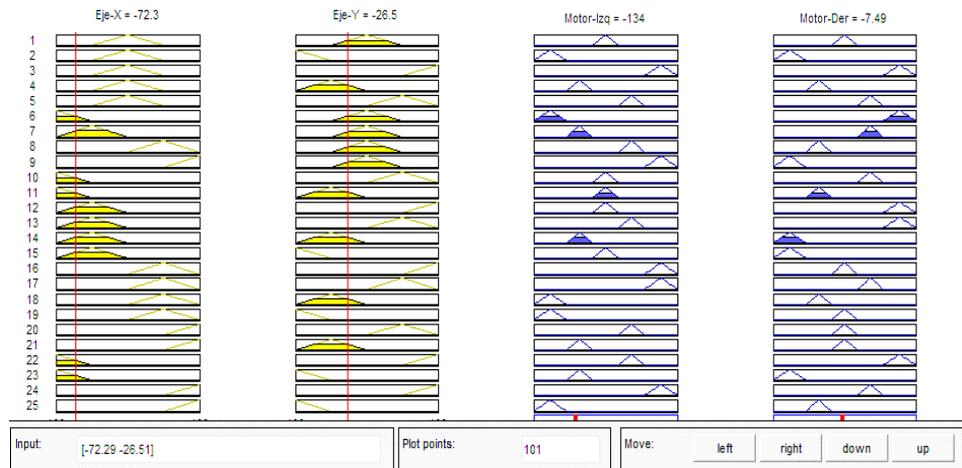


**Figura 113 Vista plana de la superficie de control del motor izquierdo**



**Figura 114 Vista plana de la superficie de control del motor derecho**

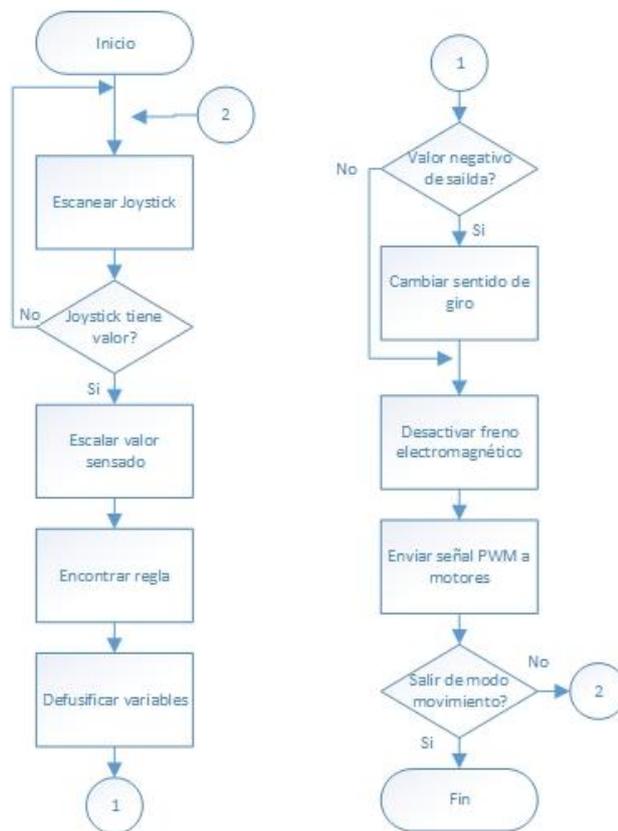
Con ayuda del programa MatLab, igualmente se puede analizar valores de entrada y salida para examinar el comportamiento del control. Esto podemos ejemplificarlo en la Figura 115, que representa los valores de salida para una entrada de  $X=-72.3$  y  $Y=-26.5$



**Figura 115 Simulación de las reglas de control difuso**

## **PROGRAMACIÓN FUZZY EN EL CONTROLADOR**

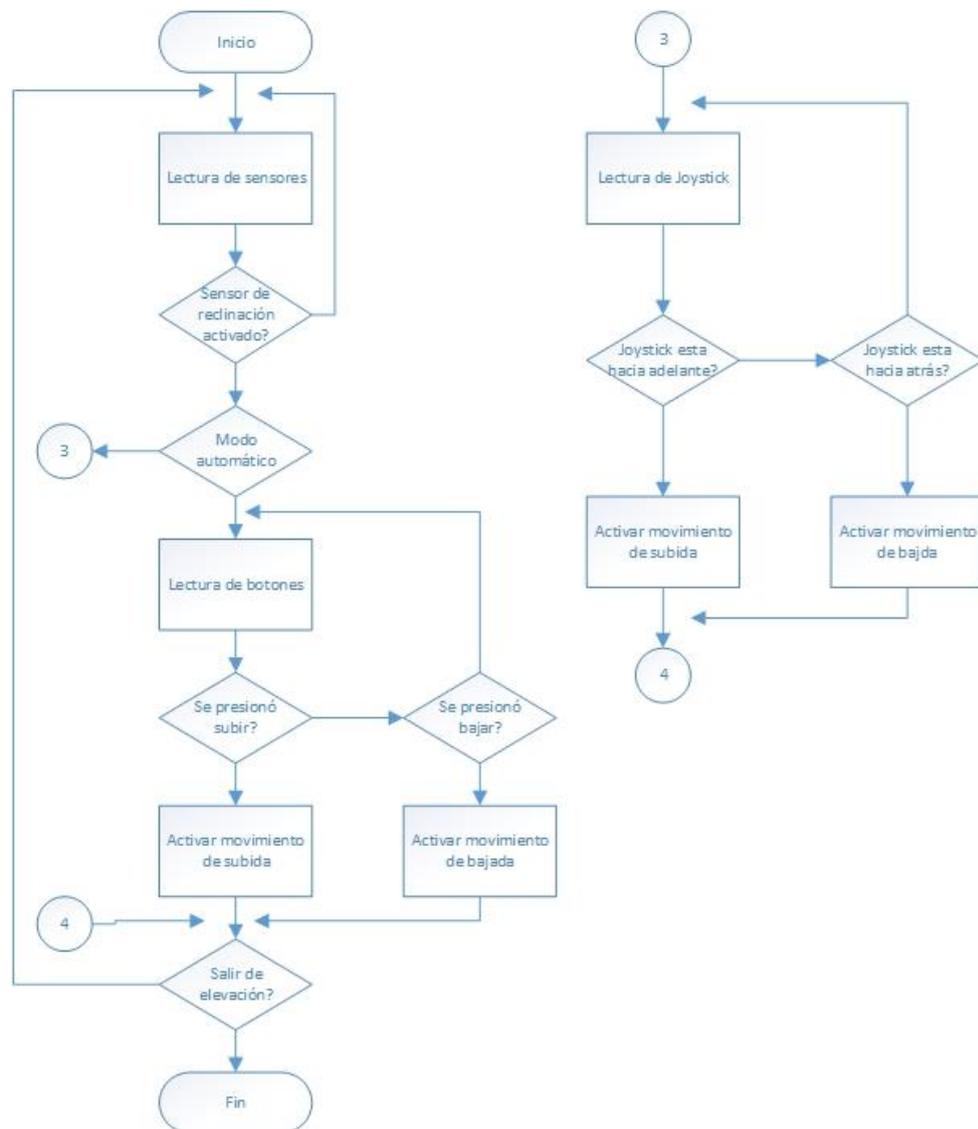
En la Figura 116 se representa la lógica de programación que se implementará en el controlador para la sección de movilidad.



**Figura 116 Diagrama de flujo de programación fuzzy**

#### 3.4.4 Programación del sistema bipedestación

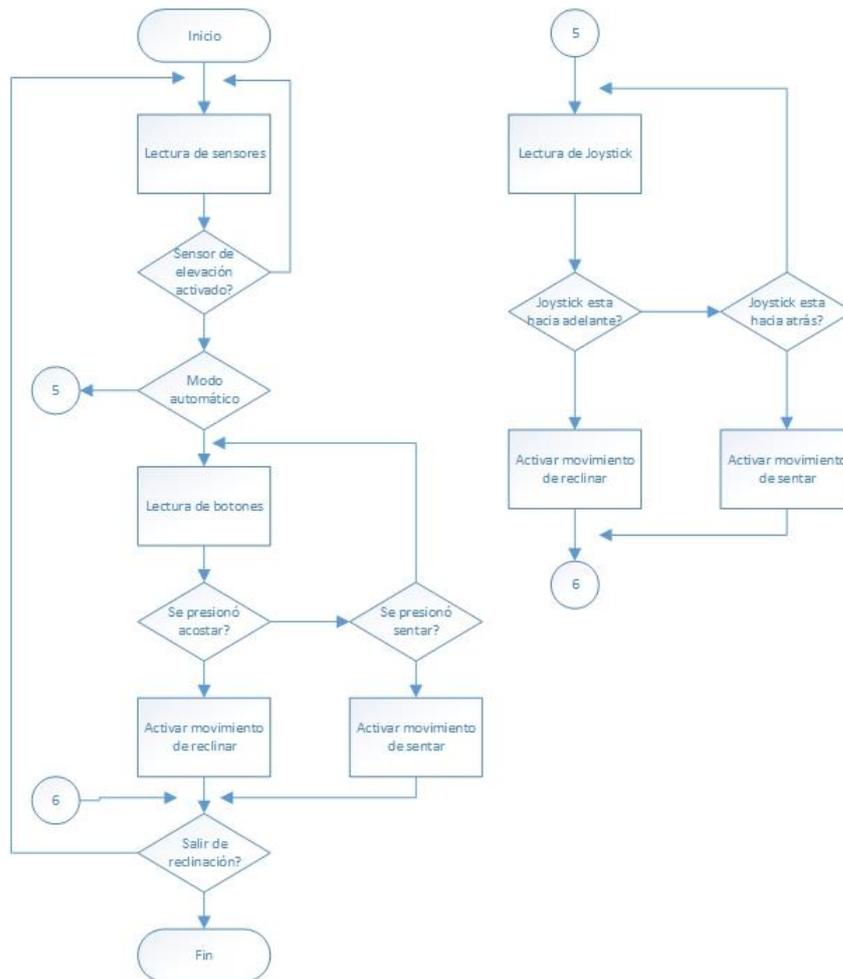
En la Figura 117 se representa la lógica de programación que se implementará en el controlador para la sección de bipedestación, con su modo automático y manual.



**Figura 117 Diagrama de flujo de programación elevación**

### 3.4.5 Programación del sistema inclinación

En la Figura 118 se representa la lógica de programación que se implementará en el controlador para la sección de inclinación, con su modo automático y manual.

