



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE MECÁNICA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN ROBOT PARALELO POR CABLES DE TRES GRADOS DE LIBERTAD PARA REHABILITACIÓN PARCIAL DE HOMBRO”

**MORETA CHOLOTA PAULINA DEL ROCÍO
PILCO INCA JORGE LUIS**

TRABAJO DE TITULACIÓN TIPO: PROPUESTAS TECNOLÓGICAS

Previo a la obtención del Título de:

INGENIERO MECÁNICO

**RIOBAMBA – ECUADOR
2018**

ESPOCH

Facultad de Mecánica

**CERTIFICADO DE APROBACIÓN DEL TRABAJO
DE TITULACIÓN**

2017-05-12

Yo recomiendo que el Trabajo de Titulación preparado por:

MORETA CHOLOTA PAULINA DEL ROCÍO

Titulado:

**“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN ROBOT PARALELO POR CABLES
DE TRES GRADOS DE LIBERTAD PARA REHABILITACIÓN PARCIAL DE
HOMBRO”**

Sea aceptada como parcial complementación de los requerimientos para el Título de:

INGENIERA MECÁNICA

Nosotros coincidimos con esta recomendación:

Ing. Carlos José Santillán Mariño
DECANO FAC. DE MECÁNICA

Ing. Miguel Ángel Pérez Bayas
DIRECTOR

Ing. Javier Enrique Orna Chávez
MIEMBRO DE TESIS

ESPOCH

Facultad de Mecánica

**CERTIFICADO DE APROBACIÓN DEL TRABAJO
DE TITULACIÓN**

2017-05-12

Yo recomiendo que el Trabajo de Titulación preparado por:

PILCO INCA JORGE LUIS

Titulado:

**“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN ROBOT PARALELO POR CABLES
DE TRES GRADOS DE LIBERTAD PARA REHABILITACIÓN PARCIAL DE
HOMBRO”**

Sea aceptada como parcial complementación de los requerimientos para el Título de:

INGENIERO MECÁNICO

Nosotros coincidimos con esta recomendación:

Ing. Carlos José Santillán Mariño
DECANO FAC. DE MECÁNICA

Ing. Miguel Ángel Pérez Bayas
DIRECTOR

Ing. Javier Enrique Orna Chávez
MIEMBRO DE TESIS

ESPOCH

Facultad de Mecánica

EXAMINACIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

NOMBRE DEL ESTUDIANTE: MORETA CHOLOTA PAULINA DEL ROCÍO

TRABAJO DE TITULACIÓN: “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN ROBOT PARALELO POR CABLES DE TRES GRADOS DE LIBERTAD PARA REHABILITACIÓN PARCIAL DE HOMBRO”

Fecha de Examinación: 2018-10-30

RESULTADO DE LA EXAMINACIÓN:

COMITÉ DE EXAMINACIÓN	APRUEBA	NO APRUEBA	FIRMA
Ing. Jorge Isaías Caicedo Reyes PRESIDENTE TRIB. DEFENSA			
Ing. Miguel Ángel Pérez Bayas DIRECTOR			
Ing. Javier Enrique Orna Chávez MIEMBRO			

* Más que un voto de no aprobación es razón suficiente para la falla total.

RECOMENDACIONES:

El Presidente del Tribunal certifica que las condiciones de la defensa se han cumplido.

Ing. Jorge Isaías Caicedo Reyes
PRESIDENTE TRIB. DEFENSA

ESPOCH

Facultad de Mecánica

EXAMINACIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

NOMBRE DEL ESTUDIANTE: PILCO INCA JORGE LUIS

TRABAJO DE TITULACIÓN: “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN ROBOT PARALELO POR CABLES DE TRES GRADOS DE LIBERTAD PARA REHABILITACIÓN PARCIAL DE HOMBRO”

Fecha de Examinación: 2018-10-30

RESULTADO DE LA EXAMINACIÓN:

COMITÉ DE EXAMINACIÓN	APRUEBA	NO APRUEBA	FIRMA
Ing. Jorge Isaías Caicedo Reyes PRESIDENTE TRIB. DEFENSA			
Ing. Miguel Ángel Pérez Bayas DIRECTOR			
Ing. Javier Enrique Orna Chávez MIEMBRO			

* Más que un voto de no aprobación es razón suficiente para la falla total.

RECOMENDACIONES:

El Presidente del Tribunal certifica que las condiciones de la defensa se han cumplido.

Ing. Jorge Isaías Caicedo Reyes
PRESIDENTE TRIB. DEFENSA

DERECHOS DE AUTORÍA

El Trabajo de Titulación que presentamos, es original y basado en el proceso de investigación y/o adaptación tecnológica establecido en la Facultad de Mecánica de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. En tal virtud, los fundamentos teóricos-científicos y los resultados son de exclusiva responsabilidad de los autores. El patrimonio intelectual le pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Moreta Cholota Paulina Del Rocío

Pilco Inca Jorge Luis

DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD

Nosotros, Moreta Cholota Paulina Del Rocío y Pilco Inca Jorge Luis, declaramos que el presente trabajo de titulación es de nuestra autoría y que los resultados del mismo son auténticos y originales. Los textos constantes en el documento que provienen de otra fuente están debidamente citados y referenciados.

Como autores, asumimos la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este trabajo de titulación.

Moreta Cholota Paulina Del Rocío

Cédula de Identidad: 180509542-7

Pilco Inca Jorge Luis

Cédula de Identidad: 060413773-7

DEDICATORIA

Quiero dedica este trabajo a mi madre Luz por ser apoyo incondicional en todo momento, por darme la fuerza para continuar a mi padre Juan, a mi abuelita Rosario que supo ser una segunda madre apoyándome en cada etapa de mi vida, con su amor incondicional, a toda mi familia por cariño y apoyo en los momentos de tristeza y alegría de mi vida.

A Dios por darme la fortaleza y sabiduría para continuar en los momentos de adversidad y poner a personas valiosas en mi camino.

Paulina Del Rocío Moreta Cholota

Dedico este trabajo de titulación a Dios quien es lo primero en mi vida pues este logro no hubiese sido posible sin su ayuday su sabiduría, a mis padres Luis y Piedad, pues los Valores que me enseñaron me permitieron convertirme en la persona que soy, a cada uno de mis herman@s en especial a Paul quien me apoyo de forma incondicional y a todos mis amig@s que durante toda la carrea me han ayudado a continuar y no rendirme, siempre llevaré en mi corazón las palabras de aliento, el apoyo y la ayuda recibida a lo largo de esta etapa de mi vida

Jorge Luis Pilco Inca

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios y la Virgen del Cisne que me dieron la fuerza necesaria para poder conseguir una meta importante en mi vida, a mi familia por ser un apoyo para poder continuar.

A mis amigos que fueron un apoyo en los momentos de dificultad demostrando su comprensión y cariño además de compartir momentos inolvidables

De igual manera mis agradecimientos más sinceros a la Facultad de Mecánica de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, a mis profesores en especial nuestro tutor, quien supo guiarnos y apoyarnos para poder culminar con este trabajo con satisfacción gracias por su paciencia, dedicación, apoyo incondicional y amistad.

Paulina Del Rocío Moreta Cholota

Agradezco de manea especial a Dios por acompañarme durante toda la carrera y dejarme sentir su compañía en los momentos de alegría y también en los momentos difíciles

Al Ing. Miguel Pérez director de este trabajo de titulación por su ayuda incondicional y su preocupación para que este trabajo llegue a su conclusión y así alcanzar un sueño.

A la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo por dejarme ser parte de la institución y de la Facultad de Mecánica y de la Escuela de Ingeniería Mecánica y junto al personal docente y administrativo han impartido conocimientos y experiencias que me serán de ayuda durante toda mi vida.

A todos mis amig@s y compañeros de aulas en especial Paulina mi compañera durante el trabajo de titulación

Jorge Luis Pilco Inca

RESUMEN

El presente trabajo de titulación tiene como propósito diseñar un robot paralelo manipulado por cables de Tres Grados de Libertad (3GDL) para rehabilitación parcial de hombro mediante un estudio cinemático y dinámico. Por medio del estudio bibliográfico se investigó, analizó y determino materiales, dimensiones, componentes mecánicos y electrónicos para el desarrollo del prototipo, posteriormente se realizó un estudio de las alternativas de diseño y construcción del robot estableciendo las características físicas para el cumplimiento de su función, empleando un análisis de cinemática inversa y dinámico del efector final se halló un modelo cinemático y dinámico, mediante el uso de software Matlab encontramos la longitud de los cables de 870 mm, la fuerza máxima a soportar de 143,04 N y el torque máximo de los actuadores de 8,8 N.mm seleccionando una cuerda de nylon, motores de paso NEMA 23 y diseñando un sistema de recolección de cable por compensación de ángulo. A continuación, se procedió con la construcción y montaje de manera secuencial primero el sistema estructural, sistemas de plataformas, sistema de recolección de cables y por último el sistema electrónico para el control de movimientos. Finalmente se realizó la comprobación de funcionamiento de los elementos mecánicos y el control de movimientos establecidos además de un manual de operaciones y mantenimiento para evitar daños y mal uso del equipo. El prototipo realiza los ejercicios de rehabilitación intermedios logrando una recuperación parcial del hombro y pudiendo ser utilizado en centros de rehabilitación física.

PALABRAS CLAVE: <TECNOLOGÍA Y CIENCIAS DE LA INGENIERÍA>
<ROBOT PARALELO>, < SISTEMA CERRADO>, < ROBOT PLANAR>, <MODELO CINEMÁTICO>, <MODELO DINÁMICO>, <RE HABITACIÓN>, <SISTEMA DE COMPENSACIÓN>, <MOTOR>

ABSTRACT

The purpose of this research is to design a parallel robot manipulated by Three Degrees of Freedom cables (3DOF) for partial shoulder rehabilitation through a dynamic and kinematic study. By means of the bibliographic study, materials, dimensions, mechanical and electronic components for the development of the prototype were investigated, which was analyzed and determined. Later a study of the alternatives of design and construction of the robot was made establishing the physical characteristics for the fulfillment of its function, using a dynamic and inverse cinematic analysis of the end effector, a dynamic and kinematic model was found. Using the Matlab software, we found the cable length of 870mm, the maximum force to be supported of 143.04 N, and the maximum torque of the 8.8 N.m actuators selected a nylon rope, NEMA 23 pitch motors and designed a cable collection system for angle compensation. Next, the structural system, platform systems, cable collection system and, lastly, the electronic system for the control of movements were sequentially constructed and assembled. Finally, the functional check of the mechanical elements and the control of established movements was carried out, as well as a manual of operations and maintenance to avoid damage and misuse of the equipment. The prototype performs the intermediate rehabilitation exercises achieving a partial recovery of the shoulder and can be used in physical rehabilitation centers.

KEYWORDS: <ENGINEERING TECHNOLOGY AND SCIENCE> <PARALLEL ROBOT>, <CLOSED SYSTEM>, <ROBOT PLANAR>, <CINEMATIC MODEL>, <DYNAMIC MODEL>, <REHABILITATION>, <COMPENSATION SYSTEM>, <ENGINE>

INTRODUCCIÓN

La tecnología ha tenido grandes avances en los últimos años, que se encuentran aplicados en diferentes ámbitos donde la humanidad se desenvuelve tales como: industria entretenimiento, deporte y salud. La salud es un ámbito importante para el desarrollo de un país por lo que se está investigado y perfeccionando maquinas, equipos y robots que ayuden a mejorar, recuperar o reemplazar el movimiento de extremidades en personas que han sufrido algún tipo de afición y perdiendo de movilidad.

Los robots paralelos están siendo investigados y desarrollados para cumplir con diferentes actividades, por su variedad de tipos, entre los cuales están los robots conducidos por cables espaciales o planares dependiendo de sus grados de libertad. Distintos centros de investigación alrededor del mundo llevan a cabo estudios acerca de robots conducidos por cables para diferentes aplicaciones como operaciones de rescate, sujeción, movimiento de grandes objetos, terapias y automatización de ciertas actividades entre otras.

Se desarrolla un estudio acerca de los robots paralelos conducidos por cables con el fin de elaborar un prototipo que puede ser utilizado en rehabilitación de la extremidad superior de una persona, específicamente la articulación de hombro, para poder llegar a este fin es necesario realizar un análisis profundo en lo que respecta a la cinemática y dinámica pues es en base a estos conocimientos que se pueden obtener principios para la solución del problema planteado. La investigación realizada sobre temas relacionados provee de herramientas adecuadas en el diseño de los componentes que va a ser usado y seleccionar de forma adecuada cada una de las alternativas existentes y dar solución a las diferentes funciones que el robot va a cumplir.

Una vez analizado las necesidades que debe cumplir el robot planteadas por un profesional, y transformadas en características técnicas de elabora el prototipo que se sometido a pruebas funcionales y de movilidad con el objetivo de verificar los requerimientos establecidos.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN	
ABSTRACT	
INTRODUCCIÓN	
CAPÍTULO I	
1.1 Antecedentes.....	1
1.2 Formulación del problema.....	2
1.3 Justificación.....	3
1.3.1 <i>Justificación teórica.</i>	3
1.3.2 <i>Justificación metodológica.</i>	3
1.3.3 <i>Justificación práctica.</i>	3
1.4 Objetivos.....	3
1.4.1 <i>Objetivo general.</i>	3
1.4.2 <i>Objetivos específicos.</i>	3
CAPÍTULO II	
2. ESTUDIO DEL ARTE SOBRE DISEÑO DE DISPOSITIVOS DE REHABILITACIÓN DE HOMBRO	
2.1 Biomecánica del Hombro, tipos de lesión y rehabilitación física	5
2.1.1 <i>Tipos de rehabilitación en afecciones de hombro</i>	7
2.1.2 <i>Ejercicios de rehabilitación física de hombro</i>	8
2.1.3 <i>Características del grupo de personas al que va dirigido</i>	10
2.2 Equipos de rehabilitación y fisioterapia	11
2.3 Robots paralelos	13
2.3.1 <i>Tipos de robot paralelos</i>	15

2.3.2	<i>Diseño mecánico</i>	30
2.3.3	<i>Fases de diseño</i>	30
2.3.4	<i>Etapas del proceso de diseño</i>	31
2.3.5	<i>Software a utilizar en el diseño del robot paralelo manejado por cables</i>	33

CAPÍTULO III

3. ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS

3.1	Definición del producto	35
3.1.1	<i>Definición Del Problema</i>	35
3.1.2	<i>Necesidades del cliente</i>	36
3.1.3	<i>Desarrollo de la función de calidad</i>	2
3.1.4	<i>Especificaciones del producto</i>	8
3.2	Diseño conceptual.....	9
3.2.1	<i>Estructura funcional</i>	10
3.2.2	<i>Definición de módulos</i>	12
3.2.3	<i>Valoración y selección de módulos</i>	29
3.3	Características del equipo	34

CAPÍTULO IV

4. ANÁLISIS CINEMÁTICO Y DINÁMICO DE UN ROBOT PARALELO MANIPULADO POR CABLES DE TRES GRADOS DE LIBERTAD

4.1	Descripción del mecanismo.....	36
4.2	Análisis cinemático.....	68
4.3	Análisis dinámico	46

CAPÍTULO V

5. DISEÑO MECÁNICO

5.1	Diseño de detalle	56
5.1.1	<i>Selección de cable</i>	57
5.1.2	<i>Diseño de la polea</i>	58
5.1.3	<i>Diseño del tambor</i>	66

5.1.4	<i>Diseño de resortes a tracción</i>	78
5.1.5	<i>Diseño de la plataforma móvil</i>	85
5.1.6	<i>Diseño de la plataforma fija</i>	86
5.1.7	<i>Estructura</i>	91
5.2	Diseño sistema electrónico.	101

CAPÍTULO VI

6. CONSTRUCCIÓN, MONTAJE Y PRUEBA DE FUNCIONAMIENTO DEL ROBOT PARALELO DE 3 GRADOS DE LIBERTAD MANIPULADO POR CABLES

6.1	Construcción	106
6.1.1	<i>Componentes del equipo</i>	106
6.1.2	<i>Elementos de construcción.</i>	108
6.1.3	<i>Tiempo de construcción del equipo</i>	109
6.2	Montaje del robot paralelo manipulado por cables	112
6.3	Pruebas del robot paralelo manipulado por cable.	114
6.4	Verificación de requerimientos	119
6.4.1	<i>Verificación de los requerimientos del usuario (Voz del usuario).</i>	119
6.4.2	<i>Verificación de los requerimientos del ingeniero (Voz del ingeniero).</i>	120

CAPÍTULO VII

7. MANUAL DE OPERACIÓN, MANTENIMIENTO Y ANÁLISIS DE COSTOS

7.1	Manual de operación	122
7.1.1	<i>Accesorios del robot</i>	123
7.2	Características del equipo de rehabilitación	124
7.3	Instalación del equipo	125
7.4	Instrucciones de operación	125
7.4.1	<i>Puesta en marcha</i>	125
7.5	Manual de mantenimiento	128
7.6	Costos operacionales	129

7.6.1	<i>Costos directos</i>	129
7.6.2	Total, costos directos	132
7.6.3	<i>Costos indirectos</i>	132
7.6.4	Costo total.....	133
8.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	133
8.1	Conclusiones.....	133
8.2	Recomendaciones	134

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

PLANOS

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1-2: Ejercicios de rehabilitación después de una cirugía.....	8
Tabla 2-2: Características de la población laboral de 20 a 39 años.....	10
Tabla 3-2: Dimensiones de la mano de personas de 20-39 años	11
Tabla 4-2: Propiedades de acero y aluminio.....	21
Tabla 5-2: Propiedades del acero y nylon.....	23
Tabla 6-2: Placas de programación.....	29
Tabla 1-3: Requerimientos del equipo.....	36
Tabla 2-3: Ficha técnica competencia 1	4
Tabla 3-3: Ficha técnica competencia 2	5
Tabla 4-3: Especificaciones técnicas del prototipo	9
Tabla 5-3: Matriz morfológica para solución de cada módulo.....	24
Tabla 6-3: Evaluación de cada criterio-Módulo1	30
Tabla 7-3: Evaluación del criterio Resistencia /Peso	30
Tabla 8-3: Evaluación del criterio rangos de movimiento.....	30
Tabla 9-3: Evaluación del criterio Fuerza de tracción.....	31
Tabla 10-3: Evaluación del criterio Ergonomía.....	31
Tabla 11-3: Selección de la solución del módulo 1	31
Tabla 12-3: Evaluación de cada criterio-Módulo 2	32
Tabla 13-3: Evaluación del criterio Control de motores	32
Tabla 14-3: Evaluación del criterio Control de movimientos	33
Tabla 15-3: Evaluación del criterio Modo de funcionamiento.....	33
Tabla 16-3: Selección de la solución del módulo 2.....	33
Tabla 17-3: Pre diseño de alternativa seleccionada.....	34
Tabla 1-4: Dimensiones de la plataforma.....	40
Tabla 2-4: Posiciones del efector final	41
Tabla 3-4: Longitudes y ángulos	43
Tabla 4-4: Parámetros de los elementos de CDPR.....	53

Tabla 5-4: Fuerzas en los cables	53
Tabla 6-4: Torques de motores	54
Tabla 7-4: Velocidad angular en ejes	54
Tabla 1-5: Propiedades de cuerda de Nylon	57

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1-2: Huesos y articulaciones del hombro	5
Figura 2-2: Ejes de movimiento de hombro	6
Figura 3-2: Movimientos del hombro.....	7
Figura 4-2: Dimensiones antropométricas.....	10
Figura 5-2: Fuerzas en el brazo	11
Figura 6-2: Dimensiones antropométricas de la mano	11
Figura 7-2: Rueda para hombro.....	12
Figura 8-2: ARTROMOT S3.....	12
Figura 9-2: The NeReBot Y Robot CAREX.....	13
Figura 10-2: Robot paralelo-quattro	14
Figura 11-2: Robot paralelo Planar de 3 grados de libertad	15
Figura 12-2: Robot Delta.....	15
Figura 13-2: Componentes principales de una estructura guiada por cables	16
Figura 14-2: CDPRs	17
Figura 15-2: Robot manipulado por cables	17
Figura 16-2: Tipos de cinemática	18
Figura 17-2: Robot manipulado por cables de 3GDL	19
Figura 18-2: Componentes de un cable de acero.....	23
Figura 19-2: Hilo de nylon	23
Figura 20-2: Sistema de compensador de ángulo.....	24
Figura 21-2: Bobinadora de nivel.....	25
Figura 22-2: Apoyo en la garganta de la polea.....	25
Figura 23-2: Esquema del Tambor	25
Figura 24-2: Dimensiones del tambor	26
Figura 25-2: Nomenclatura de un engrane recto	27
Figura 26-2: Partes de un servomotor	28
Figura 27-2: Motor Paso a paso.....	29

Figura 28-2: Fases del proceso de diseño.....	31
Figura 29-2: Esquema de la casa de calidad.....	32
Figura 1-3: Casa de la calidad	7
Figura 2-3: Función del equipo	10
Figura 3-3: Análisis funcional-Nivel 1	10
Figura 4-3: Análisis funcional-Nivel 2.....	11
Figura 5-3: Definición de módulos.....	13
Figura 6-3: Estructura con sistema de tijeras	18
Figura 7-3: Driver para motor a paso	21
Figura 8-3: Robot Vertical.....	27
Figura 9-3: Robot horizontal con bobinadora de nivel.....	28
Figura 10-3: Robot horizontal por botoneras	28
Figura 1-4: Esquema CDPR	37
Figura 2-4: Flujograma programa Principal	38
Figura 3-4: Esquema de posiciones de la plataforma móvil N.....	39
Figura 4-4: Esquema de Posiciones.....	41
Figura 5-4: Flujograma Cinemática Inversa.....	42
Figura 6-4: Flujograma matriz Jacobiana.....	46
Figura 7-4: Esquema Dinámico de un CDPR.....	47
Figura 8-4: Sistema Mecánico	48
Figura 9-4: Diagrama de un motor CD.....	49
Figura 10-4: Flujograma del análisis dinámico	52
Figura 1-5: Esquema de diámetros del tambor	72
Figura 2-5: Fuerzas en el plano x-y en el tambor	73
Figura 3-5: Fuerzas en el plano x-z en el tambor	73
Figura 4-5: Diagrama de fuerza y esfuerzos en el plano x-y del tambor	74
Figura 5-5: Fuerzas en el plano x-y en el tambor	75
Figura 6-5: Fuerzas en el plano x-z en el tambor	75
Figura 7-5: Diagrama de fuerza y esfuerzos en el plano x-z del tambor.....	77
Figura 8-5: Plataforma móvil con mango esférico	85
Figura 9-5: Plataforma móvil con mango.....	86
Figura 10-5: Diagrama de fuerzas y esfuerzos el plano x-y del eje central	87
Figura 11-5: Diagrama de cortantes y momentos en el plano x-y del eje central	89
Figura 12-5: Sistema de elevación en posición más baja	92

Figura 13-5: Sistema de elevación en la posición más elevada.....	92
Figura 14-5: Desplazamiento total del sistema	93
Figura 15-5: Aplicación de cargas en la estructura	94
Figura 16-5: Diagrama de cortantes	94
Figura 17-5: Diagrama de momentos	95
Figura 18: Resultado demanda capacidad	95
Figura 19-5: Tuerca	100
Figura 20-5: Lazo de control abierto	103
Figura 21-5: Circuito para obtener 12 V CD.....	103
Figura 22-5: Esquema de circuito de control	104
Figura 1-7: Robot paralelo manipulado por cables.	122
Figura 2-7: Plataforma móvil.	123
Figura 3-7: Sistema de recolección de cable.	123
Figura 4-7: Panel de control	124

LISTA DE GRÁFICOS

	Pág.
Gráfico 1-6: Posición del efector final en función del tiempo-Movimiento1	118
Gráfico 2-6: Posición del efector final en función del tiempo-Movimiento 2	118
Gráfico 3-6: Posición del efector final en función del tiempo-Movimiento 3	118
Gráfico 4-6: Posición del efector final en función del tiempo-Movimiento 4	122

LISTA DE ABREVIACIONES

INEC	Instituto Nacional de Estadísticas y Censos
CDPR	Cable Driver Parallel Robot
GDL	Grados de libertad
CAD	Diseño asistido por computadora
QFD	Quality Function Deployment
IAI	Intelligent Automation Incorporated
CD	Corriente Directa
PLA	Acido Polialactico
AISI	Instituto Americano del Hierro y el Acero
ASTM	Asociación Americana de Ensayo de Materiales
AAOS	American Academic of Orthopaedic Surgeons.

LISTA DE ANEXOS

A	Programación en Matlab
B	Coefficiente de elasticidad y esfuerzo de tracción de hilo de pescar
C	Factor de seguridad para cables
D	Ficha técnica de hilo de nylon
E	Constantes A y m
F	Propiedades mecánicas del resorte
G	Esfuerzos permisibles
H	Características de rodamiento rígido de bolas de $d=10\text{mm}$
I	Fórmula de carga estática P_0
J	Valores de factor de carga axial (X) y factor de carga Radial (Y)
K	Factor de servicio f_s
L	Coefficientes estáticos y dinámicos
M	Propiedades mecánicas del Acero AISI 1040
N	Características de un motor paso a paso NEMA 23
O	Procedimiento de soldadura WPS

CAPÍTULO I

1.1 Antecedentes

En la actualidad debido a los grandes avances de la tecnología en ámbitos de la robótica, mecatrónica y biomecánica, se ha intensificado el uso de tecnologías para el mejoramiento de la salud de las personas mediante uso de prótesis o implantes que ayudan a solucionar problemas de salud o atenuar las afectaciones en personas que por un motivo u otro han sufrido lesiones o pérdida de movimiento en extremidades.

Hoy en día crece el interés de universidades, centros de investigación y empresas alrededor del mundo por desarrollar máquinas y dispositivos que ayuden a rehabilitar y a fortalecer la parte afectada del cuerpo (por ejemplo: tobillo, rodilla, hombro, cadera, etc.), absorber el esfuerzo físico y repetitivo de la terapia, y ofrecer mayor diversidad de terapias personalizadas con movimientos precisos y seguros. Los robots paralelos que se han propuesto alrededor del mundo se basan en la configuración mecánica de cadena cerrada en donde el efector final se une a la base por al menos dos cadenas cinemáticas independientes. (GUZMÁN, y otros, 2014)

Los robots de rehabilitación de extremidades superiores también llamados robots terapéuticos, coordinan los movimientos pasivos de las extremidades de manera de mejorar su función motora, los equipos de rehabilitación están formados por mecanismos de movimiento hidráulico, estas máquinas son capaces de ofrecer movimientos de flexión y extensión, a velocidad y rangos de movimientos programados. (DOMINGUEZ, 2014)

De los robots terapéuticos se puede identificar dos tipos principales los que usan el efector final y el otro que funciona como un esqueleto adherido al cuerpo los dos respetan las funciones biomecánicas de las extremidades superiores. En los robots que usan el efector final se están realizando investigaciones acerca de sus beneficios cinemáticos para diferenciar entre su función de recuperación genuina y recuperación funcional debido a que se trata de realizar un control del tronco y las extremidades superiores. (KWAKKEL, 2008)

En el país existe una gran cantidad de pacientes que asisten a casas de salud y centros de rehabilitación en busca de mejoras de afecciones articulares en diferentes miembros por causa de accidentes laborales, tránsito o de otra índole y deben regresar a menudo para tener sesiones de rehabilitación. Según datos del INEC en el año 2014 asistieron 6 878 personas con problemas de salud relacionados con el hombro. (LUGMAÑA, 2014)

Al diagnosticar y curar problemas de las articulaciones, los principales casos de cirugías son por lesiones deportivas, meniscales, de ligamentos o traumatismos en las rodillas. La mayoría de pacientes que se someten a un procedimiento médico son de entre 20 y 50 años de edad. En el 2015 se realizaron más de 200 artroscopias; y en este nuevo año el Hospital del IESS incursionó en artroscopias en el hombro. (El Tiempo, 2016)

En los últimos años los centros médicos privados de nuestro país han realizado adquisiciones de equipos de rehabilitación como son: rueda de hombro, bicicletas estáticas, equipos de ultrasonido, magno terapia y rayos láser. El Instituto Ecuatoriano de Seguridad Social (IESS) incorporó en los hospitales de Babahoyo, Durán y Santo Domingo de los Tsáchilas, nuevos equipos robóticos para el tratamiento de pacientes que sufren lesiones graves de sus extremidades o perdieron la movilidad. En el Hospital de Durán y Babahoyo incorporó el robot LOCOMAT “Armeo power” que es un brazo robótico, que se utiliza en la rehabilitar física de miembros superiores. (MOYANO, 2015)

1.2 Formulación del problema.

Los pacientes que sufren cierto tipo de lesión de hombro y acuden a centros médicos por sesiones de rehabilitación física, la mayor parte de tiempo no pueden acceder a tratamientos completos de rehabilitación debido a fallas de los equipos existentes, pues los equipos que deben ser usados para la rehabilitación son obsoletos, por tener mecanismos rígidos que no se pueden ajustar a las necesidades de cada individuo y por necesitar personal capacitado para utilizarlos; la adquisición de equipos o robots para rehabilitación física de última tecnología significa inversiones de grandes cantidades de dinero por lo que el desarrollo de un prototipo de robot que se pueda usar para rehabilitación física a un costo menor implicaría que los centros médicos puedan adquirirlos y brindar a la población un tratamiento completo.

1.3 Justificación.

1.3.1 *Justificación teórica.*

Se proporcionará información necesaria para la elaboración de un robot conducido por cables de tres grados de libertad para rehabilitación parcial del hombro como son: modelos cinemático y dinámico para el proceso de control y también algoritmos para el diseño y selección de los elementos de la estructura, del mecanismo de funcionamiento y del sistema de control.

1.3.2 *Justificación metodológica.*

La realización del presente proyecto se procederá a realizar una guía metodológica para la elaboración de un robot útil para la rehabilitación física de un hombro, que ayudará en futuras investigaciones acerca de los robots terapéuticos.

1.3.3 *Justificación práctica.*

Luego de ser probado este prototipo y de realizar mejoras adecuadas el modelo de este robot puede ser fabricado y comercializado en los centros de rehabilitación física para ayudar a la solución parcial o total del problema planteado.

1.4 Objetivos.

1.4.1 *Objetivo general.*

Diseñar y construir un prototipo de un robot paralelo por cables para la rehabilitación parcial de hombro con la finalidad de facilitar la recuperación de personas que han tenido una lesión en esa articulación.

1.4.2 *Objetivos específicos.*

- Realizar el análisis del estado del arte sobre dispositivos de rehabilitación y robots paralelos conducidos por cables.

- Elaborar los modelos cinemático y dinámico del prototipo de un robot paralelo de tres grados de libertad controlado por cables.
- Diseñar el robot paralelo por cables.
- Construcción del prototipo del robot paralelo por cables.

CAPÍTULO II

2. ESTADO DEL ARTE SOBRE DISEÑO DE DISPOSITIVOS DE REHABILITACIÓN DE HOMBRO

En la siguiente parte, se muestra el análisis bibliográfico de los diferentes máquinas y equipos de rehabilitación para el hombro utilizados en centros médicos y fisioterapéuticos del Ecuador. Actualmente se ha implementado el uso de robots en la rehabilitación física, creados por centro de investigación europea por lo que se estudiará los diferentes tipos de robots paralelos aptos para este tipo función, su modelo cinemático y dinámico, componentes y actuadores que lo conforman además los materiales que se usan para su fabricación. Para lograr obtener el diseño del prototipo se debe conocer los ejercicios para rehabilitación de hombro después de una cirugía y su funcionamiento biomecánico.

2.1 Biomecánica del Hombro, tipos de lesión y rehabilitación física

El hombro es la articulación más inestable del cuerpo humano que une el brazo con el tronco y está compuesta por tres huesos: húmero clavícula y escápula; cuatro articulaciones: externo claviclar, acromio claviclar, escapula torácica y gleno humera, además de músculos, ligamentos tendones y bursas, manteniéndolo en una posición estable. (IDELSON, 2002)

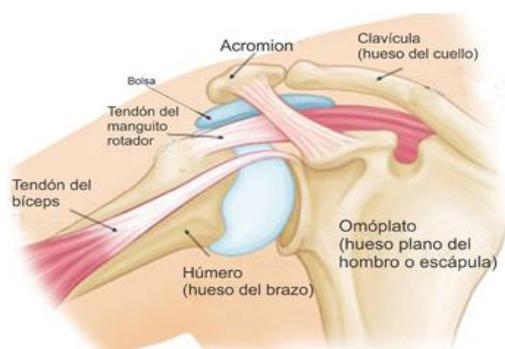


Figura 1-2: Huesos y articulaciones del hombro

Fuente: orthoinfo.aaos.org

El mecanismo del hombro es muy complejo, posee varios grados de libertad, para moverse a lo largo de los planos referenciales formados entre los ejes transversal, vertical y anteroposterior mostrados en la Figura 2-2.

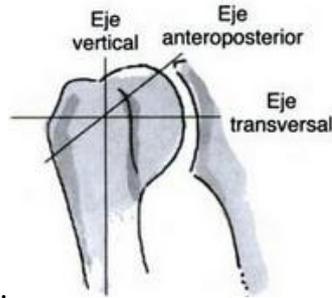


Figura 2-2: Ejes de movimiento de hombro

Fuente: Lesiones en el hombro y fisioterapia

Planos referenciales.

Los planos de referencia en el movimiento del hombro son:

- *Plano de flexión.* -Formado por los ejes anteroposterior longitudinal, normal eje transversa.
- *Plano de abducción.* -Formado por los ejes transversal y longitudinal, normal al eje anteroposterior.
- *Plano neutro.* -Formado entre el eje transversal y anteroposterior, normal al eje longitudinal (RODRIGUEZ, 2005)

Movimientos de hombro

Los movimientos que realiza el hombro son:

- ***Flexión.*** - Movimiento alrededor del eje transversal girando 180°.
- ***Extensión.*** - Movimiento contrario a la flexión llega a girar un máximo de 50°.
- ***Aducción.*** -Movimiento alrededor del eje anteroposterior considerando como abducción cuando el brazo se alejó del cuerpo.
- ***Abducción.*** - Movimiento donde el brazo se acercó al cuerpo y finalmente rotación ocurre alrededor del eje longitudinal logrando una rotación interna de 100° y rotación externa de 80°.