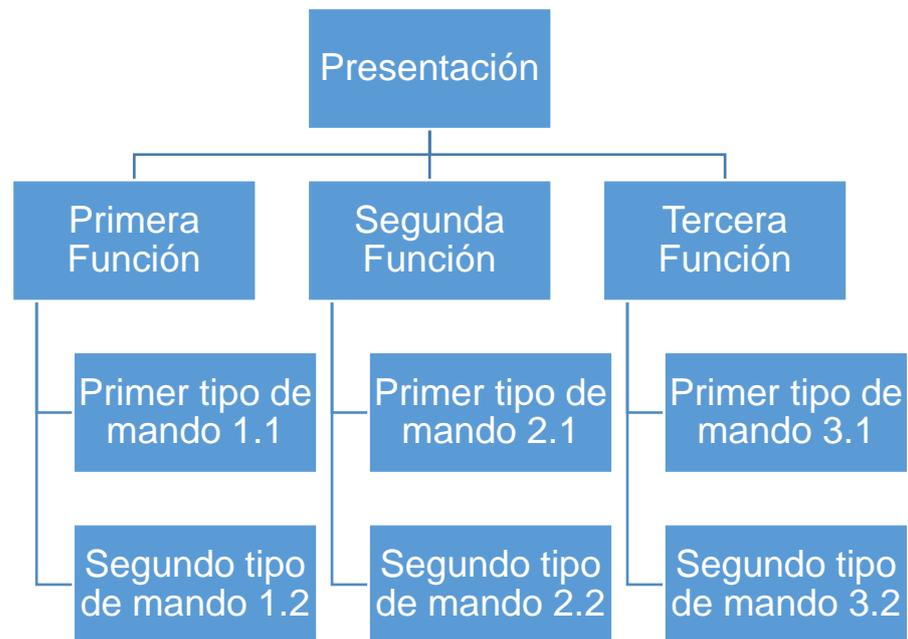


**Figura 118 Diagrama de flujo de programación reclinación**

### 3.5 Diseño de la interfaz hombre máquina (HMI)

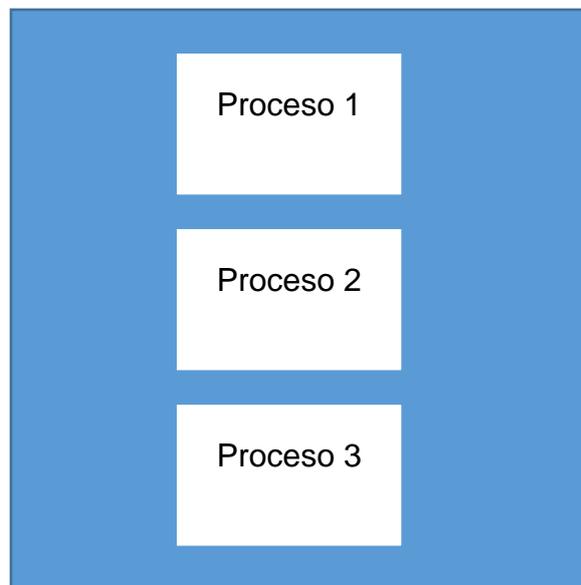
#### 3.5.1 Arquitectura

El proyecto posee varias funciones que deben ser controladas desde el mismo mando sin generar estrés en el usuario, para ello se dividirá la interfaz en etapas como se muestra en la arquitectura de la Figura 119.

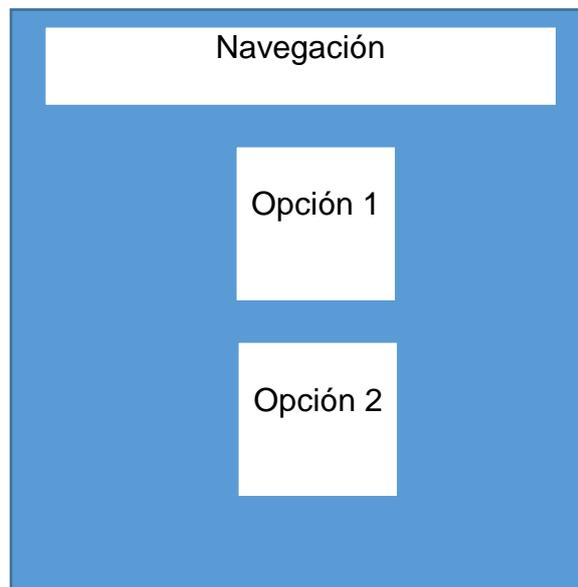


**Figura 119 Arquitectura de HMI**

Las pantallas seguirán un estándar para que la interfaz sea intuitiva, debido a ello se organizarán en pantalla principal y pantalla secundaria como se aprecia en la Figura 120 y la Figura 121 respectivamente.



**Figura 120 Arquitectura pantalla principal**



**Figura 121 Arquitectura pantalla secundaria**

### **3.5.2 Distribución**

#### **Consistencia**

Dentro de la distribución de las pantallas se mantiene una consistencia en la función de la interfaz, cada proceso posee su propia pantalla y cada pantalla es semejante una de otra para que de esta manera se pueda asimilar las funciones de manera rápida.

#### **Densidad**

Se estandarizará la densidad de las pantallas en respecto a la cantidad de elementos y funciones que poseen. Se toma en cuenta que la pantalla posee una resolución y tamaño reducido por lo que este punto es de mucho cuidado. Para ello se establece que cada pantalla no puede contar con más de 4 botones, para su facilidad de digitación.

#### **Simetría y balance**

La pantalla tiene una orientación por defecto vertical, con una relación de aspecto de 16:9, por lo que se establece que los controles principales se alinearan al centro y presentará simetría central.

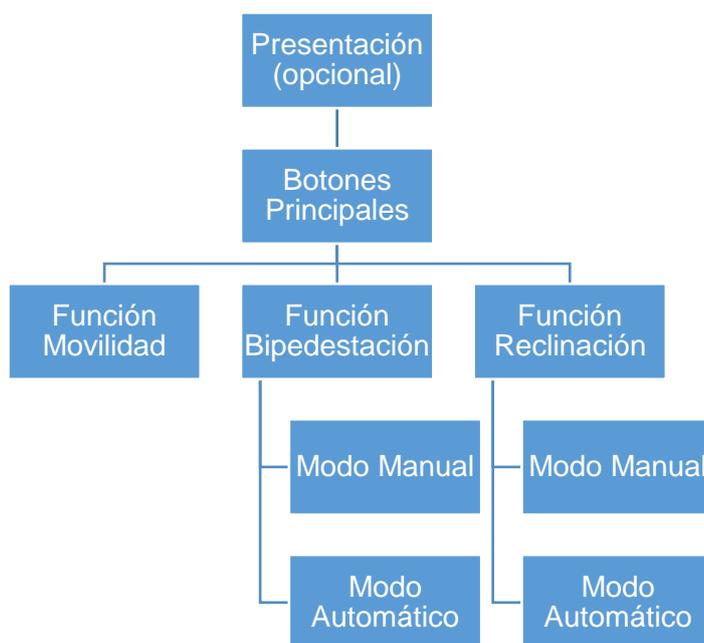
Los controles de navegación se estandarizarán en la parte superior de la pantalla con botones semejantes en cada pantalla.

Los botones principales merecerán un tamaño superior a los botones de navegación, de tal manera serán más visibles al usuario.

### 3.5.3 Navegación

#### Correspondencia con la arquitectura

Establecida la arquitectura de la interfaz y la distribución de esta, se procede a confirmar con las ventanas que se usarán en la arquitectura, ya que los procesos no son extensos ni complejos, la distribución de la interfaz no modifica la primera arquitectura diseñada. Este resultado se observa en la nueva arquitectura de la Figura 122.



**Figura 122 Navegación de la HMI**

#### Accesibilidad

Para facilitar el acceso se usará un interruptor externo de encendido de sistema, no se usará un reconocimiento de usuario, pues no es necesario. Para la presentación se usará la combinación del interruptor externo de

encendido y el pulsador del mando, esto debido a que la presentación es informativa y no necesaria que se presente en cada encendido del sistema.

### **Consistencia**

Las pantallas de la función de bipedestación y reclinación poseen dos más que son semejantes. Para evitar el estrés del usuario, estas pantallas serán completamente idénticas, dando la apariencia de ser las mismas, pero comportándose de manera distinta dependiendo si el modo es manual o automático.

### **3.5.4 Uso del color**

#### **Visibilidad**

El diseño debe constar de colores que sean visibles y de tal manera la funcionalidad de los botones y pantallas sea identificables. Para no cargar la pantalla, se usará una gama de colores que varíen entre el negro y azul, como se ve en la Figura 123.



**Figura 123 Gama de colores HMI**

#### **Contraste con el fondo**

Se debe elegir un contraste que permita identificar fácilmente los elementos de un HMI y no cansar al usuario. También tomando en cuenta las limitaciones de fábrica que presenta la pantalla en la cantidad de colores que posee, se ha determinado para el fondo un color negro y los botones un color azul, tratando de evitar colores brillantes que puedan producir fatiga visual, color de fondo de la Figura 124.



**Figura 124 Color de fondo HMI**

### **Uso de colores**

El uso de los colores es muy importante para identificar las distintas acciones, variables u opciones que posee la interfaz. Para ello se establecerá que:

Color blanco, servirá para los bordes de los botones activos, es decir de los que se encuentran habilitados para realizar una acción determinada. También este será el color de letra de todos los textos en la interfaz.

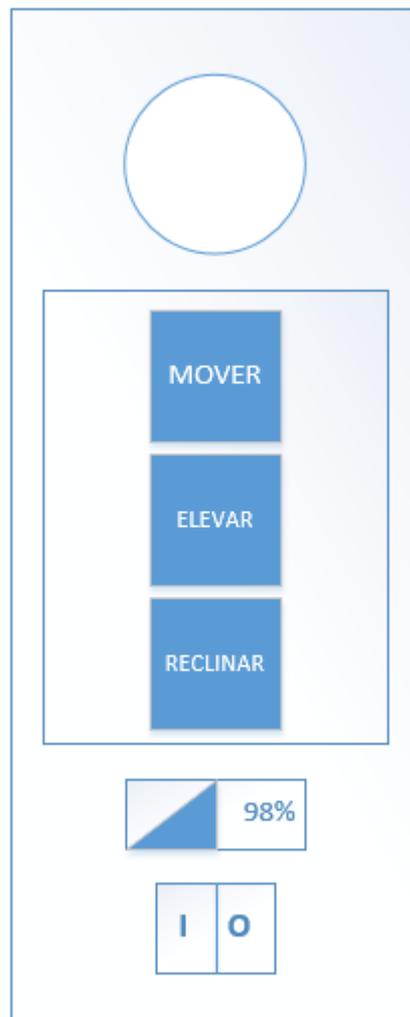
Color azul, identificará a todos los botones, este será determinado según la capacidad de la pantalla en un color que contraste con el fondo y se fácilmente identificable, no deberá causar estrés.

Color gris, estará en los bordes de los botones inactivos, es decir que el botón que tenga un borde de color gris no podrá realizar ninguna acción a pesar de que sea presionado o seleccionado.

Color rojo, identificará la acción de selección de un botón, el borde de los botones se tornará rojo cada vez que un botón sea seleccionado.

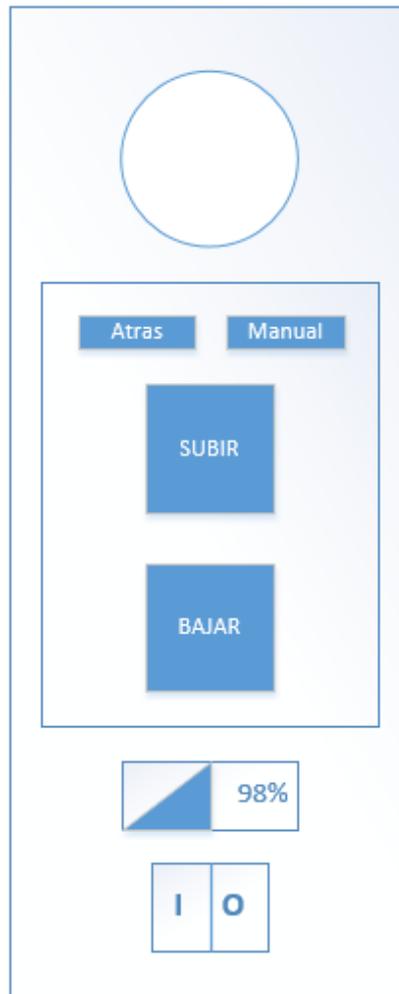
### **3.5.5 Resultado final**

El resultado final de las pantallas se consiguió en base a la recopilación de las especificaciones establecidas en los puntos anteriores. Para ello se determinó la pantalla principal como la Figura 125, la pantalla de bipedestación como la Figura 126 y la pantalla de reclinación como la Figura 127.



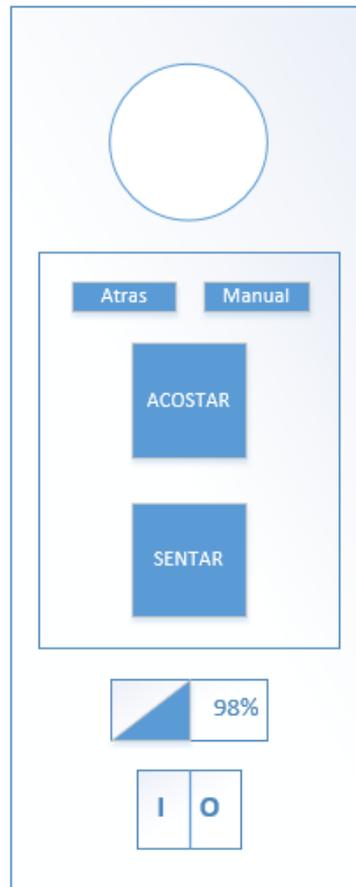
**Figura 125 Pantalla principal HMI**

La muestra el resultado para la pantalla principal HMI, en esta se puede apreciar la organización de los distintos procesos que posee la silla, así mismo con el orden de importancia, siendo “MOVER” el primero, ya que la movilidad es lo más frecuente que el usuario aplicará. En la parte inferior de la imagen se puede observar el medidor de batería, que indicará la carga con valor y gráfico, y bajo este e interruptor de encendido del sistema.



**Figura 126 Pantalla bipedestación HMI**

En la se aprecia la pantalla resultante para la bipedestación. Se puede observar la distribución de los botones principales al centro y en gran tamaño. Estos botones llevan la concordancia con lo analizado en la navegación. Ya que de esta manera el usuario puede identificar que todas las funciones principales están en el centro en gran tamaño. En la parte superior se colocaron los botones de navegación, que permite regresar a la pantalla principal y cambiar de modo manual a automático.



**Figura 127 Pantalla reclinación HMI**

En la se aprecia la pantalla final para el proceso de reclinación. Es destacable que las pantallas de reclinación y de bipedestación son semejantes. La similitud entre pantallas tiene la función de permitir ser más intuitivo el control, ya que no es necesario memorizar distintas formas de realizar las acciones. De la misma manera se guarda concordancia con la navegación al introducir los botones principales al centro y en gran tamaño, mientras que los secundarios están arriba y en un menor tamaño.

## CAPÍTULO 4. CONSTRUCCIÓN E IMPLEMENTACIÓN

### 4.1 Operaciones tecnológicas

Durante el desarrollo del proyecto se ejecutaron distintos tipos de operaciones tecnológicas, las cuales se detallan en la Tabla 25.

**Tabla 25**

#### Operaciones tecnológicas

Operación	Máquina	Código
Corte	Tijera de tol	CTT
	Cizalla	CC
	Amoladora	CA
	Presión de agua	CPA
Taladrado	Taladro	TT
Soldadura	Soldadura MIG	SM
	Soldadura SMAW	SS
Impresión 3D	Impresora 3D Prusa	I3D
Acabado	Pintura electroestática	APE
	Pintura spray	APM
	Amoladora	AA
	Lija	AL

En base a los códigos de las operaciones se realizarán los diagramas de procesos y la distribución de los tiempos de fabricación del proyecto.

## 4.2 Diagramas de procesos

Cada pieza desarrollada contiene un grupo de operaciones previas para su fabricación, estas operaciones son organizadas de mejor manera en un diagrama de procesos. En las siguientes figuras se aprecia los diagramas de procesos de cada una de las piezas usada en el proyecto.

### Base

La base es la parte principal del proyecto, su cuidado de construcción debe ser meticuloso, pues esta estructura recibirá la carga del usuario y soportará los esfuerzos de todos los motores y la estructura móvil. El diagrama de procesos se detalla en la Figura 128.

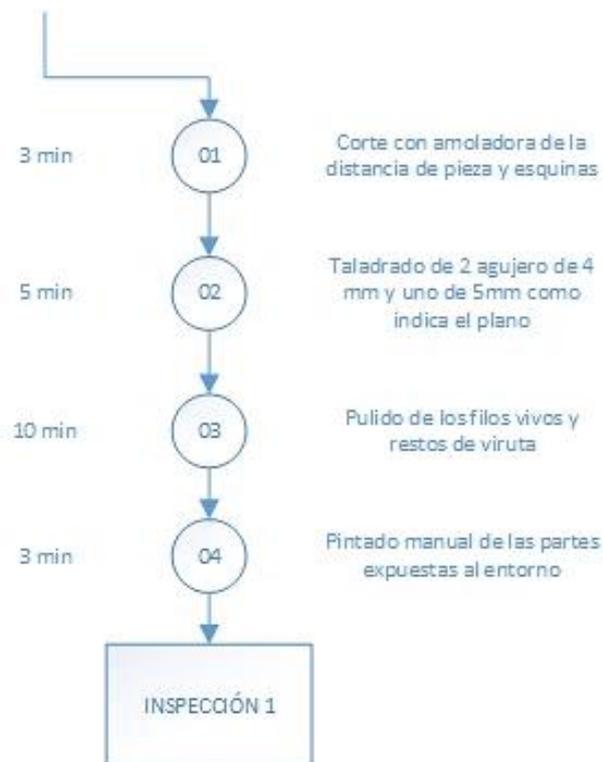


Figura 128 Diagrama de procesos: Base

### Bracket de motor

Esta pieza permite la comunicación de movimiento entre los motores lineales del sistema de bipedestación y el mecanismo de barras paralelas que logran erguir al usuario. Existen 8 de estas piezas, colocadas en el inicio y fin de los motores lineales. Es importante la exactitud de estas, ya que una variación puede comprometer el movimiento total del mecanismo.

El detalle del diagrama de procesos se especifica en la Figura 129. Al ser piezas que están en constante esfuerzo y debido también a su pequeño tamaño, el acabado se deja a consideración de hacerlo manualmente.



**Figura 129 Diagrama de procesos: Bracket motor lineal**

### Pivote de piernas

En la Figura 130 se detalla el diagrama de procesos para el pivote de piernas, de este diagrama se realiza 4 piezas que conformarán la unión entre la estructura base y el mecanismo de barras paralelas para el movimiento de reclinación.

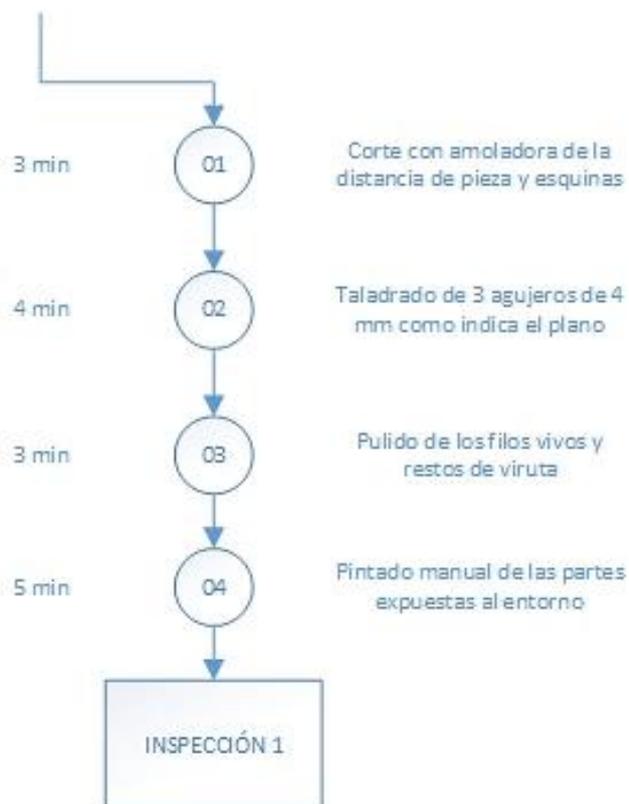


**Figura 130 Diagrama de procesos: Pivote de piernas**

### Pivote de espalda

Del pivote de espalda se realizará 4 piezas, 2 piezas corresponderán al lado izquierdo y otras dos piezas corresponderán al lado derecho.