Figura 3-2: Movimientos del hombro

Fuente: <https://es.slideshare.net/TraumaHCM/anatomia-de-hombro-55721669>

2.1.1 Tipos de rehabilitación en afecciones de hombro

La gran movilidad del hombro hace que sea demasiado inestable, provocando lesiones y afecciones en el mismo tales como: tendinitis, desgarres, bursitis, hombro congelado, fractura, artritis, ruptura del manguito rotador y dislocaciones. La mayor parte de lesiones se dan por realizar movimientos repetitivos, ocasionando un desgaste o inflamaciones en tendones del manguito rotador que es un conjunto de músculos y tendones cuya función es mantener la estabilidad del hombro. Después de una cirugía es necesario la rehabilitación física, para lo que se necesitan equipos adecuados para una recuperación exitosa.

- Sesiones de ultrasonido.
- Sesiones de magnetoterapia.
- Rehabilitación con equipos laser.
- Uso de equipos pasivos.
- Rehabilitación física.

El hombro es una articulación propensa a sufrir algún tipo de lesión o afección que afecta a su funcionamiento normal, sin embargo, la mayor parte de estas afecciones no conllevan a realizar una cirugía; pero después de realizarse una intervención médica de este tipo es necesario tener sesiones de rehabilitación física de 3 a 6 meses, con equipos específicos y especiales para este tipo de ejercicios, sin embargo, muchos centros

médicos de nuestro país dan de baja estos equipos por ser demasiados grandes y la incomodidad en el momento de su uso.

2.1.2 Ejercicios de rehabilitación física de hombro

Las personas después que han sido intervenidas quirúrgicamente en la articulación de hombro, por algún tipo de lesión grave, deben recobrar su movimiento y flexibilidad normal para poder realizar las actividades cotidianas y recreativas de forma habitual sin ninguna restricción, razón por la que se vuelve necesario el realizar ejercicios que contribuyan a este fin.

A continuación, se muestran un conjunto de ejercicios y actividades que son recomendados para que una rehabilitación se pueda llevar a cabo de forma adecuada según la American Academic of Orthopaedic Surgeons (AAOS).

En la Tabla 1-2. Se describen ejercicios usados para rehabilitación de hombro, lo cuales se deben realizar de manera que el paciente se sienta relajado y no presente dolor en la articulación el límite de cada ejercicio es el que se pueda efectuar sin sentir dolor, razón por lo que la amplitud de cada ejercicio en cada individuo debe ser ajustada.

De entre los ejercicios mostrados los que pueden realizarse mediante el robot son los que se muestran en las filas 1, 4 y 6 de la Tabla 1-2. Puesto que son ejercicios de rehabilitación básicos e intermedios después de una cirugía sobre un plano específico no requieren de carga adicional para realizar los movimientos.

Tabla 1-2: Ejercicios de rehabilitación después de una cirugía.

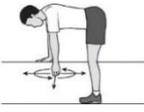
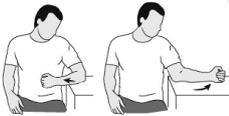
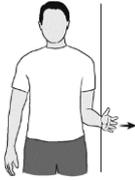
Nº	EJERCICIO	ILUSTRACIÓN	Nº Repeticiones
1	<p>EJERCICIOS DE CODMAN Inclinar de modo que la espalda y piernas formen un Angulo de 90 grados. El brazo no involucrado se ubica sobre un apoyo horizontal (Figura A) y el brazo involucrado realiza ejercicios pendulares, estos movimientos son de tres tipos: 1.-Circular en sentido horario y anti horario 2.-De adelante hacia atrás 3.-De un lado hacia el otro. Pueden realizarse a una inclinación diferente (Figura B).</p>	<p>A)</p>  <p>B)</p> 	Max 20

Tabla 1-2 (continuación): Ejercicios de rehabilitación después de una cirugía

2	<p>FLEXIÓN DEL HOMBRO CON APOYO Entrelazar las manos y mantener los codos lo más recto posible mientras se lo levanta por encima de la cabeza este ejercicio puede realizarse tanto acostado (figura A) como sentado en una silla (Figura B) la elevación que debe incrementarse progresivamente usando el dolor como guía.</p>	<p>A)</p>  <p>B)</p> 	10-20
3	<p>ROTACIÓN DEL HOMBRO CON APOYO Se debe colocar el codo y mantenerlo apoyado en una superficie además las escapulas (omoplatos) debe estar juntas y hacia abajo mientras el antebrazo se mueve de adentro hacia afuera sin mover el codo. Se debe consultar con el terapeuta o cirujano si existe algún grado de restricción para este ejercicio.</p>		10
4	<p>FLEXIÓN- EXTENSIÓN Deslizar la mano de adelante hacia atrás, para conseguir mayor flexión realice una inclinación hacia el frente.</p>		10
5	<p>CAMINADO SOBRE PARED Con el codo en línea recta y a una separación moderada de una pared usar los dedos para elevar los dedos subir lentamente, hacerlo hasta donde se sienta dolor, mantener el brazo en esa posición de 10 a 20 segundos.</p>		5-10
6	<p>JUNTAR-SEPARAR (ABDUCCIÓN- ADUCCIÓN) Deslizar la mano de adentro hacia fuera de manera continua. para conseguir mayor separación realice una inclinación de manera progresiva.</p>		5-10
7	<p>SEMICÍRCULO Mantener la espalda recta y fija, llevar la mano de adentro hacia fuera manteniendo el codo extendido.</p>		10
8	<p>ROTACIÓN EXTERNA DEL HOMBRO (Isométrica) Pararse con el lado involucrado contra la pared. Doblar el codo 90 grados y empujar la parte posterior de la mano hacia la pared y mantener la posición por 5 segundos y luego relajar.</p>		10

Realizado por: Autores, 2017

Fuente: <https://orthoinfo.aaos.org/>

2.1.3 Características del grupo de personas al que va dirigido

La mayor parte de la población que sufre cirugías de hombro en el Ecuador y necesita de rehabilitación física son personas de 20 a 40 años de edad. Según la investigación del crecimiento de la altura poblacional documentada en el 2016 realizado por la Organización Mundial de Salud la estatura promedio de una mujer ecuatoriana es de 154,2 cm y de un hombre es de 167,1 cm.

Dimensiones antropométricas del brazo

Mediante un estudio realizado a una muestra poblacional de trabajadores en edades entre 20 a 40 años por el Instituto de Seguro Social de la Universidad de Antioquia se determinó las dimensiones del brazo y mano. (ESTRADA, y otros, 2007)

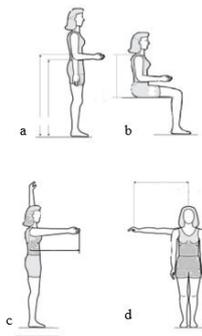


Figura 4-2: Dimensiones antropométricas

Fuente: Dimensiones antropométricas de la población Latinoamericana

En la Tabla 2-2 se encuentran las dimensiones del brazo y antebrazo de acuerdo a la estatura de la población de estudio tomada para el dimensionamiento del prototipo.

Tabla 2-2: Características de la población laboral de 20 a 39 años

Características	Dimensiones	
	Hombres	Mujeres
Peso (kg)	66.9	56.6
Estatura (cm)	170.1	159.9
Altura acromial (cm)	138.6	128
Alcance del antebrazo (cm)	71.4	65.4
Largo lateral del brazo (cm)	77.4	70.3

Realiza por: Aurtore, 2017

Fuente: (ESTRADA, y otros, 2007)

El peso del brazo es de 0,5 de la masa corporal total y las fuerzas de reacción sobre la articulación glenohumeral.

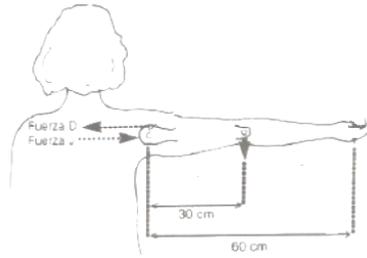


Figura 5-2: Fuerzas en el brazo

Fuente: (V.Frankel, 2001)

Las características físicas a las personas que está dirigido el estudio tienen una altura promedio de 1,60m, peso medio de 75 kg y longitud de brazo de 60cm.

Las dimensiones de la mano se representan en la siguiente figura

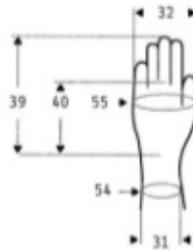


Figura 6-2: Dimensiones antropométricas de la mano

Fuente: (ESTRADA, y otros, 2007)

Tabla 3-2: Dimensiones de la mano de personas de 20-39 años

Características	Dimensiones	
	Hombres	Mujeres
Ancho de la mano (cm)	9,3	9,4
Largura de la mano (cm)	18,3	16,6
Largura palma mano (cm)	10,3	9,2

Realiza por: Autores,2017

Fuente: (ESTRADA, y otros, 2007)

2.2 Equipos de rehabilitación y fisioterapia

La rehabilitación física permite ayudar al paciente que tiene algún tipo de afección en sus funciones motoras, mediante programas especiales creados y supervisado por especialistas. Los equipos de rehabilitación de hombro son de gran importancia en la

recuperación de pacientes después de una cirugía o que han sufrido algún tipo de lesión, para lo cual se utiliza máquinas y equipos de distintos tipos como rueda de hombro, equipos de movimiento pasivo, robot de rehabilitación, equipos de ultrasonidos, equipos de rayo de magno terapia.

Rueda de hombro

Aparato mecánico de gran ayuda para el fortalecimiento de los músculos del hombro y rotación de la escapula, la rueda de hombro es un arco de acero generalmente cromada para evitar su corrosión, montado en un soporte móvil permitiendo colocarlo en la posición que se requiere, tiene una dimensión de alrededor de 90cm de diámetro.



Figura 7-2: Rueda para hombro

Fuente: <http://www.tensmexico.com>

Equipos de movimiento pasivos

Son equipos automáticos que poseen motores sincronizados de manera que permiten realizar movimientos lentos y suaves de las articulaciones del hombro, para lograr una recuperación exitosa. Existe gran variedad de este tipo de equipos en el mercado los mismos que son manejados mediante controles. Los movimientos que realiza el paciente son programados por especialistas, según el tipo de recuperación.



Figura 8-2: ARTROMOT S3

Fuente: <http://www.mundoabuelo.com>

Robots de rehabilitación

Existen muchos tipos de equipos y máquinas que se utilizan en la rehabilitación física, en los últimos años se están desarrollando nuevas investigaciones acerca del uso de robots paralelos en la industria y en el campo de la medicina por tener grandes beneficios en precisión y velocidad facilitando la realización de ciertas tareas.

Son equipos nuevos que se están probando en centros clínicos, NEREBOT (NEuroREhabilitationroBOT) es un robot paralelo usado en rehabilitación, se lo utiliza en pacientes que están en cama o sentados en la silla de ruedas. (ABBASNIJAD, 2014)

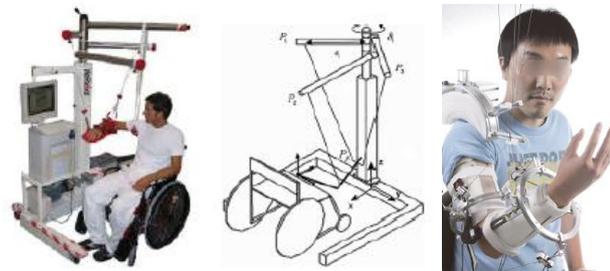


Figura 9-2: The NeReBot Y Robot CAREX

Fuente: (GOSSELIN, 2014)

La robótica está incursionando en la rehabilitación de hombro clasificándolos en tres grupos de robots: exoesqueletos, efector final o manipuladores y robots manejados por cables. (SICURI, y otros, 2014)

2.3 Robots paralelos

Son máquinas formadas por cadenas cinemáticas cerradas cuya acción final está unida a una base a través de cadenas cinemáticas seriales independientes, se los utiliza por ser livianos, rígidos, preciso y alcanzar altas velocidades, usados con mayor frecuencia en simuladores de vuelo, maquinado de piezas y transferencia de piezas de alta velocidad. (ARACIL, 2006)

El primer robot paralelo aparece en 1928 creado por Gwinnett fue un mecanismo de feria, consistía en la unión de un mecanismo con la base moviéndolo de adelante así atrás, Pollard en 1934 propone un robot paralelo de 5 GDL unido por 3 ramas usado para automatizar la pintura en spray luego de trabajar por varios años él fue patentado

por su hijo en 1942, Gough presenta una plataforma para ensayos neumáticos en 1947 mientras que Stewart para 1965 la mejorado presentando una plataforma para vuelo de 6 GDL con 3 movimientos de posición y 3 de desplazamiento mientras la tecnología avanzaba en los años 80 Clavel presenta un robot delta con 4 GDL que fueron usadas en la industria para empacadoras.

Por su configuración, este tipo de robots son utilizados con mucha frecuencia de manera estática en la rehabilitación física, en montaje y ensamblaje de piezas, en la actualidad varias universidades del mundo se enfocando en desarrollar, nueva tecnología usando este tipo de robots, Toyota trata de crear robots de rehabilitación móviles para extremidades inferiores, la mayor parte de robots se utilizan para la producción en serie de industrias debido a su precisión.



Figura 10-2: Robot paralelo-quattro

Fuente: www.vinssa.com

Los robots paralelos según su movimiento pueden ser planares y espaciales

- Robot Planar. -Su efector final posee tres grados de libertad, dos movimientos de traslación en el plano y una de rotación en el eje perpendicular al plano, las cadenas se encuentran unidas a un actuador final pueden ser accionados por actuadores lineales o rotatorios.
- Robot espacial. “El movimiento se realiza en un espacio tridimensional, pudiendo tener hasta seis grados de libertad (tres traslaciones y tres rotaciones).” (VIVAS, 2007)

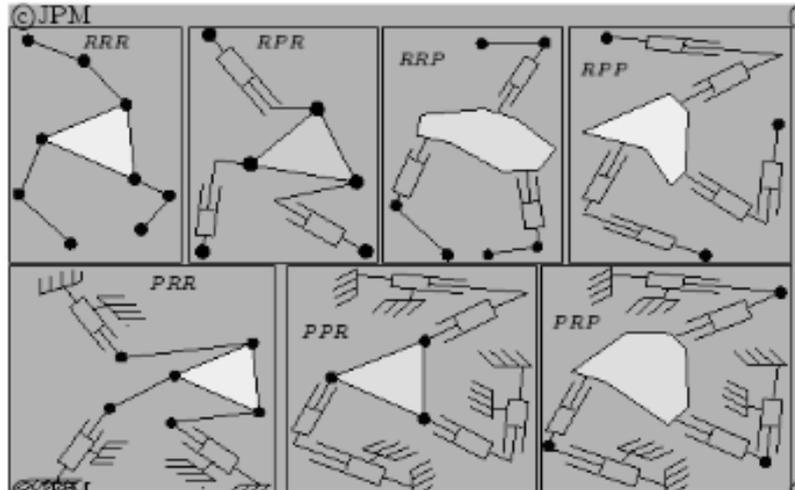


Figura 11-2: Robot paralelo Planar de 3 grados de libertad

Fuente: http://www.unicauca.edu.co/ai/publicaciones/ISAShow_Vivas.pdf

2.3.1 Tipos de robot paralelos

2.3.1.1 Robot paralelo tipo delta

Robot cuya plataforma fija tiene forma de un triángulo equilátero el mismo que está unido a una plataforma móvil mediante 3 cadenas cinemática que son movidas a través de motores que se encuentran en la base fija transmitiendo el movimiento a la plataforma móvil, el robot tipo delta puede ser de 3 o 4 grados de libertad para el de 4 GDL se le añade un giro al efector final. Se usa generalmente en la industria alimenticia, por su sencillez, por lo que es uno de los robots manipuladores más comercializados. (PEDRAZA, y otros, 2015)

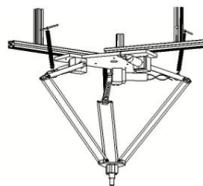


Figura 12-2: Robot Delta

Fuente: <http://www.mecamex.net/anterior/cong06/articulos/60742final.pdf>

2.3.1.2 Robot paralelo conducido por cables

Son mecanismos con la misma configuración de un robot paralelo convencional es decir está compuesta por una parte estructural fija unidas a un actuador final, donde sus

brazos rígidos fueron remplazados por cables, en sus extremos se encuentra un motor donde se enrollan para dar el posicionamiento y orientación que se desea en el efector final. Este tipo de robot son ligeros, seguros y económicos de fabricar, debido a que poseen estructura más sencilla, aumentando la capacidad para soportar pesos mayores que el suyo propio. (AUFFRAY, 2016)

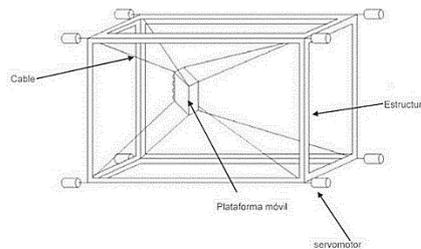


Figura 13-2: Componentes principales de una estructura guiada por cables

Fuente:<http://www.interempresas.net/MetalMecanica/Articulos/144648-Validacion-prototipo-robot-cables-CoGiRo-tareas-manipulacion-ensamblaje-piezas-complejas.html>

La robótica controlada por cable empezó a desarrollarse en la década de los años 70. El centro de investigación Tecnalía lleva alrededor de 17 años desarrollando la cinemática por cables. Varias universidades, laboratorios y centros de investigación como: El Centro Tecnológico y Científico INRIA (Fr), Laboratorio de Informática, Robótica y Microelectrónica de Montpellier, la Universidad de Düisburg-Essen (D) y el IPA-Fraunhofer comenzaron a construir prototipos de robots manipulados por cables obteniendo excelentes resultados, hoy en día tratan de incorporar el robot accionado por cables en la industria gracias a que puede ser manejado en amplias áreas de trabajo e incrementado grandes cargas de trabajo. (TAVOLEIRI, 2008)

Actualmente no se encuentran en comercialización este tipo de robots, sin embargo, se puede obtener varios prototipos desarrollados por centros de investigación y universidades europeas. Se espera que los próximos años se los puedan encontrar en el mercado como robots industriales, Tecnalía se encuentra desarrollando 3 tipos de robot ReelAx6, ReelAx8, CoGiRo. (RODRIGUEZ, y otros, 2015)

- INRIA: Desarrolla robots para terapias de rehabilitación y rescate de personas que han sufrido accidentes, estudiados por Marinet
- Fraunhofer IPA: Desarrolla robots manipulado por cables montados a estructuras fijas, su sistema de cables esta conectados desde su parte superior a

inferior de la estructura con una capacidad de carga inferiores a 100 kg, son desarrollados por Ipanema

- Universidad DUISBURG-Essen. Estos robots intentan mantener una pieza en suspensión en un túnel de viento y un prototipo de almacén automático vertical (RODRIGUEZ, y otros, 2015).

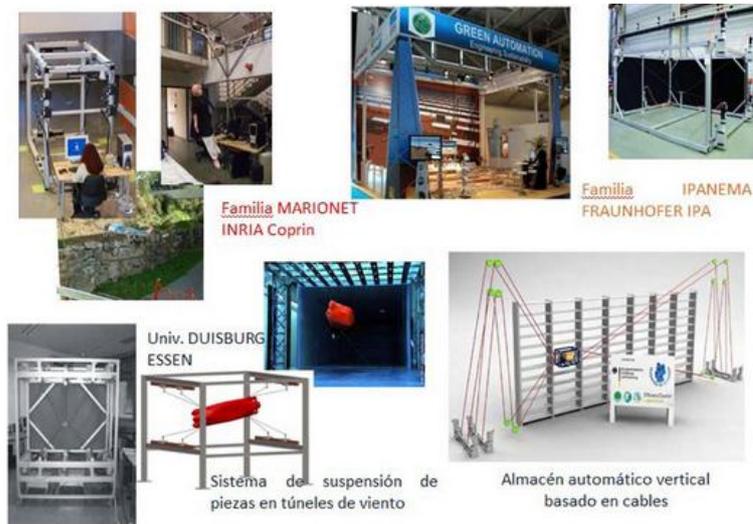


Figura 14-2: CDPRs

Fuente:(TAVOLEIRI, 2008)

Robot paralelo por cables de 3 grados de libertad

El robot paralelo de tres grados de libertad CDPR (Cable Driven Parallel Robot) permite el movimiento en dos direcciones y giro alrededor de un eje, son robots planares conectados por cuatro cables a una plataforma móvil y los cables a motores para realizar el movimiento deseado dependiendo el tipo de tarea a realizar. (RODRIGUEZ, y otros, 2015)

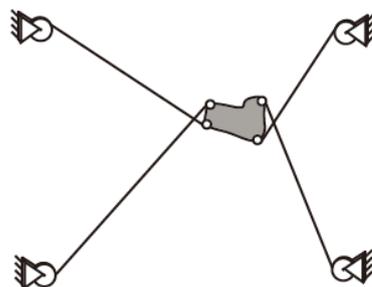


Figura 15-2: Robot manipulado por cables

Fuente: (DOMINGUEZ, 2014)

Cinemática

La cinemática pretende estudiar el movimiento de un robot en función del tiempo sin tomar en cuentas las fuerzas que actúan sobre el mismo, su análisis se realiza a partir de un punto de referencia hacia el efector final, el modelado de un robot no sigue una metodología, sin embargo, se realiza en base a los tipos Delta y Stewart. Un robot puede ser analizado mediante cinemática directa e inversa, generalmente un robot paralelo se analiza mediante cinemática inversa. (JARAMILLO, 2010)

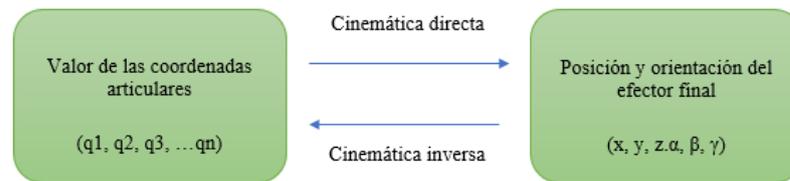


Figura 16-2: Tipos de cinemática

Fuente: Autores

Cinemática directa

La cinemática directa en un robot paralelo encuentra la orientación y posición del efector final en el espacio de trabajo, partiendo de las coordenadas articulares de cada cadena cinemática que lo conforman. Para encontrar los valores de la cinemática directa se usan métodos iterativos y polinomiales con la ayuda del algebra vectorial y matricial. (LÓPEZ, 2014)

El método de Denavit-Hartenberg (D-H) es de gran importancia para poder realizar la cinemática directa. Se basa en la obtención de una matriz homogénea.

$$T = \begin{bmatrix} R_{3 \times 3} & r_{3 \times 3} \\ f_{1 \times 3} & 1 \times 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Matriz de rotación} & \text{Matriz de posición} \\ \text{Matriz de perspectiva} & \text{Escala} \end{bmatrix} \quad (1)$$

La matriz es utilizada en la representación de cada una de los eslabones que conforman las cadenas cinemáticas de un robot paralelo.

$$A_i = T_{z,d} T_{z,\theta} T_{x,a} T_{z,\alpha} = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\cos\alpha_i \sin\theta_i & \sin\alpha_i \sin\theta_i & \alpha_i \cos\theta_i \\ \sin\theta_i & \cos\alpha_i \cos\theta_i & -\sin\alpha_i \cos\theta_i & \alpha_i \sin\theta_i \\ 0 & \sin\alpha_i & \cos\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Cinemática inversa

La cinemática inversa trata de hallar las coordenadas articulares de cada cadena cinemática que es parte de un robot paralelo, partiendo de la posición y orientación del efector final. La cinemática inversa se puede desarrollar mediante el método geométrico y analítico, la gran parte de robots paralelos poseen cadenas cinemáticas simples hasta 3 grados de libertad porque se facilita su cálculo.

El análisis cinemático de un robot manipulado por cables Planar se lo realiza mediante cinemática inversa, conociendo la posición y orientación del efector final, logrando obtener las variables articulares L y α .

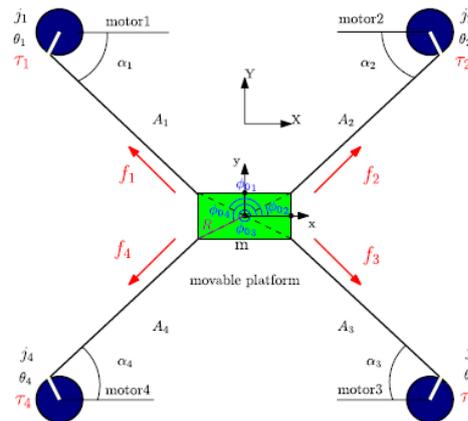


Figura 17-2: Robot manipulado por cables de 3GDL

Fuente: (ABBASNIJAD, 2014)

Dinámica

La dinámica de un robot paralelo establece las fuerzas y torques que actúan en cada articulación determinando las dimensiones de los actuadores, la ecuación dinámica puede ser obtenida mediante el método de Newton Euler y la matriz Jacobiana despreciando las masas de los cables. (HERNÁNDEZ, 2016)

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = T$$

$$\begin{bmatrix} mI_{3x3} & 0_{3x3} \\ 0_{3x3} & I_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{p} \\ \dot{w} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0_{3x1} \\ wxI_{pw} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -mg \\ 0_{3x1} \end{bmatrix} = -\tilde{f}\tilde{\tau} \quad (3)$$

Matriz Jacobiana

De acuerdo con (GOSSELIN, y otros, 1990) el Jacobiano de un manipulador, es la relación de un vector de entrada θ , las articulaciones activas y un vector x m-dimensional que corresponden a las coordenadas de la plataforma móvil. La relación está representada por:

$$F(\theta, x) = 0 \quad (4)$$

Donde \mathbf{F} es una función implícita n-dimensional de $\boldsymbol{\theta}$ y \mathbf{X} mientras que $\mathbf{0}$ es el vector cero dimensional de n-dimensiones. Al diferenciar la ecuación (4) respecto al tiempo se obtiene las velocidades de entrada y de salida:

$$\dot{\theta} = Jv$$

Donde $\boldsymbol{\theta}$ es el vector de velocidad de las articulaciones activas, \mathbf{J} es la matriz jacobiana y v el vector velocidades lineales y angulares de efector final.

El estudio dinámico de un robot paralelo manipulado por cables se lo realiza mediante el análisis de dos subsistemas: subsistemas de actuadores y del efector final, debido a que se desprecia el peso de los cables. Determinando la fuerza en los cables y el torque de los actuadores.

Materiales de robots paralelos

Los robots paralelos son construidos con materiales livianos y de gran resistencia ayudando así que funcionen con mayor facilidad, un robot manipulado por cables está formado por una parte fija y otra móvil, la plataforma fija se lo construye con perfiles de acero inoxidable y aluminio, la plataforma móvil elaborada con materiales de baja densidad.

Aluminio

Es un metal no ferroso de presencia abundante en la corteza terrestre, sus propiedades mecánicas en estado puro son moderadas, gracias a su ligereza y amplias aptitudes de

conformación se lo utiliza frecuentemente en la industria. Las propiedades mecánicas de las aleaciones de aluminio son: aumento de resistencia mecánica, alta conductividad térmica y eléctrica, buena resistencia a la corrosión por lo que es usado en la industria automovilística y aeronáutica. Hoy en día aluminio está siendo remplazado por polímeros con características similares al aluminio. (GROOVER, 1997)

Acero inoxidable

Se lo usa con mayor frecuencia en la industria alimenticia, sus principales ventajas son:

- Alta resistencia a la oxidación debido a su gran contenido de cromo
- Alta resistencia y ductilidad a bajas temperaturas
- Alta resistencia a la corrosión
- Soporta altas temperaturas

El peso del acero inoxidable es mayor al del aluminio por lo que aumenta el peso de la construcción de robots paralelos, sin embargo, un robot paralelo permanece estable en su lugar de trabajo por lo que se lo construye en acero, lo primordial es que la plataforma móvil tenga un bajo peso para no generar carga en el momento del movimiento. (GROOVER, 1997)

Las características mecánicas del acero y aluminio son diferentes por lo que para su uso se debe considerar su aplicación, las características principales a considerar son su peso, costo y resistencia.

Tabla 4-2: Propiedades de acero y aluminio

Propiedades mecánicas	Aluminio	Acero
Resistencia a la tracción (N/cm ²)	1,2	3,5 - 4,1
Límite Elástico (N/cm ²)	1	2,3
Módulo de elasticidad (N/cm ²)	650	2 000
Alargamiento (%)	11	25-37
Dureza (HB)	15	50-67
Conductividad Térmica (W/m K)	235	58

Realizado por: Autores, 2018

Fuente: Elementos metálicos y sintéticos pg. 36

La mayor parte de robots paralelos son construidos con aleaciones de aluminio por su ligereza ayudan a disminuir la carga en el momento de su uso, presenta un buen comportamiento frente a la corrosión sin embargo es difícil de reparar.

Descripción de componentes

Un robot paralelo está constituido por componentes mecánicos y electrónicos complementados de manera que faciliten el funcionamiento del prototipo.

Componentes mecánicos:

- Cables
- Sistema de recolección de cable y transmisión de movimiento.
- Sistema de elevación

Componentes electrónicos

- Placas de programación
- Motores
- Drivers
- Demás componentes necesarios para conexión

Los componentes mecánicos facilitan el movimiento del prototipo y los componentes electrónicos el control de los diferentes movimientos.

Componentes mecánicos

Cable de acero

Es un cable mecánico constituido por un conjunto de alambres enrollados de manera helicoidal de modo que forman una cuerda con gran resistencia a esfuerzos de tracción. Conformado por tres componentes: alambres del cordón, cordones y alma. Las características de un cable cambian de acuerdo al diseño de los cordones, variando su resistencia a la fatiga y resistencia a la abrasión. Un cable de acero por el modo que está constituido proporciona poca flexibilidad y resistencia a la flexión. (IPH, 2015)

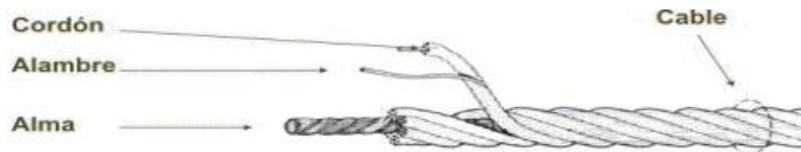


Figura 18-2: Componentes de un cable de acero

Fuente: www.gama.fime.uanl.com

Hilos de nylon

El nylon es un polímero constituido por poliamidas alifáticas que proporcionan al hilo altas resistencia mecánica capaz de soportar pesos de hasta 95 Kg. Es utilizado por su durabilidad, flexibilidad, coeficiente de fricción bajo, relación resistencia/peso, resistencia a impactos, abrasión y corrosión sin embargo no es recomendable utilizarlo en temperaturas mayores 80 °C. (GROOVER, 1997)

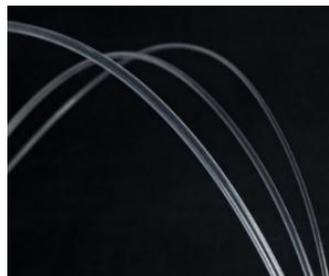


Figura 19-2: Hilo de nylon

Fuente. - www.mwmaterialsworld.com

Por excelentes características se los utiliza en prototipados funcionales, modelado industrial, actividades deportivas etc. El hilo nylon presenta gran variedad de diámetros y longitudes dependiendo de su fabricante.

Tabla 5-2: Propiedades del acero y nylon

Propiedades	Acero	Nylon
Resistencia a la tracción (MPa)	27,9	78
Rigidez (kg/cm ²)	2,03	0,05
Densidad g/cm ³	7,8	1,14
Resistencia/peso (acero)	1	1.8
Rigidez/peso (acero)	1	0,2
Coeficiente de fricción		0,2-0.3

Fuente: Reséndiz ,2005

Realizado por: Autores, 2017

Sistema de recolección de cuerdas

Los sistemas de recolección de cable evitan que el cable se enrolle de tal manera que se encuentre en la misma posición existen 2 tipos:

- Por compensador de ángulo de flotación
- Bobinadoras de nivel

Por compensador de ángulo. Conduce la cuerda por una polea a cierto ángulo logrando que el cable se enrolle y desenrolle en el tambor oscilando lentamente de adelante hacia atrás del eje manteniendo el ángulo de flotación adecuado. El mecanismo está formado por una polea, eje y tambor.



Figura 20-2: Sistema de compensador de ángulo

Fuente: www.marinersrepository.com

Bobinadoras de nivel. Son piezas sofisticadas, accionadas hidráulica y eléctricamente mediante un computador, pero también existen bobinadoras de nivel mecánicas. Este mecanismo está comprendido por un eje principal (tornillo de avance), dos barras de rodillo verticales, un rodillo horizontal y una polea de direccionamiento. Posee una conexión entre el tambor y eje de avance mediante un sistema de transmisión. Su funcionamiento consiste en que cuando el tambor comience a girar también lo haga el eje de avance de tal manera que la cuerda se vaya enrollando de modo correcto en el tambor.



Figura 21-2: Bobinadora de nivel

Fuente: www.marinersrepository.com

Los componentes semejantes en los sistemas de recolección son polea y tambor.

Polea

Dispositivo mecánico utilizado para transmitir fuerza cambiando su dirección, pero no su valor, las dimensiones de una polea para cables depende de su diámetro.

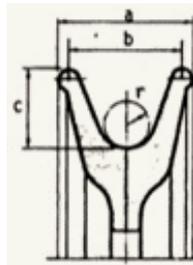


Figura 22-2: Apoyo en la garganta de la polea

Fuente: (KHURMI, y otros, 2005)

La profundidad de la garganta es de 2-3 veces el diámetro del cable, el diámetro de garganta es 5% mayor que el diámetro del cable, el ángulo de apertura entre los flancos de la garganta debe estar comprendido entre 30° a 60° . (MÉNDEZ, 2006)

Tambor

Dispositivo mecánico utilizado en un sistema por cables, sus dimensiones dependen del diámetro de cable, para evitar que el desgaste de las poleas y cables sea elevado se recomienda que el ángulo de desviación en tambores lisos sea de 1° a 2° y para tambores acanalados de 2 a 4° . (MÉNDEZ, 2006)

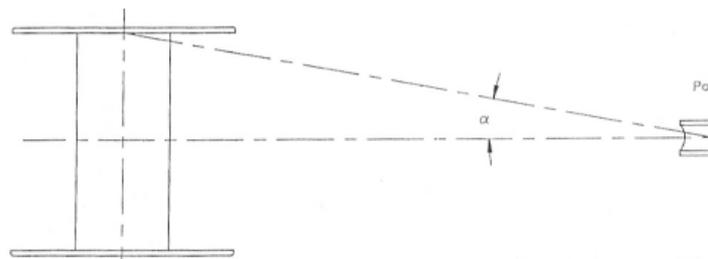


Figura 23-2: Esquema del Tambor

Fuente: www.quieroapuntes.com/cables-de-acero.html

Un tambor tiene las siguientes partes que se consideran en su diseño:

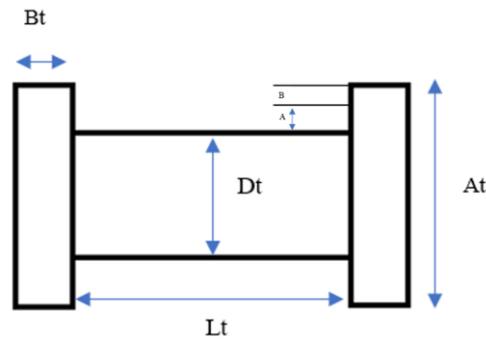


Figura 24-2: Dimensiones del tambor

Fuente: Autores

L_t es la Longitud del tambor, D_t Diámetro del tambor, A Profundidad de capas del tambor. Para tambores lisos es igual diámetro del cable por el número de vueltas de enrollamiento, B Claro de seguridad entre el cable y borde del carrete. Es recomendable que debe ser mínimo al diámetro del cable, B_t Ala del tambor. Se recomienda un diámetro del cable.