En la Figura 131 se detalla el diagrama de procesos de las piezas de pivote de espalda. Al ser piezas de tamaño relativamente pequeño se deja a consideración el acabado de pintura.



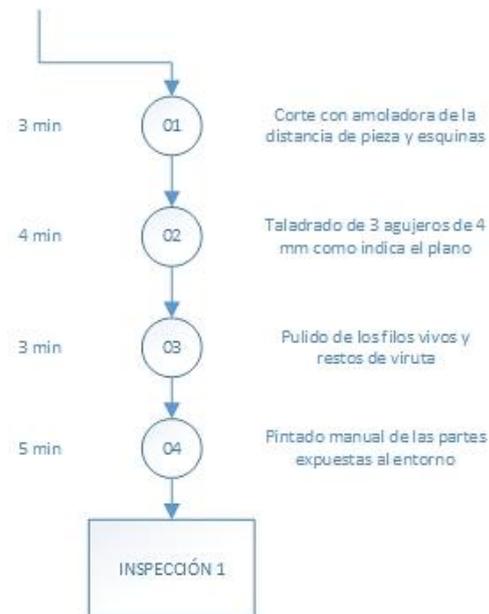
**Figura 131 Diagrama de procesos: Pivote de espalda**

### **Barra paralela 1**

Dado que en el mismo sistema se debe considerar los movimientos de reclinación y de bipedestación, las barras paralelas deben ser consideradas en dos partes, de tal forma que en un movimiento trabajen las dos partes en conjunto mientras que en otro solo una parte de ellas.

De estas piezas se elaborarán 4, siendo esta la parte delantera y más pequeña del sistema.

Se recomienda en el montaje realizar las sujeciones con tuercas de seguridad, de tal forma que el apriete no sea excesivo y permita una buena movilidad del mecanismo.

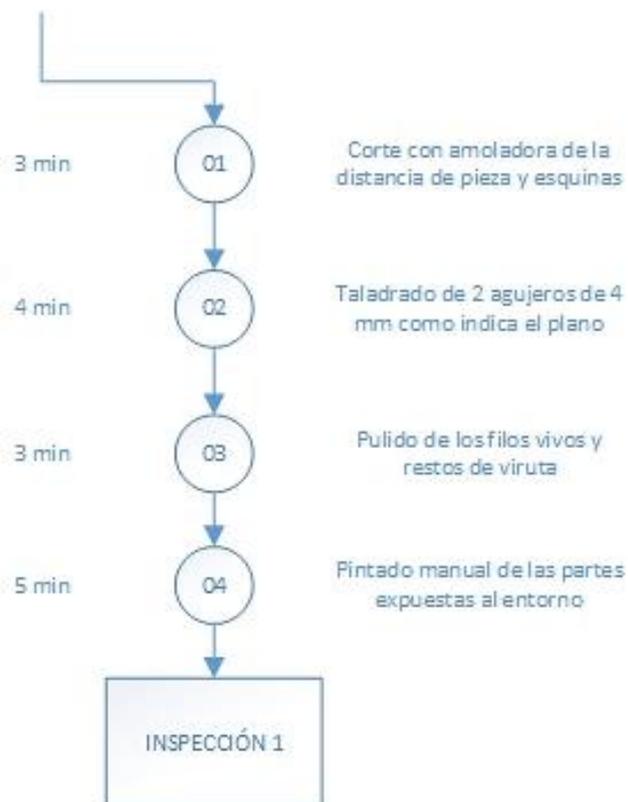


**Figura 132 Diagrama de procesos: Barra paralela 1**

### **Barra paralela 2**

La pieza barra paralela 2, es la pieza más larga del mecanismo de barras paralelas, su conexión es directa con la pieza anterior. Esta pieza solo debe conducir movimiento pues no recibe carga de parte de los motores. Pero debe soportar el asiento y peso del usuario.

En la Figura 133 se detalla el diagrama de procesos de la barra paralela 2, de esta pieza debe realizarse 4 copias semejantes, dos para el costado derecho y dos para el costado izquierdo.



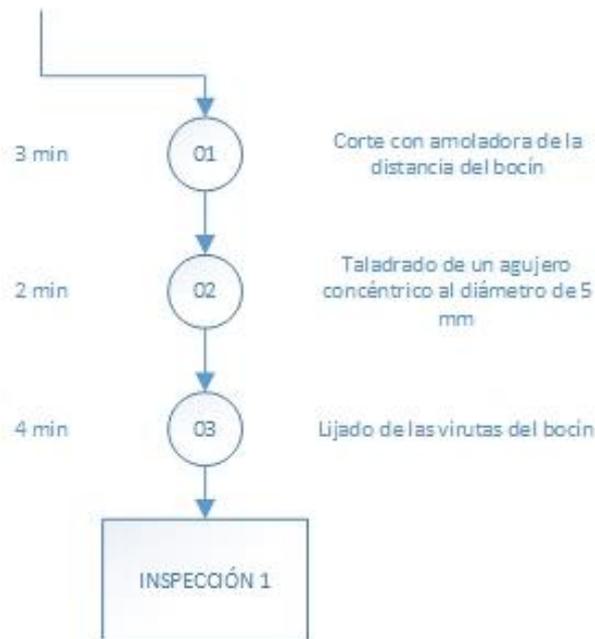
**Figura 133 Diagrama de procesos: Barra paralela 2**

### Bocines

Los bocines son piezas que se encontrarán distribuidas en muchas partes de movimiento. Estos tienen distintas funciones que son:

- Mantener paralelismo en las barras paralelas.
- Mantener fijo a los motores lineales del sistema de bipedestación y evitar esfuerzo de torsión que se pueda provocar en ellos.
- Ayudar a obtener un movimiento limpio y estable de los motores lineales del sistema de reclinación.

En la Figura 134 se detalla el diagrama de procesos de la fabricación de los bocines, de esta pieza se debe obtener 24 copias semejantes.



**Figura 134 Diagrama de procesos: Bocines**

### **Soporte asiento**

El soporte del asiento son las piezas más sencillas de la fabricación, pero no de menos cuidado de su tolerancia de medidas, si bien su fabricación es sencilla, su montaje no lo es, ya que una mala colocación puede provocar problemas de movimiento.

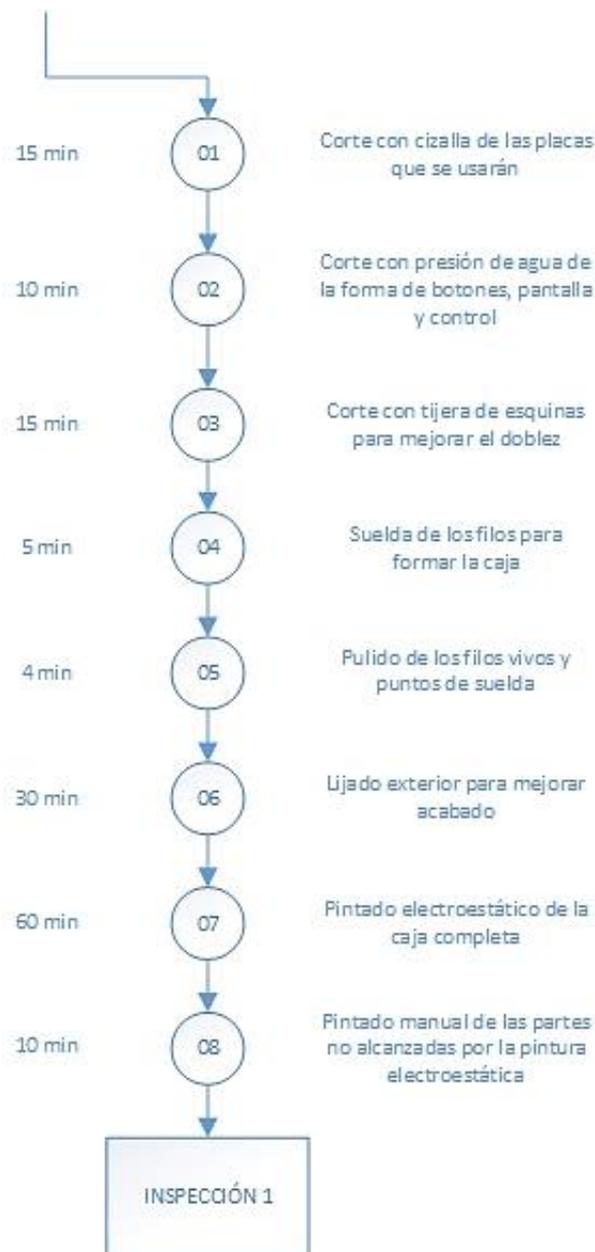
En la Figura 135 se detalla el diagrama de procesos de soporte de asiento, de este diagrama se deben obtener 2 piezas semejantes.



**Figura 135 Diagrama de procesos: Soporte de asiento**

### Caja de control

En la Figura 136 se detalla el diagrama de procesos de la caja de control. Esta pieza es única y su acabado debe tomarse con mucho cuidado.



**Figura 136 Diagrama de procesos: Caja de control**

### 4.3 Tiempos de fabricación

Los tiempos de fabricación que se emplearon en el proyecto se detallan en la Tabla 26 y la Tabla 27, estos tiempos están clasificados por cada pieza y proceso.

Tabla 26

## Tiempo de fabricación por pieza, Parte 1

Pieza	Cant.	Proceso						Total (min)
		CTT	CC	CA	CPA	TT	I3D	
Base	1	-	-	80	-	40	-	120
Bracket de motor	8	-	-	3	-	5	-	64
Pivote piernas	4	-	-	3	-	4	-	28
Pivote espalda	4	-	-	3	-	4	-	28
Barra P 1	4	-	-	3	-	4	-	28
Barra P 2	4	-	-	3	-	4	-	28
Bocines	24	-	-	3	-	2	-	120
Soporte asiento	2	-	-	3	-	2	-	10
Caja de control	1	15	15	-	10	-	-	40
<b>Total</b>		<b>15</b>	<b>15</b>	<b>230</b>	<b>10</b>	<b>196</b>	<b>0</b>	<b>466</b>

Tabla 27

## Tiempo de fabricación por pieza, Parte 2

Pieza	Cant.	Proceso						Total (min)
		SM	SS	APE	APM	AA	AL	
Base	1	150	-	60	-	180	-	390
Bracket de motor	8	-	-	3	-	10	-	104
Pivote piernas	4	7.5	-	10	-	10	-	110
Pivote espalda	4	-	-	-	5	3	-	32
Barra P 1	4	-	-	-	5	3	-	32
Barra P 2	4	-	-	-	5	3	-	32
Bocines	24	-	-	-	-	-	4	96
Soporte asiento	2	-	5	-	5	3	-	26
Caja de control	1	-	5	60	10	4	30	109
<b>Total</b>		<b>180</b>	<b>15</b>	<b>184</b>	<b>80</b>	<b>346</b>	<b>126</b>	<b>931</b>

En la Tabla 28 se detallan los tiempos empleados, clasificados por procesos para facilitar el cálculo de tiempo usado por herramienta.