Sistema de transmisión

Por correas

Las correas son consideradas elementos mecánicos flexibles, se usan para la transmisión de potencia entre dos ejes que por lo general son paralelos tomando en cuenta, considerando que su relación de transmisión no es exactamente igual a la velocidad de puesto que por la presencia del deslizamiento de las correas estas varían dependiendo de la velocidad de rotación como del torque transmitido. Con la ventaja de poder absorber las vibraciones se impactos que puedan presentarse durante la transmisión. (FLORES, 2012)

Por cadenas

La transmisión por cadenas está constituida por dos ruedas dentadas y una cadena. Es un sistema empleado para transmitir movimiento giratorio y torque de un eje a otro normalmente paralelos este tipo de trasmisiones son usadas generalmente para

aplicaciones de grandes distancias entre ejes, bajas velocidades y grandes torques.
(Myzca, 2012)

Por Engranés.

La transmisión por engranes es un mecanismo usado para transmitir el movimiento giratorio de un eje a otro, aumentar o disminuir velocidades o cambiar el sentido de giro en un eje. Está constituida por dos ruedas dentadas conocidas como piñón y engrane. Entre los engranajes más utilizados se tiene a los engranajes rectos.

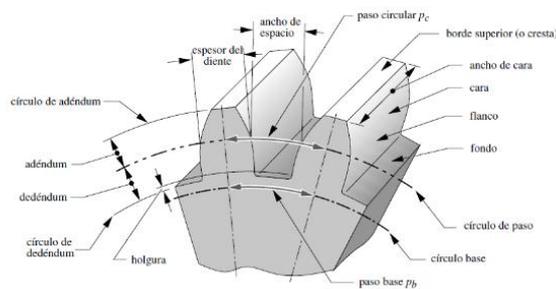


Figura 25-2: Nomenclatura de un engrane recto

Fuente: (NORTON, 2011)

Diseño de engranes plásticos.

El diseño de engranes plástico según (MOTT, 2006) sigue el siguiente procedimiento:

- Determinar la potencia requerida, a transmitir velocidad de giro del piñón en rpm.
- Especificar el número de dientes y proponer un paso diametral del piñón.
- Calculo del diámetro del piñón.
- Calcular la carga transmitida.
- Especificar la forma del diente y determinar el factor de Lewis.
- Especificar el factor de seguridad.
- Especificar el material a utilizar.
- Determinar el ancho de cara.

Componentes electrónicos.

Entre los componentes que forman parte de un robot paralelo están motores paso a paso o servomotores, placas de programación, drivers entre otros. Estos componentes son capaces de controlar el movimiento del sistema. El prototipo debe realizar tres tipos de movimiento traslación en dos ejes y rotación en otro.

Servomotor. Un motor de Corriente Directa que es capaz de controlar y mantener de manera estable la posición dentro de un rango de operación. Es de gran uso en la robótica gracias a su precisión de posicionamiento, altas velocidades de respuesta y control de torque. (CANDELAS, 2007)

Un servo motor está constituido por: un motor eléctrico, sistema de control y un potenciómetro.

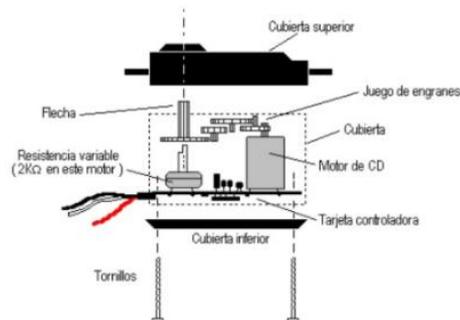


Figura 26-2: Partes de un servomotor

Fuente: www.areatecnologia.com

Las características principales son:

- Torque. El consumo de corriente es proporcional al valor del mismo.
- Velocidad. -Tiene grandes velocidades angulares

Motor paso a paso

Es un motor que convierte un tren de impulsos en un movimiento angular, mientras más pequeño el paso presenta mayor precisión. Son utilizados para mecanismos de gran precisión, bajas velocidades y capaces de trabajar en lazo abierto pueden ser unipolares y bipolares (LAJARA, 2007)



Figura 27-2: Motor Paso a paso

Fuente: www.areatecnologia.com

Unipolares. Poseen 6 o 5 cables de salida, su control es simple. Son activadas de manera directa por un microcontrolador.

Bipolares. Posee cuatro cables de salida, para su control se requiere un puente h que facilita el cambio de dirección del flujo de corriente a las bobinas de secuencia.

El movimiento de ambos tipos de motores paso a paso es controlado mediante una serie de secuencia.

Placas de programación

Existen gran variedad de placas de programación en el mercado sin embargo para obtener un control adecuado en los motores destacan 3 placas comerciales.

Tabla 6-2: Placas de programación

Dispositivos	Arduino mega	MY RIO	Raspberry Pi
Fabricante	Arduino	National Instrument	Fundación Raspberry Pi 3 B
Unidad de procesamiento	Atmega2560 (Microcontrolador)	Xilinx Z-7010	Broadcom BCM2837-Cortes-A53
Voltaje de entrada	7-12 V	6-16V	5,1 -12V
Pines de entrada análoga	16	8	6
Pines de entradas y salida análogas	54	40	40
Frecuencia de trabajo	16 MHz	667 MHz	1,4 GHz
Comunicación	USB	USB+ wifi	USB, wifi o Bluetooth

Software de Programación	Arduino	LABVIEW	Java, Ruby, Python
			

Fuente: Reséndiz, 2005

Realizado por: Autores, 2017

Metodología y herramientas para el diseño

El diseño de un robot manipulado por cable toma en cuenta aspectos importantes que ayudan en el desarrollo del prototipo.

La metodología de diseño es el estudio de métodos utilizado para el desarrollo de las actividades de diseño respondiendo a dos cuestiones principales: a) ¿Qué hacer? Las metodologías descriptivas de diseño donde se manifiesta los métodos utilizados por el diseñador para el diseño, b) ¿Cómo hacer? Son metodologías prescriptivas de diseño donde mediante un análisis descriptivo de opiniones sugiere métodos para la solución de problemas. (RIBA, 2002)

2.3.2 *Diseño mecánico*

El diseño es un proceso iterativo para determina el modo de resolver un problema o satisfacer una necesidad. El diseño mecánico relaciona áreas de mecánica de fluidos, solidos transferencia de masas, procesos de manufactura, teoría eléctrica con la producción y procesamiento de energía. (BUDYNAS, 2008)

El diseño es un conjunto de actividades con el fin de definir un producto satisfaciendo las necesidades que se presentaron. El resultado final se expresa mediante dibujos técnicos en un documento. (RIBA, 2002)

2.3.3 *Fases de diseño*

Es un proceso iterativo de manera de conseguir un plan para desarrollar un producto que satisface una necesidad. De acuerdo con la naturaleza de diseño, algunas fases pueden repetirse durante la vida del producto. El proceso de diseño comienza identificando la

requiere para el mismo; esta actividad se lleva a cabo por medio del desarrollo de la función de calidad QFD. (RIBA, 2002)



Figura 29-2: Esquema de la casa de calidad

Fuente: (RIBA, 2002)

Diseño conceptual

Etapa de gran relevancia en el diseño mecánico, porque es donde se plantean las diferentes alternativas de solución, que luego de analizarlas y evaluarlas se determina una solución óptima.

Diseño de materialización

Determinada la solución se materializa a través de un conjunto de elementos, piezas enlances, componentes y uniones desarrolladas de manera organizada que serán elaboradas a través de materiales, formas, dimensiones y acabados superficiales. El resultado se lo representa en planos de conjunto donde se encuentran las dimensiones, partes y piezas que conforman el producto.

Diseño de detalle

Es la etapa final del diseño donde el producto se encuentra detallada en planos de conjunto y memoria anexa de manera que el prototipo pueda ser fabricada. En los planos de conjuntos se especifica dimensiones, materiales y características técnicas para la fabricación.

2.3.5 Software a utilizar en el diseño del robot paralelo manejado por cables

Los softwares empleados en el diseño de robot paralelo manipulado por cables son: MATLAB, SOLIDWORKS, AUTOCAD, LabVIEW Y SAP200.

MATLAB. Es un software matemático que permite realizar un cálculo vectorial. Se lo empleara para la solución de las ecuaciones del modelo cinemático y dinámico.

SOLIDWORKS. Es un software CAD usado para el modelado en 2D y 3D, permitiendo realizar piezas y componentes que conforman un equipo. Se lo empleara en el modelado de cada uno de las piezas que conforman el prototipo y en la realización de los planos de detalle usados en su fabricación.

AUTOCAD. Es un software CAD modelado en 2D y 3D, permite la realización de planos. Selo empleara en la realización de planos de piezas del equipo y representaciones graficas de ciertos detalles.

LABVIEW. es un software de ingeniería diseñado para aplicaciones en las que se requieren pruebas, medidas y control con acceso rápido a información de datos y hardware. La programación se realiza con un lenguaje de programación visual gráfico.

SAP2000. Es un programa que mediante el uso de elementos finitos y un interfaz gráfico 3D aplicado a objetos es capaz de realizar, de forma totalmente integrada, la modelación, análisis y dimensionamiento de la mayoría de problemas de ingeniería de estructuras.

El uso de estas herramientas para el diseño del prototipo de robot paralelo se dio puesto que cada una de ellas son útiles en cierto aspecto del desarrollo del presente trabajo; a pesar de la existencia de otros programas con características similares, se utiliza los

softwares descritos anteriormente debido por su facilidad de uso y porque se ha recibido capacitación acerca de los mismos.

CAPÍTULO III

3. ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS

En el presente capítulo se realizó un análisis entre las posibles alternativas de diseño para solucionar el problema planteado, siendo necesario definir la metodología de diseño; el diseño conceptual y el análisis de alternativas para la construcción del robot paralelo manipulado por cables para rehabilitación parcial de hombro.

METODOLOGÍA DE DISEÑO

Para el desarrollo del robot paralelo manipulado por cables para rehabilitación parcial de hombro se siguió un proceso con 4 etapas, las mismas que se mencionan a continuación: (RIBA, 2002).

- Etapa 1: Definición del producto
- Etapa 2: Diseño conceptual
- Etapa 3: Diseño de materialización
- Etapa 4: Diseño de detalle.

3.1 DEFINICIÓN DEL PRODUCTO

3.1.1 *Definición Del Problema*

Los pacientes que han sufrido algún tipo de lesión de hombro y acuden a centros médicos por sesiones de rehabilitación física, en su mayor parte de tiempo no pueden acceder a tratamientos de rehabilitación adecuada debido a que los equipos existentes para rehabilitación física son obsoletos, por tener mecanismos rígidos que no se pueden ajustar a las necesidades de cada individuo además de necesitar personal capacitado para utilizarlos; la adquisición de equipos o robots para rehabilitación física de última tecnología significa inversiones de grandes cantidades de dinero por lo que el desarrollo

de un prototipo de robot que se pueda usar para rehabilitación física a un costo menor implicaría que los centros médicos puedan adquirirlos y brindar un tratamiento completo a la población que acude a sus instalaciones.

3.1.2 Necesidades del cliente.

Tabla 1-3: Requerimientos del equipo

DESCRIPCIÓN	REQUERIMIENTOS
Función	<ul style="list-style-type: none"> - Realizar movimientos que ayuden a la rehabilitación de un hombro - Velocidad de movimiento adecuada para cada ejercicio - Usado por cualquier persona
Dimensiones	<ul style="list-style-type: none"> - Que pueda instalarse dentro de un consultorio médico
Movimientos	<ul style="list-style-type: none"> - Traslación en los ejes (x, y) - Rotación alrededor del eje z (perpendicular al plano xy)
Fuerzas	<ul style="list-style-type: none"> - La fuerza motora será proporcionada por motores
Energía	<ul style="list-style-type: none"> - Que pueda enchufarse a un tomacorriente de 110 V
Materiales	<ul style="list-style-type: none"> - Para la construcción se deben usar materiales livianos y resistentes.
Señales y control	<ul style="list-style-type: none"> - Detener el equipo en el instante requerido - Se debe poder controlar los movimientos del robot
Fabricación y montaje	<ul style="list-style-type: none"> - Los elementos de la estructura deben ser fabricados con tecnología existente en el país para facilitar su reproducción. - Facilidad de montaje y desmontaje para reemplazo de elementos.
Vida útil y mantenimiento	<ul style="list-style-type: none"> - Debe contar con facilidades necesarias para realizar los procesos de mantenimiento de los elementos.
Costos	<ul style="list-style-type: none"> - El costo de fabricación del prototipo debe ser menor que el costo de un equipo comercial con características similares.
Seguridad y ergonomía	<ul style="list-style-type: none"> - Debe proporcionar seguridad para el paciente - Debe requerir operaciones mínimas para el manejo y programación de ejercicios por parte del usuario.
Impacto ambiental	<ul style="list-style-type: none"> - Su funcionamiento debe ser sostenible y amigable con el ambiente.

Realizado por: Autores, 2018

Fuente: Ft. Leonardo Procel (Centro de rehabilitación física del Club de Leones. Ambato)

3.1.3 *Desarrollo de la función de calidad*

El desarrollo de la función de calidad o QFD (Quality Function Deployment) tiene por objetivo principal asegurar que en la definición del producto se considere las necesidades del usuario. El desarrollo se da mediante las siguientes fases. (RIBA, 2002)

Planificación del producto

- Despliegue de componentes.
- Planificación del proceso
- Planificación de la producción

La casa de la calidad

Es una herramienta que ayudó a la traducción de los requerimientos o demandas presentadas por el cliente en especificaciones técnicas del producto, para su obtención se siguieron las siguientes 6 fases:

- Voz del usuario.
- Análisis de competitividad.
- Voz del ingeniero.
- Correlaciones.
- Comparación técnica.

Compromisos técnicos.

Voz del usuario. En esta fase se tomaron en cuenta los requerimientos y necesidades del usuario, los mismos se agruparon por categorías, Tabla 1-3 entre estas demandas se deben reconocer tres tipos diferentes.

- Demandas básicas. Aquellas que el usuario no las exige por ser obvias, pero en su ausencia el usuario se siente insatisfecho.
- Demandas unidimensionales. Al mejorar estas demandas aumenta la satisfacción del usuario.
- Demandas estimulantes. Son las demandas que diferencian el producto de la competencia y en su ausencia no producen insatisfacción del usuario.

Las características del equipo según los requerimientos del usuario son los siguientes:

- Movimientos de rehabilitación adecuados.