**Tabla 28**  
**Tiempo de fabricación por proceso**

Proceso		Total (min)	Total(h)
<b>Corte</b>	CTT	15	0.25
	CC	15	0.25
	CA	230	3.83
	CPA	10	0.17
<b>Taladrado</b>	TT	196	3.27
<b>Impresión</b>	I3D	0	0
<b>Soldadura</b>	SM	180	3
	SS	15	0.25
<b>Acabado</b>	APE	184	3.1
	APM	80	1.3
	AA	346	5.77
	AL	126	2.1
<b>TOTAL</b>		1397	23.28

#### 4.4 Tiempos de montaje

Para el detalle de los tiempos de montaje, se ha separado el montaje mecánico del montaje eléctrico electrónico. En la Tabla 29 se clasifica el tiempo mecánico de montaje, mientras que en la Tabla 30 se clasifica el tiempo eléctrico electrónico de montaje.

**Tabla 29**  
**Tiempo de montaje mecánico**

Sección	Tiempo (min)	Tiempo (h)
<b>Sistema móvil</b>	180	3
<b>Sistema bipedestación</b>	500	8.3
<b>Sistema reclinación</b>	400	6.7
<b>Asiento y espaldar</b>	120	2
<b>Total</b>	<b>1200</b>	<b>20</b>

**Tabla 30****Tiempo de montaje eléctrico electrónico**

<b>Sección</b>	<b>Tiempo (min)</b>	<b>Tiempo (h)</b>
<b>Placa de control</b>	240	4
<b>Placa de potencia</b>	420	7
<b>Panel de control</b>	180	3
<b>Cableado eléctrico</b>	60	1
<b>Total</b>	<b>900</b>	<b>15</b>

Estos valores son necesarios para obtener el valor de la mano de obra utilizada para el armado del proyecto. En la Tabla 31 se resume los tiempos totales solo de montaje utilizado.

**Tabla 31****Tiempo de montaje total**

<b>Sección</b>	<b>Tiempo (min)</b>	<b>Tiempo (h)</b>
<b>Montaje mecánico</b>	1200	20
<b>Montaje eléctrico electrónico</b>	900	15
<b>Total</b>	<b>2100</b>	<b>35</b>

## CAPÍTULO 5. PRUEBAS Y RESULTADOS

En este capítulo se procede a recopilar la información que concierne a las distintas pruebas del proyecto. Para proceder, se ha dividido el proyecto en sus etapas funcionales más críticas, para realizar pruebas primeramente modulares y luego en conjunto.

Las pruebas que se van a realizar son de:

- Motores lineales de bipedestación
- Motores lineales de reclinación
- Motores principales
- Pantalla táctil
- Mando analógico
- Movimiento del mecanismo

### 5.1 Prueba de motores lineales de bipedestación

En la Figura 137 se aprecia los motores lineales de bipedestación que se usarán y se someterán a pruebas. Estos motores deben permitir el movimiento correcto del mecanismo del proyecto.



**Figura 137 Motores lineales de bipedestación**

Se realizarán distintas acciones, para realizar la prueba y verificar el funcionamiento de los motores lineales de bipedestación. Para ello se seguirán las siguientes actividades previas y durante la prueba:

- Revisar cables de conexión de los motores
- Revisar polaridad de conexión
- Energizar sistema
- Realizar pulso aleatorio sin conexión de motores al puente H de control de motores lineales
- Verificar encendido de relés
- Conectar motores al puente H
- Enviar señal de salida de motores
- Verificar funcionamiento de motores
- Enviar señal de entrada de motores
- Verificar funcionamiento de motores
- Revisar temperatura en el sistema electrónico

## 5.2 Resultados de prueba de motores lineales de bipedestación

En la Tabla 32 se detallan los resultados de la primera prueba de los motores lineales de bipedestación, como se puede ver, fallaron al momento de salir debido al ruido generado por estos. Al intentar realizar la prueba el sistema se reiniciaba. Para corregirlo se procedió a conectar redes Snubber a los motores y repetir la prueba.

**Tabla 32**

### Resultados de prueba de motores lineales de bipedestación inicial

Parámetro	Resultado
Encendido de relés	Si
Salida de vástago	No
Entrada de vástago	No
Sobrecalentamiento presente	Imposible medir

En la Tabla 33 se detallan los resultados obtenidos luego de la corrección de ruido eléctrico generado por los motores. Se puede apreciar el correcto funcionamiento de la prueba.

**Tabla 33****Resultados de prueba de motores lineales de bipedestación corregida**

Parámetro	Resultado
Encendido de relés	Si
Salida de vástago	Si
Entrada de vástago	Si
Sobrecalentamiento presente	Ausente

**5.3 Prueba de motores lineales de reclinación**

En la Figura 138 se puede observar los motores lineales que realizarán la acción de reclinación en el proyecto. Ambos motores tienen las mismas características de funcionamiento.

**Figura 138 Motores lineales de reclinación**

Se realizarán distintas acciones, para realizar la prueba y verificar el funcionamiento de los motores lineales de reclinación. Para ello se seguirán las siguientes actividades previas y durante la prueba:

- Revisar cables de conexión de los motores
- Revisar polaridad de conexión
- Energizar sistema

- Realizar pulso aleatorio sin conexión de motores al puente H de control de motores lineales
- Verificar encendido de relés
- Conectar motores al puente H
- Enviar señal de salida de motores
- Verificar funcionamiento de motores
- Enviar señal de entrada de motores
- Verificar funcionamiento de motores
- Revisar temperatura en el sistema electrónico

#### 5.4 Resultados de prueba de motores lineales de inclinación

En la Tabla 34 se detallan los resultados de la primera prueba de los motores lineales de inclinación, como se puede ver, fallaron al momento de salir debido al ruido generado por estos, al igual que la prueba anterior. Al intentar realizar la prueba el sistema se reiniciaba. Para corregirlo se procedió a conectar redes Snubber, semejantes a los motores de bipedestación, a los motores y repetir la prueba.

**Tabla 34**

#### Resultados de prueba de motores lineales de inclinación inicial

Parámetro	Resultado
Encendido de relés	Si
Salida de vástago	No
Entrada de vástago	No
Sobrecalentamiento presente	Imposible medir

En la Tabla 35 se detallan los resultados obtenidos luego de la corrección de ruido eléctrico generado por los motores. Se puede apreciar el correcto funcionamiento de la prueba.

**Tabla 35****Resultados de prueba de motores lineales de inclinación corregida**

Parámetro	Resultado
Encendido de relés	Si
Salida de vástago	Si
Entrada de vástago	Si
Sobrecalentamiento presente	Ausente

**5.5 Prueba de motores principales**

En la Figura 139 se puede apreciar los motores principales a ser usados en el proyecto, a pesar de que estos motores tienen las mismas características, no son iguales, ya que el uno es derecho y el otro es izquierdo. Esta diferencia es notable en el sentido del eje de salida del motor.

**Figura 139 Motores principales**

Se realizarán distintas acciones, para realizar la prueba y verificar el funcionamiento de los motores lineales de bipedestación. Para ello se seguirán las siguientes actividades previas y durante la prueba:

- Revisar cables de conexión de los motores
- Revisar polaridad de conexión
- Energizar sistema

- Realizar pulso aleatorio sin conexión de motores al puente H de control de motores principales
- Verificar encendido del puente H
- Conectar motores al puente H
- Enviar señal de giro horario absoluto de motores
- Verificar funcionamiento de motores
- Enviar señal de giro anti horario absoluto de motores
- Verificar funcionamiento de motores
- Revisar temperatura en el sistema electrónico
- Desconectar motores
- Realizar pulso aleatorio creciente o decreciente con modalidad de ancho de pulso sin conexión de motores al puente H de control de motores principales
- Verificar encendido del puente H
- Conectar motores al puente H
- Enviar señal de giro horario creciente de motores
- Verificar funcionamiento de motores
- Enviar señal de giro anti horario creciente de motores
- Verificar funcionamiento de motores
- Revisar temperatura en el sistema electrónico

## 5.6 Resultados de prueba de motores principales

En la Tabla 36 se puede apreciar el resultado de la primera prueba de control de motor principal derecho, se puede notar su correcto funcionamiento, bajo la prueba de pulso continuo de activación al puente H.

**Tabla 36**

### Resultados de prueba de motor principal derecho absoluta inicial

Parámetro	Resultado
Encendido de puente H	Si

Continua 

<b>Giro horario</b>	Si
<b>Giro anti horario</b>	Si
<b>Sobrecalentamiento presente</b>	Ausente

En la Tabla 37 se puede apreciar el resultado de la primera prueba de control de motor principal izquierdo, se puede notar su correcto funcionamiento, bajo la prueba de pulso continuo de activación al puente H.

**Tabla 37**

**Resultados de prueba de motor principal izquierdo absoluta inicial**

<b>Parámetro</b>	<b>Resultado</b>
<b>Encendido de puente H</b>	Si
<b>Giro horario</b>	Si
<b>Giro anti horario</b>	Si
<b>Sobrecalentamiento presente</b>	Ausente

En la Tabla 38 se puede apreciar el resultado de la prueba de control de motores con modalidad de ancho de pulso para variar su velocidad, esta prueba se realizó simultáneamente en los dos motores, y a pesar de su correcto funcionamiento, se notó un ruido molesto proveniente de los motores, con velocidades menores a su velocidad máxima. Para resolver el problema se procedió a cambiar la frecuencia del PWM del controlador. Realizado los cambios se repitió la prueba.

**Tabla 38**

**Resultados de prueba de motores principales bajo manejo de ancho de pulso inicial**

<b>Parámetro</b>	<b>Resultado</b>
<b>Encendido de puente H</b>	Si
<b>Giro horario creciente</b>	Si, con sonido agudo en los motores
<b>Giro anti horario creciente</b>	Si, con sonido agudo en los motores
<b>Sobrecalentamiento presente</b>	Ausente

En la Tabla 39 se puede apreciar el resultado de la prueba de control corregida de motores con modalidad de ancho de pulso para variar su

velocidad, esta prueba se realizó simultáneamente en los dos motores. Como se puede apreciar el resultado es exitoso y muestra el correcto funcionamiento del sistema.