- Dimensiones del equipo
- Velocidad adecuada
- Movimiento planar
- Útil para diferente tipo de personas
- Conexión a un tomacorriente
- Resistente
- Paro inmediato
- Fácil operación
- Comodidad para el paciente
- Bajo costo

Voz del ingeniero. Determina de forma técnica los requerimientos especificados por el usuario, para el desarrollo de nuestro equipo tenemos las siguientes características:

- Rango de movimiento
- Volumen del equipo
- Velocidades máximo de desplazamiento
- Grados de libertad
- Carga máxima
- Función con energía eléctrica
- Peso máximo del actuador
- Modos de funcionamiento
- Nivel de automatización
- Ergonomía y confort
- Costo máximo

Análisis de la matriz QFD. En la evaluación de competencia de la matriz QFD, la columna A evalúa el cumplimiento del producto de nuestra empresa, en las columnas B y C se evalúa el cumplimiento del producto con relación a otras empresas existentes en el mercado encargadas de realizar equipos de rehabilitación, con características similares en la columna D relaciona la demanda y los objetivos a desarrollarse. (RIBA, 2002)

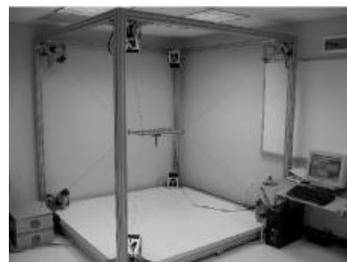
Tabla 2-3: Ficha técnica competencia 1

Descripción Física:	Equipo de rehabilitación para hombro de 3 GDL manipulado por cables, manejado por un computador, los movimientos son controlados por 3 motores eléctricos, tiene un soporte para el brazo, el paciente puede ser tratado usando una silla de ruedas o una cama de hospital.		
Nombre del equipo:	NeoRobot		
Modelo:	Único		
Año:	2007		
Desarrollado:	Grupo de investigacion REHABROTIC.IT	Ubicación:	Italia
Descripciones específicas <ul style="list-style-type: none"> ➤ Equipo eléctrico ➤ Tiene 3 Grados de libertad ➤ Uso para personas hasta de 80Kgy altura de 1,75cm ➤ Posee 3 motores; Cada motor tiene un encoder que incrementa la velocidad de 1000ppr ➤ Usan cuerdas de Nylon ➤ Máxima velocidad en los cables de 100 mm/s ➤ Posee un marco en forma de C con ruedas omnidireccionales ➤ Sección cuadrada fija en la parte central de la base. ➤ Brazos huecos de aluminio en la parte superior de sección redonda 			

Realizado por: Autores;2018

Tabla 3-3: Ficha técnica competencia 2

Descripción Física:	Equipo de rehabilitación para hombro de 6 GDL manipulado conectado por 8 cables a un efector final, manejado por un computador, los movimientos son controlados por 8 motores eléctricos montados en una estructura cubica de aluminio.		
Nombre del equipo:	MACARM		
Modelo:	Único		
Año:	2005		
Desarrollado:	IAI	Ubicación:	Chicago-USA
Descripciones específicas	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Equipo eléctrico ➤ Tiene 6 Grados de libertad ➤ Uso para personas hasta de 75Kgy altura de 1,75cm ➤ Posee 8 motores paso a paso; tarjeta PCI de control para motor de 8 ejes ➤ Usan 8 bobinas de cable que pasan por un pasa cables ➤ Dimensiones del efecto final es un prisma rectangular de 0,51x0,33x0,05m ➤ Espacio de trabajo aproximadamente 1.4x1.6x2m 		



Realizado por: Autores; 2018

El índice de mejora se lo encuentra en la columna E y se lo determina por la siguiente expresión según (RIBA, 2002)

$$\text{Índice de mejora} = \frac{\text{Objetivos}}{\text{Propia empresa}} \quad (5)$$

La ponderación determina por la ecuación:

$$\text{Ponderación} = \text{Índice de mejora} * \text{factor de venta} * \text{importancia} \quad (6)$$

La incidencia está determinada por la siguiente expresión:

$$\text{Incidencia} = \Sigma * \text{Ponderación} \quad (7)$$

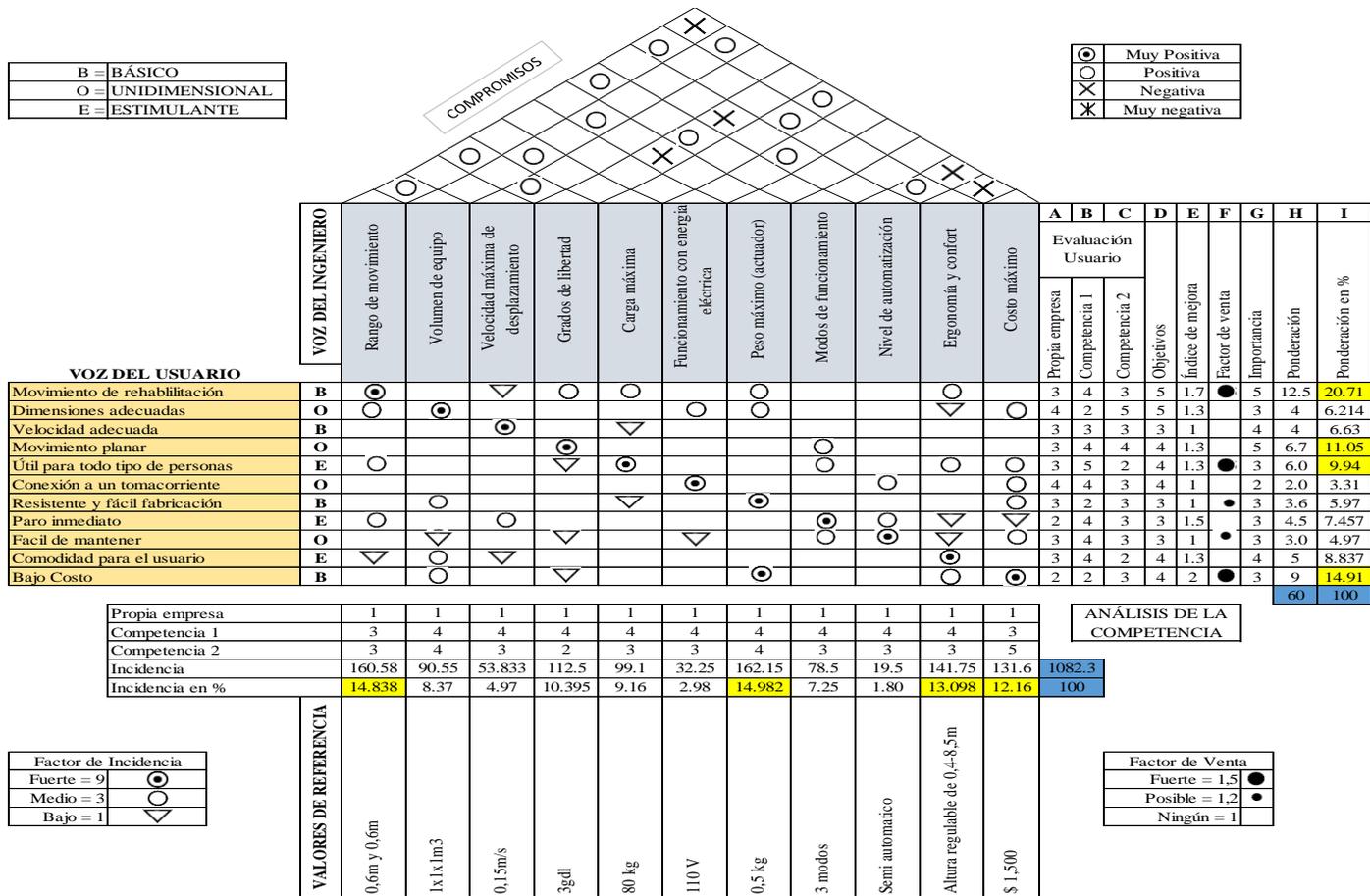


Figura 1-3: Casa de la calidad

Fuente: Autores

Conclusiones de la matriz QFD. El análisis realizado a la matriz QFD, de la voz del usuario, la voz del ingeniero, la competencia se determina las siguientes características técnicas:

- Rangos de movimiento
- Movimiento planar
- Peso del actuador
- Ergonomía y confort

3.1.4 Especificaciones del producto

El resultado del análisis de la casa de la calidad nos permite definir el producto y establecer de manera eficaz las características técnicas que este requiere para el diseño de del prototipo.

En la tabla 4-3 se muestran las especificaciones técnicas que debe cumplir el prototipo, los cuales son tomadas del análisis de características de las personas a realizar los ejercicios de rehabilitación después de una cirugía y varios parámetros que se considera importante para su desarrollo.

Tabla 4-3: Especificaciones técnicas del prototipo

Empresa cliente: Usuario		Producto: Robot paralelo manipulado por cables		Fecha inicial: 2017-06-01
				Última versión: 2018-05-25
Diseñadores: Paulina Moreta Jorge Pilco				Página 1
Especificaciones				
Concepto	Fecha	Propone	R/D	Descripción
Función		D	R	Rango de movimiento (X=400mm Y=500m)
		C	R	Velocidad de desplazamiento
Materiales		D	R	Acero estructural A36, Madera, Nylon
Construcción y montaje		C	R	Peso de la persona (75Kg)
		C	R	Carga máxima (5Kg)
Vida útil y mantenimiento		D	D	Confiabilidad de la maquina 90%
		D	R	Fácil mantenimiento
Energía		C	R	Energía eléctrica 110 V
Dimensiones		C	R	Longitud máxima 1 x 1m
Señales y control		D	R	Motor paso a paso
Seguridad y ergonomía		C	R	Nivel de ruido menor a 60 dB.
		D	R	Ubicación del efector final
<p>Propone: M=Márquetin, C=Cliente, D=Diseño, P=Producción, F=Fabricación.</p> <p>R/D: R=Requerimiento, D=Deseo, MR=Modificación de requerimiento.</p>				

Realizado por: Autores, 2018

Fuente: Autores

3.2 DISEÑO CONCEPTUAL

Determina las características técnicas del prototipo mediante el desarrollo de un análisis funcional que permite identificar los diferentes procesos a realizar por el equipo, para

obtener el resultado requerido se lleva a cabo el uso de módulos funcionales permitiendo seleccionar las mejores alternativas para el diseño.

3.2.1 Estructura funcional

Determina los componentes básicos de la función del prototipo, mediante un análisis de flujo de entrada y salida.

El análisis funcional realiza un primer nivel de manera global, define la función general del prototipo de modo que relaciona los flujos de entrada y salida los mismos que se desarrollan como sub-sistemas en los siguientes niveles funcionales.



Figura 2-3: Función del equipo

Fuente: Autores

El análisis funcional nivel 1 determina las funciones principales para conseguir la función global del prototipo.

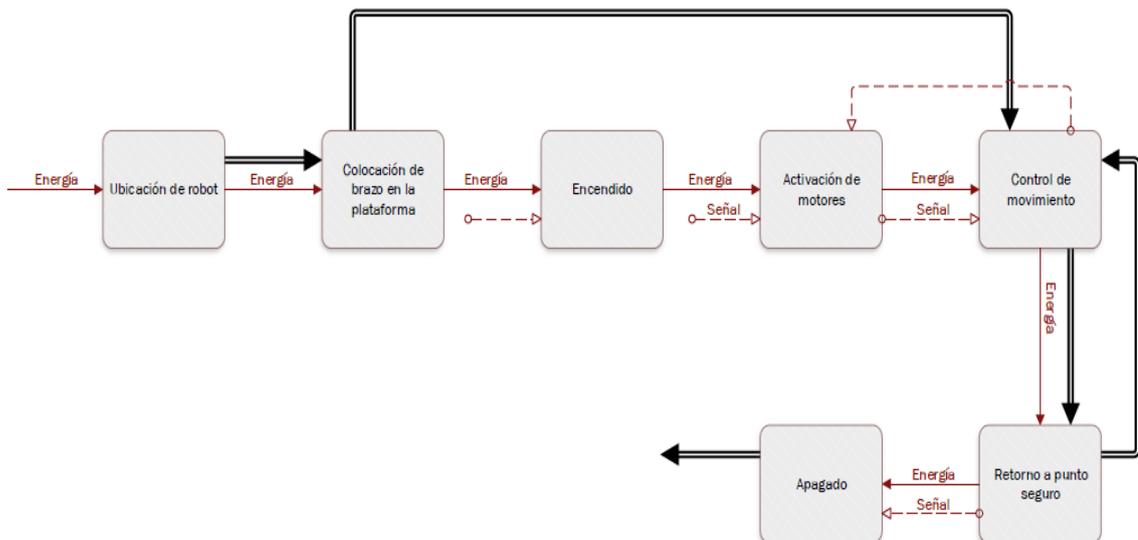


Figura 3-3: Análisis funcional-Nivel 1

Fuente: Autores

El nivel 2 establece las sub-funciones que realiza el equipo para cumplir con el objetivo principal.

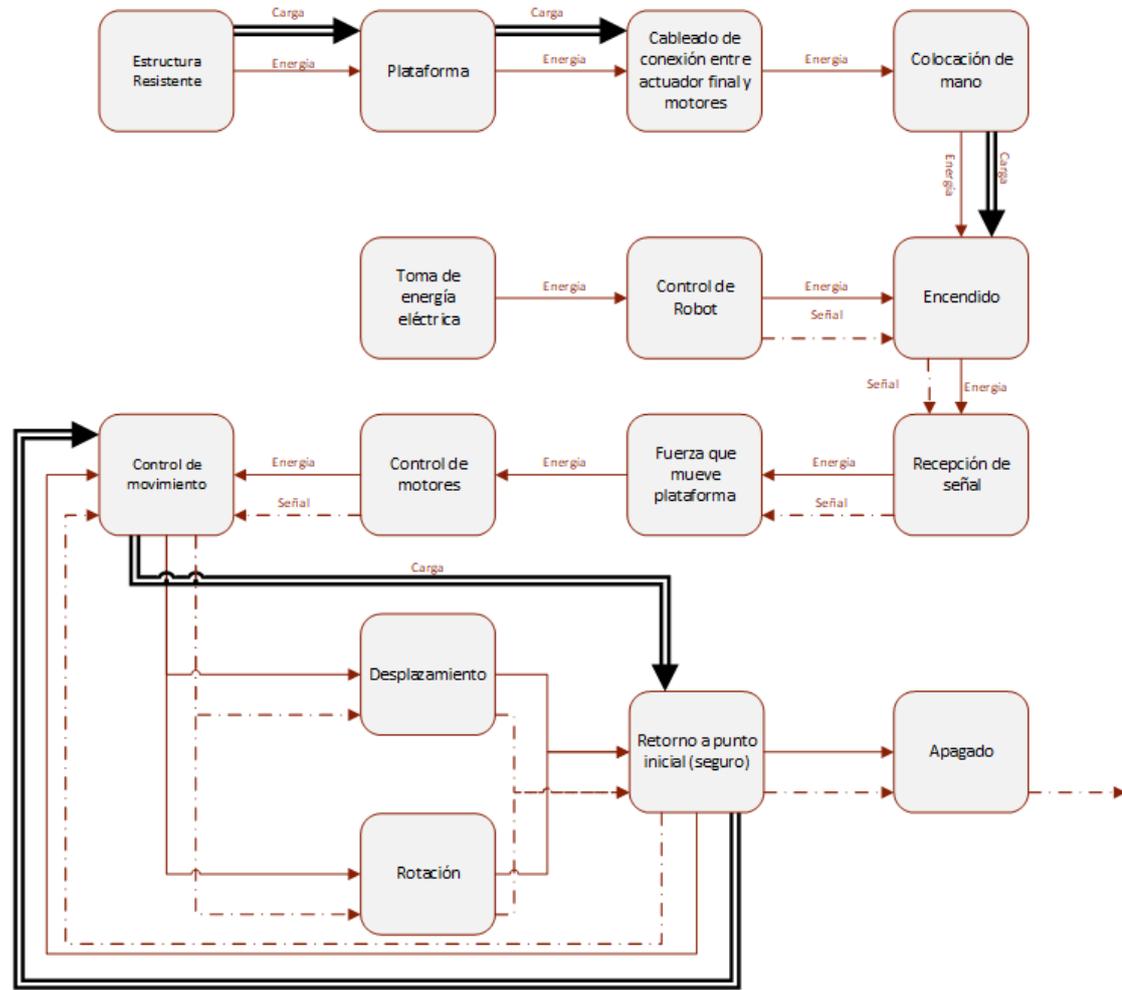


Figura 4-3: Análisis funcional-Nivel 2

Fuente: Autores

El análisis funcional de primer nivel conlleva: la realización de los movimientos del efector final como la función principal del prototipo para cumplir con el objetivo de rehabilitación siendo los elementos de entrada: la carga material o el paciente, la señal de inicio de los movimientos y la energía eléctrica que permite el funcionamiento del equipo.

El análisis funcional de segundo nivel considera la función de cada uno de los elementos y cómo actúan para el cumplimiento de la función principal del prototipo considerando las especificaciones y requerimientos planteados.

3.2.2 Definición de módulos

Un módulo funcional agrupa subfunciones de modo que realice una o varias funciones del prototipo. Al revisar el análisis funcional nivel 2 donde se engloba todas las funciones se determina dos módulos detallados a continuación:

MÓDULO 1

- Estructura resistente
- Plataforma móvil
- Conexión entre motores y plataforma
- Ubicación del robot
- Toma de energía eléctrica
- Control Encendido
- Recepción de señal
- Fuerza que mueve la plataforma

MÓDULO 2

- Control de motores
- Control de movimiento
- Control de desplazamiento
- Control de Rotación
- Retorno a punto inicial
- Apagado

Los módulos se han establecido de manera que la parte mecánica y eléctrica pertenezcan al módulo 1, y la parte de control y electrónica estén en el módulo 2. La figura 4-3 detalla la generación de módulos en el diagrama funcional. El módulo 1 es el que incluye el alcance del presente trabajo y para el módulo 2 referente al control se realiza un desarrollo que permita verificar el funcionamiento del módulo 1 y que ayude a cumplir con movimientos fin de la rehabilitación parcial de un hombro.

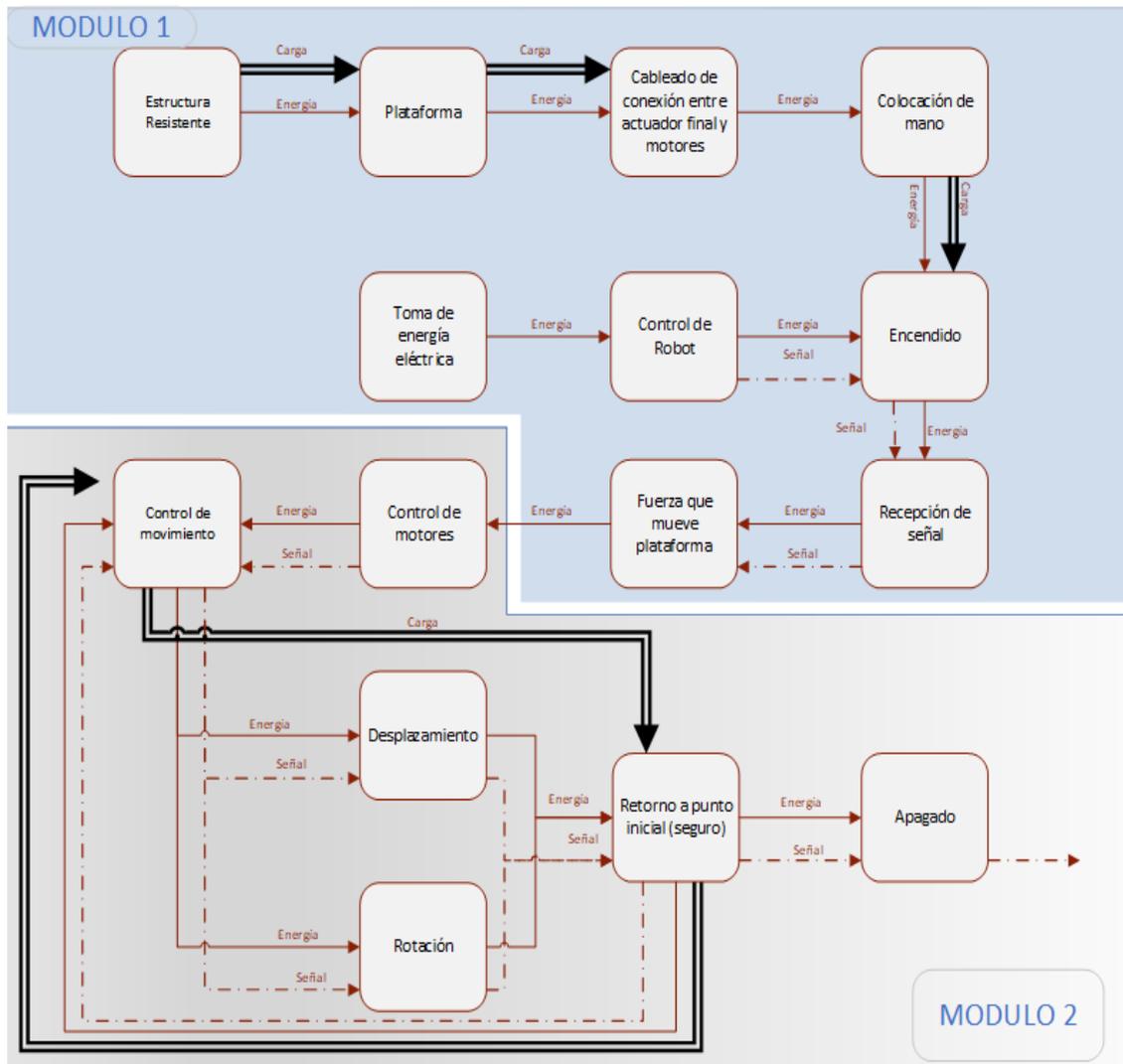


Figura 5-3: Definición de módulos

Fuente: Autores

Solución de módulo

Se determina y evalúa las posibles soluciones obtenidas después del análisis de cada una de las alternativas de los módulos establecidas anteriormente.

Módulo 1. Este módulo relaciona cada uno de los elementos que van a constituir el equipo tanto en su estructura como los elementos para el control del movimiento.

Estructura resistente. Soportar la carga que va a aplicar la persona al hacer la rehabilitada y los elementos necesarios para el funcionamiento del equipo. Esta

estructura puede ser de varios materiales como son: aluminio, acero inoxidable y estructura de acero A36.

Estructura de aluminio. Facilita la movilidad del equipo, está construido con aluminio modular o con perfiles para aumentar su resistencia y facilitar su montaje.

Ventaja. Equipo más ligero y fácil de mover.

Desventaja.

- Mayor costo de fabricación.
- Mano de obra no calificada.
- Fácil deformación en caso de sobre esfuerzos.

Estructura de acero inoxidable. Estructura más resistente y agradable a la vista constituido por perfiles de acero de un espesor mínimo para disminuir su peso.

Ventaja.

- Resiste las cargas aplicadas durante el funcionamiento del equipo
- Resistente a la corrosión.

Desventaja.

- Requiere de mano de obra y maquinaria especializada para la fabricación.
- Costo elevado.

Estructura de acero A36. Estructura resistente, construida con perfiles adecuados para facilitar el montaje de los elementos a utilizar y facilidad de encontrar el material a un costo accesible.

Ventaja.

- Menor costo de fabricación
- Resistente a las cargas aplicadas,

- Mano de obra y maquinaria necesaria para la fabricación de fácil acceso.

Desventaja. Necesita de recubrimiento para evitar la corrosión.

Plataforma móvil. Su función principal es mover el efector final a la posición deseada puede ser de madera o aluminio.

Plataforma móvil de aluminio. Plataforma de forma circular, colocado el efector final adecuado para cumplir su función y está ubicado sobre una plataforma fija.

Ventaja. Mas ligero.

Desventaja.

- Puede deformarse al aplicar el peso en el efector final.
- Personal no capacitado en la utilización de aluminio.

Plataforma móvil de madera. Plataforma con elementos móviles como ruedas en su parte inferior y en su parte superior con efector que ayudaran a cumplir la función principal del equipo.

Ventaja.

- Fácil montaje de los elementos.
- Mas ligero.

Desventaja. Puede sufrir daños con el tiempo.

Cuerdas de conexión. Cables que conectan la plataforma móvil y los tambores donde se enrollan luego de pasar por el cabrestante logrando así que sea capaz de moverla con ayuda de los motores sin que sufran algún daño y que además se pueda controlar el movimiento.

Cables de acero. Constituidos por un conjunto de alambres.

Ventaja. Mayor resistencia a la tracción y fatiga.

Desventaja.

- Poca flexibilidad.
- Mayor coeficiente de fricción en las poleas.
- Difícil de conseguir del diámetro requerido.

Cuerda de nylon. Cordón hecho de nylon.

Ventaja.

- Bajo coeficiente de fricción.
- Diámetros pequeños.
- Alta resistencia a la fatiga.

Desventaja. Se dilata se elevadas temperaturas

Recolección de cable. Sistema que permite recolectar el cable para el movimiento de la plataforma puede ser directamente al tambor o por un bobinado de nivel.

Tambor. Recolectar de cable mediante la conexión del motor directa eje.

Ventaja. Sistema de recolección sencillo.

Desventaja.

- El cable se enrolla en el mismo lugar
- Deslizamiento del cable.

Compensador de ángulo. Recolecta el cable en un tambor de manera ordenada mediante el giro del tambor y un eje de avance.

Ventajas

- Recolección de cable de manera homogénea en el tambor

- El cable no se desliza

Desventaja

- Sistema de recolección compleja
- Diseño de sus componentes
- Perdidas en poleas de conexión.

Posición del robot. El dispositivo debe permitir cumplir con los movimientos de rehabilitación de manera cómoda para el usuario por lo que puede estar de forma horizontal, o a una inclinación requerida.

Posición horizontal. La plataforma móvil se encuentra de forma horizontal al igual que la plataforma fija que se moverá sobre la misma, además de contar con un sistema de elevación.

Ventaja.

- La plataforma fija tiene mayor estabilidad.
- La altura es variable.

Desventaja. Limitación de movimientos a ejercicios específicos.

Posicionamiento vertical. La plataforma móvil y la fija se encuentran de forma vertical.

Ventaja. Aumento de movimientos posibles para el efector final.

Desventaja.

- Mayor tensión en los cables.
- Una sola posición de uso.
- Los motores soportan mayor carga por la carga aplicada.

Sistema de elevación. Su función es colocar la plataforma fija en diferentes alturas de acuerdo la estatura del usuario para lo cual se puede ser elevación por tijeras y botoneras.

Tijeras. Sistema de dos tijeras de perfil de acero colocados a las partes laterales con un sistema de tornillo de potencia para elevar la plataforma fija que se encuentra de forma horizontal, y en su centro un eje que permite un giro parcial de la plataforma fija.

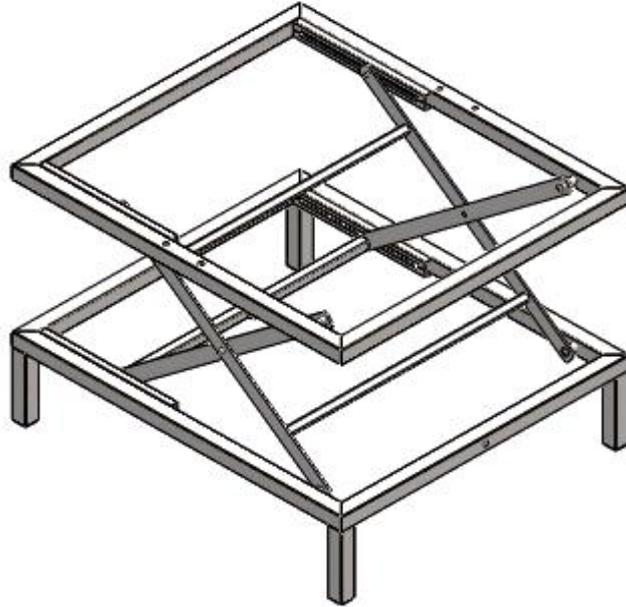


Figura 6-3: Estructura con sistema de tijeras

Fuente: Autores

Ventaja.

- Mismo nivel de elevación.
- Variación de alturas.

Desventaja. Incremento de peso del equipo.

Botoneras. La estructura principal tiene un sistema de perfiles con agujeros a los costados graduados a ciertas posiciones de tal modo que se puede elevar todo el sistema de plataformas hasta una altura deseada.

Ventaja. Equipo más ligero.

Desventaja.

- Alturas limitadas.
- Necesita ayuda para elevar el sistema de plataformas.

Fuente de alimentación. La energía eléctrica será la fuente de alimentación para el funcionamiento de los motores puede ser mediante energía eléctrica y baterías.

Energía Eléctrica. Conexión a una fuente de alimentación a 110V mediante un cable de conexión.

Ventaja.

- No necesitas conexiones especiales.
- Fuente de alimentación de uso común.

Baterías. Fuente de alimentación baterías recargables.

Ventaja. Puedes llevar el equipo a cualquier lugar.

Desventaja.

- Necesita baterías grandes para mover la plataforma móvil.
- Fuente de energía agotable.

Módulo 2

Este módulo controla los movimientos de la plataforma móvil mediante los cables unidos a los motores.

Las funciones a cumplir son:

- Control de motores
- Control de movimientos
- Retorno a punto inicial
- Apagado

Control. Manera de poner en funcionamiento el equipo por lo que puede ser controlado mediante un computador o control remoto.

Vía computador. Manejo de una aplicación instalado en un computador para controlar los movimientos de la plataforma móvil.

Ventaja. Fácil manejo.

Desventaja. Adquisición de un computador.

Control Remoto. Los movimientos de la plataforma son controlados a cierta distancia por un control remoto que emite señales a los actuadores para que realicen su función.

Ventaja. Fácil manejo.

Fuerza que mueve la plataforma. Para el movimiento de la plataforma se puede utilizar servomotores o motores paso a paso.

Servomotor. Motor pequeño con un reductor de velocidades que multiplica la fuerza formado por un motor y un circuito de control.

Ventaja.

- Trabaja altos torques.
- Alta precisión.
- Tamaño pequeño.

Desventaja. Costo elevado.

Motor paso a paso. Es un dispositivo electromecánico que controla su velocidad mediante un driver.

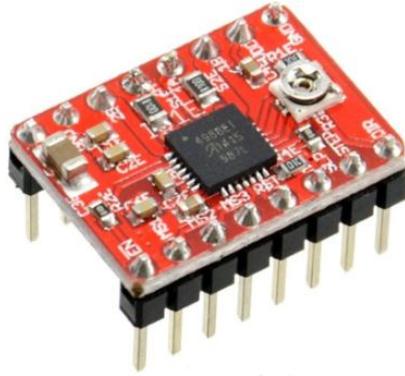


Figura 7-3: Driver para motor a paso

Fuente: <https://www.filipeflop.com/produto/driver-motor-de-passo-a4988/>

Ventaja.

Puede lograr velocidades de rotación bajas con carga en el eje.

- Exactitud en la posición y la repetición de movimientos.
- Buena reacción en el arranque.
- Tiene un gran rango de velocidades.
- Bajo costo

Desventaja.

- Difícil de controlar altas velocidades.
- La posición a bajas velocidades no es precisa.
- Necesita un componente electrónico específico para funcionar

Control de motores. Componentes electrónicos utilizados para el control de velocidad de motores

Encoder. Componente electrónico que convierte el movimiento mecánico en pulso digitales o analógicas que es interpretado por un control de movimientos

Ventajas

- Confiables en el conteo
- Bajo costo

Desventaja. No controla el movimiento solo proporciona una señal de la posición del eje de motor.

Driver. Permite el control la precisión en la velocidad, torque y posición del eje del motor

Ventajas

- Controla un motor de corriente continua y motor paso a paso
- Posee un puente circuito integrado que le permite girar en ambos sentidos.
- Bajo costo
- Permite alto par en el motor en condiciones de altas velocidades

Desventajas. Los drives para servomotores son específicos para cada uno.

Mediante tarjetas de control conectadas a drives de motores y una fuente de voltaje que permite el funcionamiento de los actuadores puede ser controlado mediante RaspberryPi, Arduino o Ni myRio.

Raspberry Pi. Placa computacional reducida que usa un software libre para su programación

Ventajas

- Consumo de potencia bajo
- Conectarse de forma inalámbrica
- Ejecuta múltiples programas al mismo tiempo

Desventajas

- Memoria RAM y procesador bajos.
- No cuenta con un sistema de refrigeración.
- Usado solo para pequeños proyectos
- Se puede dañar al desconectarlo de una manera inadecuada
- Funciona con el sistema operativo Linux

Arduino. Microcontrolador capaz de controlar recibir y dar señal de componentes electrónicos

Ventajas

- Capacidad de pulsos analógicos en tiempo real
- Posee más recursos para el control de componentes
- Puedes encenderlo y apagarlo en cualquier momento sin que afecte su programación.
- Programación corta y directa
- Funciona en diferentes sistemas operativos: Windows, Linux
- Bajo costo

Desventajas

- Para la adquisición de datos debes adquirir librería específicas
- No posee flexibilidad para ciertos proyectos.

Ni myRio Es un hardware manejado en tiempo real

Ventajas

- Puede ser conectado directamente a los actuadores
- Puede ser controlado mediante wifi

Desventajas

- Costo elevado
- Manejado por LabView (requiere Licencia)

Retorno a punto inicial. Puede ser de manera manual o automática

Automático. Finalizado la secuencia del efector final regresar a su unto inicial

Ventajas

- Asegurar una posición inicial.
- Comenzar una secuencia de movimientos con normalidad.

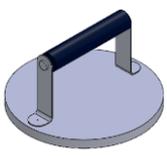
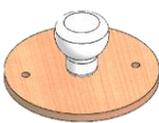
Manual. Retornar a la posición inicial del efector final con nuestra mano.

Desventajas

- No lograr llegar a su posición inicial
- Daño en los cables de conexión
- Falta de tensado en los cables

En la tabla 5-3 se muestran las posibles soluciones para cada uno de los módulos.

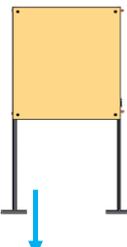
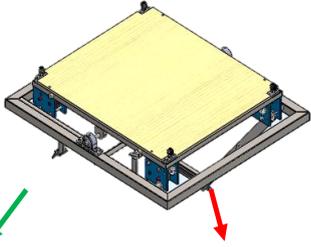
Tabla 5-3: Matriz morfológica para solución de cada módulo

SOLUCIONES PARA CADA MÓDULO	COMPONENTES		
Estructura resistente	<p>Aluminio</p> 	<p>Acero A36</p> 	<p>Acero Inoxidable</p> 
Plataforma móvil	<p>Aluminio</p> 	<p>Madera</p> 	
Cuerdas de conexión	<p>Cable de acero</p> 	<p>Cuerda de nylon</p> 	
Recolección de cable	<p>Tambor</p> 	<p>Compensador de ángulo</p> 	

Realizado por: Autores. 2018

Fuente: Autores

Tabla 5-3: (Continua) Matriz morfológica para solución de cada módulo

<p>Posición</p>	<p>Vertical</p>  <p>Horizontal</p> 
<p>Sistema de elevación</p>	<p>Botoneras</p>  <p>Tijeras</p> 
<p>Fuente de alimentación</p>	<p>Energía eléctrica</p>  <p>Baterías</p> 
<p>Control</p>	<p>Vía computador</p>  <p>Panel de control</p>  <p>Control remoto</p> 
<p>Fuerza que mueve la plataforma</p>	<p>Servomotor</p>  <p>Motor paso a paso</p> 
<p>Control de motor</p>	<p>Encoder</p>  <p>Driver</p> 

Realizado por: Autores, 2018

Fuente: Autores

Tabla 5-3: (Continua) Matriz morfológica para solución de cada módulo

Control de movimiento	Raspberry Pi 	Arduino 	Ni myRio 
Retorno a punto inicial			
Soluciones	SOLUCIÓN A	SOLUCIÓN B	SOLUCIÓN C

Realizado por: Autores, 2018

Fuente: Autores

Solución A. Robot vertical con estructura de aluminio y sistema de elevación de botoneras, la plataforma móvil conectado al tambor directamente con cables de acero, tiene fuente de alimentación eléctrica manipulada por computador.

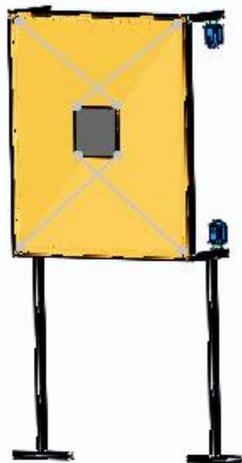


Figura 8-3: Robot Vertical

Fuente: Autores

Solución B. Robot vertical con estructura de acero inoxidable con sistema de elevación de tijeras, plataforma móvil de madera conectado a una bobinadora de nivel mediante cordón de nylon, con sistema de alimentación eléctrica.