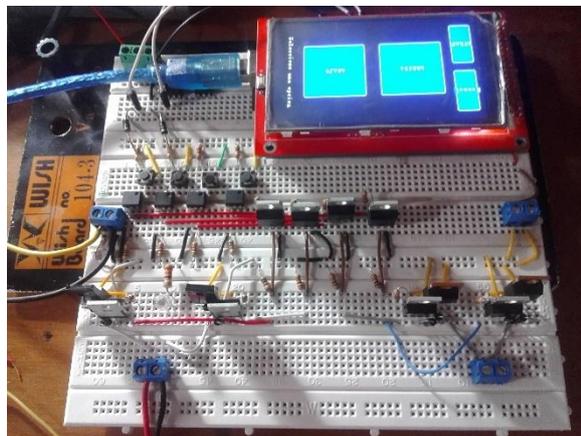
**Tabla 39**

**Resultados de prueba de motores principales bajo manejo de ancho de pulso corregida**

Parámetro	Resultado
Encendido de puente H	Si
Giro horario creciente	Si
Giro anti horario creciente	Si
Sobrecalentamiento presente	Ausente

## 5.7 Prueba de pantalla táctil

En la Figura 140 se puede apreciar la pantalla táctil TFT a ser usada en el proyecto, junto a su módulo de prueba. Este módulo solo es de prueba de funcionamiento de pantalla por lo que está armado en protoboard.



**Figura 140 Módulo de prueba de pantalla táctil**

Se realizarán distintas acciones, para realizar la prueba y verificar el funcionamiento de la pantalla TFT táctil. Para ello se seguirán las siguientes actividades previas y durante la prueba:

- Revisar cables de conexión de la pantalla
- Revisar polaridad de conexión de fuente

- Energizar sistema
- Revisar encendido de la pantalla
- Cargar programa de ejemplo con botones
- Verificar la orientación de la pantalla
- Pulsar los botones 10 veces, contando cuantas veces es detectado
- Anotar resultados
- Repetir los dos pasos previos 3 veces
- Anotar resultados y comparar con los anteriores
- Enviar señal de giro horario absoluto de motores
- Cambiar programación de la pantalla para modificar la iluminación
- Verificar el cambio de iluminación de la pantalla

### 5.8 Resultados de prueba de pantalla táctil

En la Tabla 40, se aprecia los resultados de la prueba en la pantalla táctil TFT, se puede apreciar que la sensibilidad es baja, pero es una limitación física. Así mismo por limitación física de la pantalla, el control de iluminación de la pantalla es imposible de realizar.

**Tabla 40**

#### Resultados de prueba de pantalla TFT

Parámetro	Resultado
Encendido de pantalla	Si
Orientación correcta	Si
Sensibilidad de toque	7 de 10
Manejo de iluminación	Ausente

En la Figura 141 se aprecia el funcionamiento de la pantalla, instalada en el control final del proyecto.



**Figura 141 Prueba de pantalla táctil**

### **5.9 Prueba de mando analógico**

En la Figura 142 se puede apreciar el módulo de mando analógico que se usará en el proyecto. Este mando envía señales análogas en base a su voltaje de activación.



**Figura 142 Mando analógico**

Se realizarán distintas acciones, para realizar la prueba y verificar el funcionamiento del mando analógico. Para ello se seguirán las siguientes actividades previas y durante la prueba:

- Revisar cables de conexión del mando analógico
- Revisar polaridad de conexión de fuente
- Energizar sistema
- Iniciar el monitor serial del ordenador
- Anotar valores iniciales del mando analógico
- Mover el mando analógico a su valor máximo en X positivo
- Anotar valores de lectura del mando
- Mover el mando analógico a su valor máximo en X negativo
- Anotar valores de lectura del mando
- Mover el mando analógico a su valor máximo en Y positivo
- Anotar valores de lectura del mando
- Mover el mando analógico a su valor máximo en Y negativo
- Anotar valores de lectura del mando
- Verificar cambio de estado del pulsador del mando analógico
- En base a los resultados calibrar y repetir la prueba

### **5.10 Resultados de prueba de mando analógico**

En la Tabla 41 se puede apreciar los resultados de la primera prueba realizada sobre el mando analógico. Se puede apreciar los errores que posee en la entrega de datos, desde su posición en reposo, hasta sus posiciones máximas. Siendo estos valores muy influyentes en el desempeño del proyecto, se procede a corregirlos realizando un escalamiento y una corrección del 0. Aplicado los cambios se procede a repetir la prueba

**Tabla 41****Prueba inicial de lectura de valores de mando analógico**

<b>Parámetro</b>	<b>Resultado</b>
<b>Valor en X en reposo</b>	4
<b>Valor en Y en reposo</b>	4
<b>Valor máximo en X positivo</b>	255
<b>Valor máximo en X negativo</b>	-240
<b>Valor máximo en Y positivo</b>	255
<b>Valor máximo en Y negativo</b>	-240
<b>Cambio de estado de pulsador</b>	Si

En la Tabla 42 se puede apreciar los valores obtenidos tras la corrección y calibración del sensor, con estos valores se puede proceder a continuar el desarrollo del proyecto.

**Tabla 42****Prueba de lecturas de mando analógico calibrado**

<b>Parámetro</b>	<b>Resultado</b>
<b>Valor en X en reposo</b>	0
<b>Valor en Y en reposo</b>	0
<b>Valor máximo en X positivo</b>	255
<b>Valor máximo en X negativo</b>	-255
<b>Valor máximo en Y positivo</b>	255
<b>Valor máximo en Y negativo</b>	-255
<b>Cambio de estado de pulsador</b>	Si

**5.11 Prueba de movimiento de mecanismo**

En la Figura 143 se puede apreciar el módulo de prueba inicial del sistema, este módulo se utilizó en las primeras pruebas de proyecto antes de pasar a elaborar el mando general y final. Esta prueba es realizada con el mando final del proyecto que se puede apreciar en la Figura 144.



**Figura 143 Módulo de prueba total en protoboard**



**Figura 144 Control armado final del proyecto**

Se realizarán distintas acciones, para realizar la prueba y verificar el funcionamiento total del mecanismo. Para ello se seguirán las siguientes actividades previas y durante la prueba:

- Revisar cables de conexión de todos los motores
- Revisar polaridad de conexión de fuente
- Energizar sistema
- Desconectar sensores
- Ingresar a modo de bipedestación
- Activar la bipedestación
- Verificar el movimiento
- Ingresar a modo de reclinación

- Activar inclinación
- Verificar movimiento
- Conectar sensores
- Probar la estructura con carga
- Verificar resultado
- Probar inclinación en vacío
- Verificar resultado
- Probar inclinación con carga
- Verificar resultado
- Probar bipedestación en vacío
- Verificar resultado
- Probar bipedestación con carga
- Verificar resultado
- Probar movilidad en vacío
- Verificar resultado
- Probar movilidad en carga

### 5.12 Resultado de prueba de mecanismo

En la Tabla 43 se puede apreciar los resultados de las primeras pruebas de funcionamiento del mecanismo. Como se puede apreciar, hubo una falla en la estructura del proyecto, lo cual no permitió culminar la prueba. Para solucionarlo se procedió a corregir la estructura y reforzarla. Realizados los cambios, se procede a repetir la prueba.

**Tabla 43**

#### **Prueba inicial de mecanismo del proyecto**

<b>Parámetro</b>	<b>Resultado</b>
<b>Lectura de sensor de inclinación</b>	Correcta
<b>Lectura de sensor de bipedestación</b>	Correcta
<b>Carga en reposo</b>	Correcta

Continua 

<b>Reclinación en vacío</b>	Correcta
<b>Reclinación en carga</b>	Falla de estructura
<b>Bipedestación en vacío</b>	Imposible medir
<b>Bipedestación en carga</b>	Imposible medir

En la Figura 146 se puede observar el fallo de la estructura, esta imagen corresponde al apoyo de la llanta delantera izquierda.



**Figura 145 Prueba fallida de estructura**

En la Tabla 44 se observa el correcto funcionamiento del sistema total del proyecto. Esta prueba fue realizada 30 veces para verificar que no exista errores en el funcionamiento. Como se puede observar el sistema es totalmente funcional.

**Tabla 44**

**Prueba del mecanismo corregido del proyecto**

<b>Parámetro</b>	<b>Resultado</b>
<b>Lectura de sensor de reclinación</b>	Correcta
<b>Lectura de sensor de bipedestación</b>	Correcta
<b>Carga en reposo</b>	Correcta
<b>Reclinación en vacío</b>	Correcta
<b>Reclinación en carga</b>	Correcta

Continua 

<b>Bipedestación en vacío</b>	Correcta
<b>Bipedestación en carga</b>	Correcta

La prueba de carga en reposo se aprecia en la Figura 146.



**Figura 146 Prueba de carga en estado de reposo**

La prueba de inclinación en vacío se aprecia en la Figura 147.



**Figura 147 Prueba de inclinación sin carga**

La prueba de inclinación con carga se aprecia en la Figura 148.



**Figura 148 Prueba de inclinación con carga**

La prueba de bipedestación en vacío se aprecia en la Figura 149.



**Figura 149 Prueba de bipedestación sin carga**

La prueba de bipedestación con carga se aprecia en la Figura 150.



**Figura 150 Prueba de bipedestación con carga**

Las pruebas realizadas fueron sometidas con una carga de 90kg, valor que es muy superior al usuario final, una persona con ELA de 70kg. De esta manera se asegura el funcionamiento del proyecto.

## CAPÍTULO 6. ANÁLISIS ECONÓMICO Y FINANCIERO

Dentro de este capítulo se analiza en tres partes, los aspectos que conforman el proyecto, los cuales son:

- Costos directos
- Costos indirectos
- Costos de fabricación

### 6.1 Costos directos

Los costos directos son todos los valores relacionados directamente con el proyecto, sin estos el proyecto no puede ser llevado a cabo. Estos están detallados en:

- Materiales mecánicos, Tabla 45
- Accesorios mecánicos, Tabla 46
- Materiales y accesorios eléctricos y electrónicos, Tabla 47

**Tabla 45**

#### Costos directos: Materiales mecánicos

Sistema	Plano	Material	Cantidad	C. Unit.	C. Total
		Tubo redondo			
Base	1	1"x2mm	4	\$ 6,60	\$ 26,40
Bracket de motor	2	Platina 1"x3mm	0,5	\$ 24,40	\$ 12,20
Pivote de piernas	3	Platina 1"x3mm	0,5	\$ 24,40	\$ 12,20
Pivote de espalda	4	Platina 1"x3mm	1	\$ 24,40	\$ 24,40
Barra paralela 1	5	Platina 1"x3mm	0,5	\$ 24,40	\$ 12,20
Barra paralela 2	6	Platina 1"x3mm	4	\$ 24,40	\$ 97,60
Caja de control	7	Tol negro 0.7mm	0,09	\$ 0,20	\$ 0,02
Bocines	20	Duralón 15mm	1	\$ 2,90	\$ 2,90
Soporte de asiento	8	Tubo cuadrado negro 20mm	1	\$ 4,40	\$ 4,40
<b>Total</b>					<b>\$ 192,32</b>

**Tabla 46****Costos directos: Accesorios mecánicos**

Elemento	Descripción	Cantidad	C. Unit.	C. Total
Tornillo	M5	6	\$ 0,25	\$ 1,50
Perno	M4x40	8	\$ 0,05	\$ 0,40
Perno	M5x70	24	\$ 0,22	\$ 5,28
Perno	M6x80	12	\$ 0,26	\$ 3,12
Tuerca de seguridad	M4	8	\$ 0,04	\$ 0,32
Tuerca de seguridad	M5	30	\$ 0,05	\$ 1,50
Tuerca de seguridad	M6	8	\$ 0,06	\$ 0,48
Tornillo	M3x20	12	\$ 0,06	\$ 0,72
Bastón	M3x20	12	\$ 0,20	\$ 2,40
Tornillo de madera	Tornillo de madera 30mm	15	\$ 0,02	\$ 0,30
Regatones	Regaton para tubo cuadrado	4	\$ 0,25	\$ 1,00
Llantas	Llantas 4"	2	\$ 10,00	\$ 20,00
Llantas	Llantas 10"	2	\$ 20,00	\$ 40,00
Cojín	Cojín asiento	1	\$ 30,00	\$ 30,00
Cojín	Cojín espaldar	1	\$ 40,00	\$ 40,00
Silla de ruedas	Silla básica	1	\$ 100,00	\$ 100,00
<b>Total</b>				<b>\$ 247,02</b>

**Tabla 47****Costos directos: Elementos eléctricos y electrónicos**

Sistema	Elemento	Descripción	Cantidad	C. Unit.	C. Total
Control	Tarjeta de control	Arduino MEGA 2560	1	\$ 99,65	\$ 99,65
	Pulsador	Pulsador dos terminales de placa	14	\$ 0,20	\$ 2,80
	Buzzer	Buzzer de 5V	1	\$ 0,58	\$ 0,58
	Capacitor	Capacitor de 22nF	2	\$ 0,07	\$ 0,14
	Resistencia	Resistencia de 330 ohm	3	\$ 0,02	\$ 0,06
	Regulador	Convertor DC-DC	1	\$ 6,40	\$ 6,40

Continúa 

	Diodos	Diodos 1N4007	14	\$	0,07	\$	0,98
	Porta fusible	Porta fusible de placa	1	\$	0,43	\$	0,43
	Fusible	Fusible de 500mA	1	\$	0,10	\$	0,10
	Molex 2Pines	Conector de 2pines	7	\$	0,22	\$	1,54
	Molex 3Pines	Conector de 3 pines	1	\$	0,27	\$	0,27
	Molex 4Pines	Conector de 4 pines	1	\$	0,36	\$	0,36
	Molex 5Pines	Conector de 5 pines	1	\$	0,40	\$	0,40
	Molex 6Pines	Conector de 6 pines	1	\$	0,49	\$	0,49
	Molex 7Pines	Conector de 7 pines	1	\$	0,67	\$	0,67
	Molex 8Pines	Conector de 8 pines	6	\$	0,67	\$	4,02
	Conector 14Pines	Conector de 14 pines cable plano	1	\$	0,45	\$	0,45
	Regleta 40Pines	Regleta de 40 pines	1	\$	0,62	\$	0,62
	Conector 40Pines	Conector de cable plano 40 pines	1	\$	0,71	\$	0,71
	Pantalla táctil	Pantalla TFT 4"	1	\$	15,00	\$	15,00
	Medidor de batería	Medidor multi batería	1	\$	11,00	\$	11,00
	Joystick	Módulo para Arduino de mando análogo	1	\$	10,00	\$	10,00
	Fines de carrera	Sensor fin de carrera tipo pulsador	2	\$	0,40	\$	0,80
	Batería	Batería 12V 33Ah	2	\$	150,00	\$	300,00
Potencia	Resistencia	Resistencias variables	42	\$	0,02	\$	0,84
	Opto acoplador	Integrado 4N35	10	\$	0,40	\$	4,00
	Transistor BJT	Transistor TIP122	10	\$	0,55	\$	5,50
	Transistor MOSFET N	Transistor IRF9530	8	\$	10,00	\$	80,00
	Transistor MOSFET P	Transistor IRFZ44N	4	\$	16,00	\$	64,00

Diodos	Diodos 1N4007	14	\$	0,07	\$	0,98
Borneras 2 pines	Bornera de tornillo 2 pines	6	\$	0,22	\$	1,32
Borneras 3 pines	Bornera de tornillo 3 pines	1	\$	0,31	\$	0,31
Molex 2Pines	Conector de 2Pines	2	\$	0,22	\$	0,44
Molex 3Pines	Conector de 3Pines	1	\$	0,27	\$	0,27
Conector 14pines	Conector cable plano 14 pines	1	\$	0,45	\$	0,45
Relé	Relé de 24V	4	\$	0,90	\$	3,60
Motores	Motor lineal 6"	2	\$	40,00	\$	80,00
Motores	Motor lineal 10"	2	\$	70,00	\$	140,00
Motores	Motor reductor 300W	2	\$	200,00	\$	400,00
Accesorios	Cable plano	15	\$	2,23	\$	33,45
	Cable (m)	3	\$	0,89	\$	2,67
	Cable (m)	15	\$	1,50	\$	22,50
	Cable (m)	5	\$	0,36	\$	1,80
	Conector	1	\$	1,50	\$	1,50
	Conector	1	\$	1,60	\$	1,60
	Amarras	1	\$	2,44	\$	2,44
	Gabinete eléctrico	1	\$	40,00	\$	40,00
	Espiral organizador	1	\$	5,50	\$	5,50
	Interruptor	1	\$	0,20	\$	0,20
	Cinturón	1	\$	10,00	\$	10,00
	Cinturón	1	\$	15,00	\$	15,00
<b>Total</b>					<b>\$</b>	<b>1.375,84</b>

El resumen de los costos directos del proyecto se detalla en la Tabla 48

**Tabla 48****Costos directos: Costos totales**

Concepto	Costo
Materiales mecánicos	\$ 192,32
Accesorios mecánicos	\$ 247,02
Materiales y accesorios eléctricos y electrónicos	\$ 1.375,84
<b>Total</b>	<b>\$ 1.815,18</b>

**6.2 Costos indirectos**

Los costos indirectos no están vinculados con el proyecto, pero si son necesarios para la elaboración de este y su correcto desempeño. Estos costos están divididos en las categorías enlistadas a continuación:

- Materiales indirectos, Tabla 49
- Mano de obra indirecta, Tabla 50
- Costos operativos, Tabla 51

**Tabla 49****Costos indirectos: Materiales indirectos**

Elemento	Cantidad	C. Unit.	C. Total
Lija grano fino	2	\$ 0,80	\$ 1,60
Líquido penetrante	1	\$ 6,26	\$ 6,26
Thinner	1	\$ 4,37	\$ 4,37
Spray negro	1	\$ 2,90	\$ 2,90
Estaño	1	\$ 1,50	\$ 1,50
Broca cobalto 3mm	4	\$ 1,10	\$ 4,40
Broca cobalto 4mm	4	\$ 1,50	\$ 6,00
Broca cobalto 5mm	4	\$ 1,96	\$ 7,84
Broca cobalto 6mm	4	\$ 2,90	\$ 11,60
Cinta aislante	3	\$ 0,85	\$ 2,55
Disco de pulido	4	\$ 3,75	\$ 15,00
Disco de corte	3	\$ 3,13	\$ 9,39
<b>Total</b>		<b>\$</b>	<b>73,41</b>

**Tabla 50****Costos indirectos: Mano de obra indirecta**

Descripción	Tiemp (h)	C. Unit.	C. Total
Diseño e ingeniería	240	\$ 4,00	\$ 960,00
Planos mecánicos	80	\$ 3,00	\$ 240,00
Esquemas eléctricos	80	\$ 3,00	\$ 240,00
Programación	80	\$ 4,00	\$ 320,00
<b>Total</b>			<b>\$ 1.760,00</b>

**Tabla 51****Costos indirectos: Costos operativos**

Detalle	Costo
Energía eléctrica	\$ 40,00
Teléfono	\$ 20,00
Internet	\$ 40,00
Agua potable	\$ 30,00
<b>Total</b>	<b>\$ 130,00</b>

El resumen de los costos indirectos totales del proyecto se detalla en la Tabla 52

**Tabla 52****Costos indirectos: Costos totales**

Concepto	Costo
Materiales indirectos	\$ 73,41
Mano de obra indirecta	\$ 1.760,00
Operativos	\$ 130,00
<b>Total</b>	<b>\$ 1.963,41</b>

**6.3 Costos de fabricación**

Los costos de fabricación se relacionan con la elaboración directa del proyecto y las prestaciones de servicio que colaboraron en este, estos costos se detallan en la Tabla 53.

**Tabla 53**  
**Costos de fabricación**

Operación	Tiempo (h)	C. Unit.	C. Total
Taladro	5	\$ 3,50	\$ 17,50
Suelda MIG	3	\$ 10,00	\$ 30,00
Amoladora	10	\$ 3,50	\$ 35,00
Corte de Tol	1	\$ 0,25	\$ 0,25
Doblado de tol	1	\$ 0,25	\$ 0,25
Pintado electroestático	1	\$ 60,00	\$ 60,00
Herramientas	10	\$ 3,50	\$ 35,00
Ensamblaje mecánico	20	\$ 4,00	\$ 80,00
Ensamblaje eléctrico electrónico	15	\$ 4,00	\$ 60,00
Impresión 3D	15	\$ 4,00	\$ 60,00
	<b>Total</b>		<b>\$ 378,00</b>

#### 6.4 Costo total

El costo total toma en cuenta todos los detalles antes expuestos y ayudan a estimar la viabilidad del proyecto y su ejecución, su resumen se detalla en la Tabla 54.

**Tabla 54**  
**Costo total**

Concepto	Costo
Costos directos	\$ 1.815,18
Costos indirectos	\$ 1.963,41
Costos de fabricación	\$ 378,00
<b>Total</b>	<b>\$ 4.156,59</b>

## CONCLUSIONES

- Al culminar el diseño, construcción e implementación del proyecto, se ha cumplido con los parámetros planteados del proyecto, obteniendo desde una silla de ruedas básica, una silla de ruedas con las siguientes características:
  - Sistema móvil automático
  - Sistema de bipedestación automático
  - Sistema de reclinación automático
  - Interfaz manual de control
  - Interfaz automática de control mediante la aplicación de una pantalla táctil TFT
- En base a los requerimientos de funcionamiento del sistema de bipedestación y las limitaciones físicas de la silla, se optó por usar dos motores lineales de 10" de elongación. De esta manera se pudo combinar los movimientos sin interrumpir o limitar las otras características de la silla.
- Se seleccionó el mecanismo de barras paralelas para la transmisión de movimiento y transformación de la silla, como medida más óptima; obteniendo buenos resultados al funcionar de manera correcta. Este mecanismo se combinó para poder ser usado en la bipedestación y reclinación.
- Para evitar conflictos en el mecanismo de reclinación y bipedestación, se optó por manejar una de las barras paralelas en dos partes, obteniendo una barra de medida variable dependiendo la función requerida.
- Se seleccionaron motores especializados para sillas de ruedas eléctricas en la implementación del sistema móvil. Para su control la lógica seleccionada más óptima fue la teoría de control difuso, permitiendo una buena respuesta del sistema a pesar de tener dos variables de entrada. El sistema no es de exigencia de precisión,

por lo que las funciones usadas y las reglas de control respondieron con buen desempeño.

- Los sistemas de control de giro para la bipedestación y reclinación se implementaron con puente H de conmutación mecánica, debido a que su requerimiento no era exigente. En cambio, el sistema de control de giro para los motores principales de movilidad se implementó con elementos de estado sólido, debido a su alto requerimiento de velocidad de conmutación para el control de velocidad por modulación de ancho de pulso.
- Aunque se esperaba tener una sola caja de control, se replanteó el uso de dos, de tal manera que se pueda obtener un mando principal más pequeño y amigable con el usuario con interfaz táctil; dejando el control electrónico en una posición interna de la silla por su seguridad.
- En el diseño mecánico se logró conseguir que el peso del usuario no desplace demasiado el centro de gravedad de la silla evitando de esta manera la posibilidad de un volcamiento.
- El sistema de control se implementó en una placa de hardware libre Arduino Mega2560, debido a que cumplía con todos los requerimientos de puertos de control, memoria y desempeño.
- Se desarrolló una interfaz simple e intuitiva para el control del sistema, en base a diferentes características de uso de color, contrastes y disposiciones de elementos en la pantalla.
- Se seleccionaron baterías secas para la fuente de energía por su alta disponibilidad en el mercado nacional.

## RECOMENDACIONES

- Se recomienda el uso continuo de cinturón de seguridad en el uso de los sistemas de bipedestación, reclinación y movilidad. Para evitar cualquier posibilidad a un accidente.
- Para mejorar el desempeño de los mecanismos se pueden usar materiales más livianos que no pudieron ser usados en el proyecto debido a la falta de disponibilidad en el país.
- Se puede mejorar el mando de control con la implementación de pantallas capacitivas, que desventajosamente son muy escasas para el control con Arduino.
- Debe mantenerse un mantenimiento periódico de los mecanismos y los elementos electrónicos para alargar la vida útil de la silla.
- Se recomienda continuar la investigación y diseño para obtener mejoras en los sistemas mecánicos y electrónicos que permitan añadir más características a la silla y brindar al usuario una mejor experiencia.

## BIBLIOGRAFÍA

- Alexander, C. K., & Sadiku, M. N. (2012). Circuitos de primer orden. En C. K. Alexander, & M. N. Sadiku, *Fundamentos de circuitos eléctricos* (págs. 295-297). Cleveland: McGraw Hill.
- ALS Association. (28 de 05 de 2015). *Organización ALS*. Obtenido de <http://www.alsa.org/en-espanol/qu-es-la-ela.html>
- ARDUINO. (27 de 07 de 2015). *ARDUINO*. Obtenido de Detalle de productos: [www.arduino.cc](http://www.arduino.cc)
- ASHA. (15 de 07 de 2015). *American Speech Language Hearing Association*. Obtenido de <http://www.asha.org/public/speech/disorders/LaEsclerosisLateralAmiotrofica/>
- Azevedo, G. d., & Santos, V. d. (2015). The social representatios of family members about the caregiving process. *Enfermagem*, 14(5).
- Boylestad, R. L., & Nashelsky, L. (2011). Transistores de unión bipolar. En R. L. Boylestad, & L. Nashelsky, *Electrónica: Teoría de circuito y dispositivos electrónicos* (págs. 130-140). New York: Pearson.
- Budynas, R. G., & Nisbett, J. (2011). Diseño de elementos mecánicos. En R. G. Budynas, & J. Nisbett, *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley* (págs. 400-520). Missouri: McGrawHill.
- Chapman, S. J. (2011). Motores y generadores DC. En S. J. Chapman, *Máquinas eléctricas* (págs. 546-640). Perth: McGraw Hill.
- Costa, V., Melo, M., Garanhani, M., & Fujisawa, D. (07 de 21 de 2015). Representaciones sociales de la silla de ruedas para la persona con

lesión de la médula espinal. *Latino-Am. Enfermagem*, 18(4). Obtenido de [http://www.scielo.br/pdf/rlae/v18n4/es\\_14.pdf](http://www.scielo.br/pdf/rlae/v18n4/es_14.pdf)

Departamento de neurología CUN. (15 de 07 de 2015). *Clínica Universidad de Navarra*. Obtenido de <http://www.cun.es/enfermedadestratamientos/>

Erdman, A. G., & Sandor, G. N. (2011). Introducción a la cinemática y mecanismos. En A. G. Erdman, & G. N. Sandor, *Diseño de mecanismos* (págs. 6-50). Minnesota: Pearson.

Groover, M. P. (2012). Trabajo metálico en láminas. En M. P. Groover, *Fundamentos de manufactura moderna* (págs. 430-470). Bethlehem, Pennsylvania: McGraw Hill.

Hambley, A. (2011). Transistores de unión bipolar. En A. Hambley, *Electrónica* (págs. 230-245). Michigan: Pearson.

Herrera, P., & Peláez, I. (15 de 05 de 2015). *Reumatología clínica*. Obtenido de [http://apps.elsevier.es/watermark/ctl\\_servlet?\\_f=10&pident\\_articulo=90185370&pident\\_usuario=0&pcontactid=&pident\\_revista=273&ty=141&accion=L&origen=reuma&web=www.reumatologiaclinica.org&lan=es&fichero=273v09n01a90185370pdf001.pdf](http://apps.elsevier.es/watermark/ctl_servlet?_f=10&pident_articulo=90185370&pident_usuario=0&pcontactid=&pident_revista=273&ty=141&accion=L&origen=reuma&web=www.reumatologiaclinica.org&lan=es&fichero=273v09n01a90185370pdf001.pdf)

Hibbeler, R. (2011). Análisis de carga y esfuerzos. En R. Hibbeler, *Mecánica de Materiales* (págs. 20-75). Illinois: Pearson.

Hugh, Y., & Freedman, R. (2010). Análisis estático. En Y. Hugh, & R. Freedman, *Física Universitaria* (pág. 120). California: PEARSON.

INDURA. (2014). *Procesos de soldadura*. Quito : INDURA.

IPC. (2014). *Generic Standar on printed board design*. Illinois: IPC.

Lino, L. (15 de 07 de 2015). *Reumatología Clínica*. Obtenido de <http://www.reumatologiaclinica.org/es/problemasconelusosillas/>

- Myszka, D. H. (2011). Introducción a los mecanismos. En D. H. Myszka, *Máquinas y mecanismos* (págs. 10-70). Dayton: Pearson.
- Norton, R. L. (2012). Tornillos y sujetadores. En R. L. Norton, *Diseño de máquinas, un enfoque integrado* (págs. 720-730). Londres: Pearson.
- Pinho, V., & Costa, M. (10 de 05 de 2015). *SCIELO*. Obtenido de [http://www.scielo.br/pdf/rlae/v18n4/es\\_14.pdf](http://www.scielo.br/pdf/rlae/v18n4/es_14.pdf)
- Rocha, E. (s.f.). Corpo deficiente em busca da reabilitacao? Uma reflexao a partir da ótica das pessoas portadoras de deciencia fisica. *Tesis masterado, Universidad de Sao Paulo*.
- Schey, J. (2012). Materiales en lámina. En J. Schey, *Procesos de manufactur* (págs. 395-420). Ontario: McGraw Hill.
- SENPLADES. (2012). Transformación de la Matriz Productiva. *Revolución productiva a través del conocimiento y talento humano*, 32.
- Shaw, P. (15 de 07 de 2011). Amyotrophic lateral sclerosis and other motor neuron diseases. En P. Shaw, *Cecil Medicine* (pág. 418). Philadelphia: Goldman L. Obtenido de <http://umm.edu/health/medical/spanishency/articles/esclerosislaterala miotrofica>
- TECNUM. (25 de 09 de 2015). *Tecnum*. Obtenido de Tecnum: <http://www.tecnum.net/electricas.htm>
- Trust, M. S. (20 de 05 de 2015). *Observatorio Esclerosis Múltiple*. Obtenido de <http://observatorioesclerosismultiple.com/>
- University of Maryland Medical Center. (15 de 07 de 2015). *University of Maryland Medical Center*. Obtenido de <http://umm.edu/health/medical/spanishency/articles/esclerosislaterala miotrofica>
- Vicepresidencia del Ecuador. (22 de 07 de 2015). *Vicepresidencia de la República del Ecuador*. Obtenido de

<http://www.vicepresidencia.gob.ec/objetivo-general-objetivos-estrategicos-y-entorno-para-el-cambio-2/>

Winter, M., & Brodd, R. J. (2014). What Are Batteries, Fuel Cells, and Supercapacitors? *CHEMICAL REVIEWS*, 45. Obtenido de <http://pubs.acs.org/doi/full/10.1021/cr020730k>

## **ANEXOS**