Figura 9-3: Robot horizontal con bobinadora de nivel

Fuente: Autores

Solución C. Robot horizontal con estructura de acero A36 con sistema de elevación por botoneras, plataforma móvil de madera conectado directamente al tambor con cordón de nylon, manejado por botoneras.

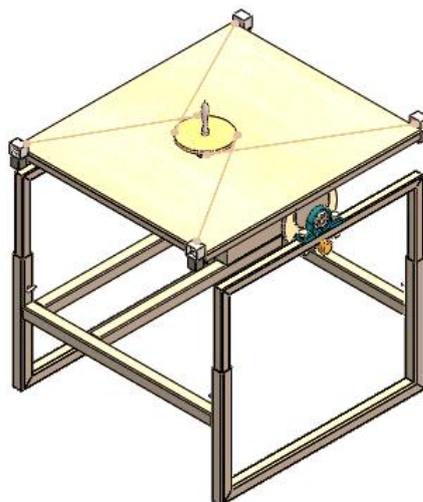


Figura 10-3: Robot horizontal por botoneras

Fuente: Autores

3.2.3 Valoración y selección de módulos

Para seleccionar una de las soluciones generadas, se aplicó el método ordinal corregido de criterios ponderados, mediante el cual se pueden obtener resultados globales significativos. Para cada módulo se obtuvo una solución en base a criterios de valoración establecidos previamente para cada uno de ellos, con base en tablas de cada criterio se confronta con los restantes criterios y se asignan los valores siguientes: (RIBA, 2002)

- 1 Si el criterio o solución de las filas es superior que el de las columnas.
- 0.5 Si el criterio o solución de las filas es equivalente al de las columnas.
- 0 Si el criterio o solución de las filas es inferior al de las columnas.

3.2.3.1 Selección de la solución del módulo 1.

En el módulo 1 se obtuvieron 3 posibles soluciones, para la selección de la más adecuada se procede a establecer los criterios de evaluación considerados más determinantes.

Criterios de evaluación

-Resistencia/Peso. Se requiere que el peso propio tanto de la estructura como de la plataforma sea lo más liviano posible, por lo que se debe utilizar materiales de baja densidad y con alta resistencia para que soporten las cargas aplicadas.

-Rango de movimiento. Siendo los movimientos una parte primordial para la rehabilitación el contar con un dispositivo que tenga un amplio rango de movimientos ayudará a que sea un producto más competitivo en el mercado.

-Fuerza de tracción. La fuerza que se requiere en los cables es muy importante al momento de lograr movimientos precisos es por esto que la fuerza que genera en los motores se transmite a través de los cables.

-Ergonomía. Tanto el operador como el paciente deben mantener una posición adecuada de manera que el proceso de rehabilitación se realice en forma cómoda y segura.

Tabla 6-3: Evaluación de cada criterio-Módulo 1

Criterio	Resistencia/ Peso	Rangos de movimiento	Fuerza de tracción	Ergonomía	$\Sigma+1$	Ponderación
Resistencia/Peso		0.5	1	1	3.5	0.35
Rangos de movimiento	0.5		0.5	0	2	0.2
Fuerza de tracción	0	0.5		1	2.5	0.25
Ergonomía	0	1	0		2	0.2
				Suma	10	1

Realizado por: Autores, 2018

Fuente: Autores

Posteriormente se evalúa cada uno de los criterios establecidos en las soluciones de las alternativas anteriormente generadas del módulo 1.

Tabla 7-3: Evaluación del criterio **Resistencia /Peso**

Resistencia/Peso	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma+1$	Ponderación	
Solución A		0	0	1	0.167	
Solución B	1		0.5	2.5	0.417	
Solución C	1	0.5		2.5	0.416	
				Suma	61	1

Realizado por: Autores, 2018

Fuente: Autores

Tabla 8-3: Evaluación del criterio **rangos de movimiento**

Rangos de movimiento	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución A		0.5	1	2.5	0.5
Solución B	0.5		0	1.5	0.3
Solución C	0	0		1	0.2
			Suma	51	1

Realizado por: Autores, 2018

Fuente: Autores

Tabla 9-3: Evaluación del criterio **Fuerza de tracción**

Fuerza de tracción	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución A		0	0.5	1.5	0.25
Solución B	1		0	2	0.33
Solución C	0.5	1		2.5	0.42
			Suma	6	1

Realizado por: Autores, 2018

Fuente: Autores

Tabla 10-3: Evaluación del criterio **Ergonomía**

Ergonomía	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución A		0.5	1	2.5	0.42
Solución B	0.5		1	2.5	0.42
Solución C	0	0		1	0.16
			Suma	61	1

Realizado por: Autores, 2018

Fuente: Autores

Tabla 11-3: Selección de la solución del módulo 1

	Resistencia/ Peso	Rangos de movimiento	Fuerza de tracción	Ergonomía	Σ	Prioridad
Solución A	0,058	0,1	0,062	0,083	0,304	3
Solución B	0,145	0,06	0,083	0,083	0,375	1
Solución C	0,145	0,04	0,104	0,033	0,3232	2

Realizado por: Autores, 2018

Fuente: Autores

Luego de realizar un análisis con los resultados de la evaluación de criterios del módulo 1 determina que la solución B es la más adecuada.

Tabla 12-3: Evaluación de cada criterio-Módulo 2

Criterio	Control de motores	Control de movimientos	Modo de funcionamiento	$\Sigma+1$	Ponderación
Control de motores		0.5	1	2.5	0.417
Control de movimientos	0.5		0.5	2	0.333
Modo de funcionamiento	0	0.5		1.5	0.250
Suma				6	1

Realizado por: Autores, 2018

Fuente: Autores

Posteriormente se evalúa cada uno de los criterios establecidos en las soluciones de las alternativas anteriormente generadas del módulo 2.

Criterios de evaluación

Control de motores. El control de los motores se debe ser de manera sencilla de modo que permitan el movimiento requerido por el prototipo.

Control de movimientos. El control de los movimientos debe ser con una velocidad y precisión requerida para el movimiento y no sobrepasar nuestro espacio de trabajo.

Modo de funcionamiento. El modo de funcionamiento debe ser sencilla de manera que se puedan ser utilizado por cualquier tipo de personas.

Tabla 13-3: Evaluación del criterio **Control de motores**

Control de motores	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución A		0,5	1	2,5	0,417
Solución B	0,5		1	2,5	0,417
Solución C	0	0		1	0,167
Suma				61	1

Realizado por: Autores, 2018

Fuente: Autores

Tabla 14-3. Evaluación del criterio **Control de movimientos**

Control de movimientos	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución A		0,5	1	2,5	0,417
Solución B	0,5		1	2,5	0,417
Solución C	0	0		1	0,167
			Suma	61	1

Realizado por: Autores, 2018

Fuente: Autores

Tabla 15-3. Evaluación del criterio **Modo de funcionamiento**

Modo de funcionamiento	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución A		0	1	2	0,333
Solución B	1		1	3	0,500
Solución C	0	0		1	0,167
			Suma	6	1

Realizado por: Autores, 2018

Fuente: Autores

Tabla 16-3: Selección de la solución del módulo 2.

	Control de motores	Control de movimientos	Modo de funcionamiento	Σ	Prioridad
Solución A	0,174	0,139	0,083	0,396	2
Solución B	0,174	0,139	0,125	0,438	1
Solución C	0,069	0,056	0,042	0,167	3

Realizado por: Autores, 2018

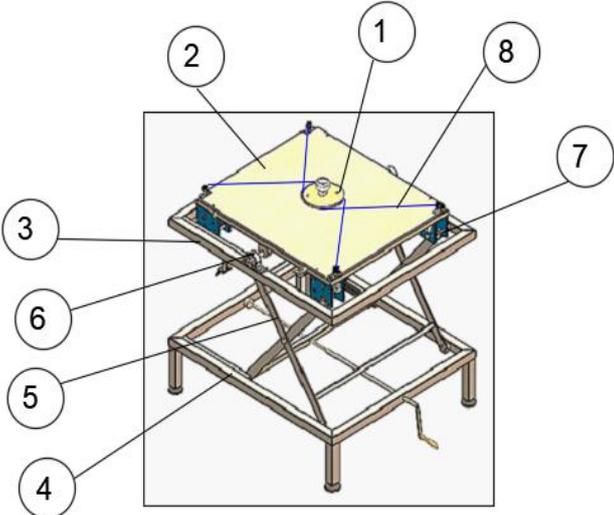
Fuente: Autores

Luego de realizar un análisis con los resultados de la evaluación de criterios del módulo 2 se determina que la solución B es la más adecuada.

3.3 Características del equipo

Luego de determinar y analizar las características que debe tener el equipo mediante las alternativas seleccionadas para cada módulo se asegura que va a cumplir con los movimientos de rehabilitación. En la siguiente tabla 17-3 se detallan los elementos del equipo.

Tabla 17-3: Pre diseño de alternativa seleccionada

ESQUEMA DEL EQUIPO	ELEMENTOS
 <p>El diagrama muestra un sistema de rehabilitación con una plataforma móvil (1) montada sobre una plataforma fija (2). La plataforma móvil está conectada a una estructura de plataforma (3) que se eleva mediante un sistema de elevación (5) basado en un mecanismo de chumacera (6). La estructura base (4) soporta todo el sistema. Un sistema de recolección (7) está conectado a la plataforma móvil, y un cable (8) asegura la conexión entre la plataforma móvil y la estructura de plataforma.</p>	<ul style="list-style-type: none"> 1.- Plataforma móvil 2.- Plataforma fija 3.- Estructura Plataforma 4.- Estructura Base 5.- Sistema de elevación 6.- Chumacera 7.- Sistema de Recolección 8.- Cable

Realizado por: Autores, 2018

Fuente: Autores

Elementos del equipo de rehabilitación parcial de hombro

Plataforma móvil. Se diseña de acuerdo a las condiciones ergonómicas del usuario y la carga a soportar de 4 Kg.

Plataforma fija. Ligero capaz de soportar el peso en la plataforma móvil y permitir que se mueva con facilidad.

Estructura Plataforma. Diseñado para resistir el peso de efector final y actuadores

Estructura Base. Diseñada para soportar el peso de las plataformas, actuadores y la carga viva.

Sistema de elevación. Da alturas variables dependiendo de la ubicación además de elevarse de manera uniforme.

Motores. Capaz de proporcionar el torque necesario para cumplir con los movimientos

Sistema de recolección de cable. Debe tener un diseño que permita que el cable se enrolle de manera uniforme en el tambor

Cable. Seleccionado de manera que sea capaz de soportar la fuerza de tracción al aplicar la carga en el efector final.

CAPÍTULO IV

4. ANÁLISIS CINEMÁTICO Y DINÁMICO DE UN ROBOT PARALELO MANIPULADO POR CABLES DE TRES GRADOS DE LIBERTAD

El estudio cinemático de un robot paralelo manipulado por cables se lo realiza mediante cinemática inversa para obtener las variables articulares L y α del efector final que se encuentra en la plataforma móvil. El estudio dinámico relaciona la dinámica de dos subsistemas el de la plataforma móvil y los actuadores para obtener la velocidad angular, aceleración angular y toques de los actuadores y la fuerza máxima que ejercen los cables en diferentes posiciones.

4.1 Descripción del mecanismo

La geometría del CDPR a desarrollar es de tipo planar horizontal formada por dos plataformas una móvil central y una fija conectados entre sí por cuatro cables flexibles cruzados que evitan dificultades de posicionamiento central. El prototipo realizara tres movimientos: traslación en X, traslación en Y, y rotación en Z.

En la figura 15 se muestra la arquitectura del CDPR propuesto. El marco N que se muestra la plataforma móvil mientras que la plataforma fija o base esta representados por cuatro puntos fijos A1, A2, A3 y A4. Los cables flexibles L1, L2, L3y L4 están conectados a la plataforma móvil central en los puntos B1, B2 B3 y B4.

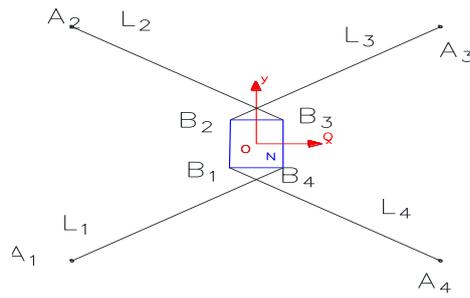


Figura 1-4: Esquema CDPR

Fuente: (PÉREZ, 2015)

En la figura 2-4 se analiza el estudio cinemático y dinámico del robot, desarrollado en Matlab. El flujograma del programa principal especifica los procesos de programación de las funciones necesarias del prototipo.

4.2 Análisis cinemático

Punto de referencia fijo de todo el sistema en el punto A con posición inicial $P=[0,0,0,0,0,0]$. Para el análisis de movimiento se considerará como un sistema de referencia fijo OXY, cuando la plataforma se mueva hacia un punto C se considerará un sistema de coordenadas móvil WUV ubicado en el centro del mismo, donde su vector de posición viene dado por: (PÉREZ, 2015)

$$P_w = [P_{wx}, P_{wy}, 0, 0, 0, \varphi]^T$$

Determinar las variables articulares del manipulador:

$$L = [L_1, L_2, L_3, L_4]^T$$

$$\alpha = [\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4]^T$$

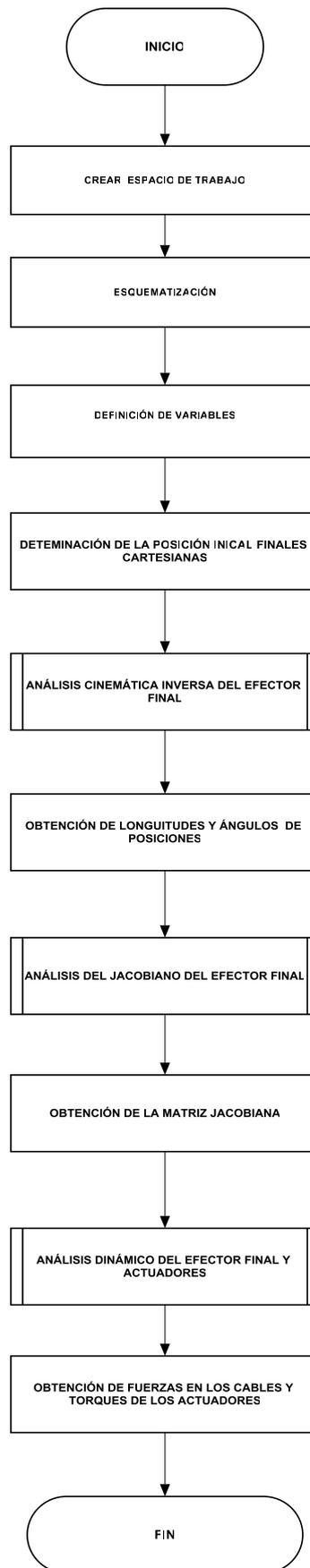


Figura 2-4: Flujograma programa Principal

Fuente: Autores

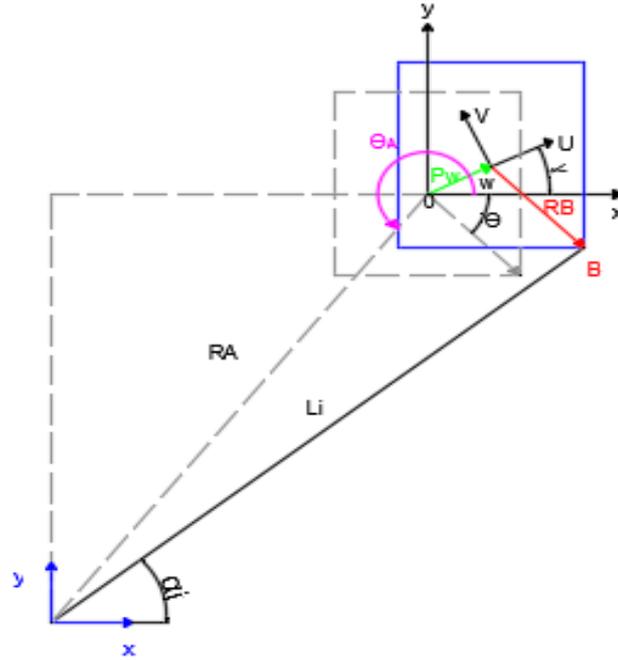


Figura 3-4: Esquema de posiciones de la plataforma N

Fuente: Autores

El análisis de posición de la plataforma central **N** se considera como ángulos absolutos θ_{Ai} y θ_{Bi} ($i=1,2,3,4$) con respecto al punto fijo **O**. Considerando como θ_{Ai} al ángulo $\widehat{B_i W U}$ del sistema de coordenadas WUV y el ángulo γ al ángulo formado entre el eje U y la horizontal por lo que se deduce que (PÉREZ, 2015):

$$\varphi_i = \gamma + \theta_{Bi} \quad (8)$$

Por lo que la posición de nuestro punto B está dado por el vector

$$R_B = \begin{bmatrix} R_B \cdot \cos(\varphi_i) \\ R_B \cdot \sin(\varphi_i) \end{bmatrix} \quad (9)$$

Las posiciones de los puntos base respecto a O de cada uno de los cables están dadas por:

$$A_i = [R_A \cdot \cos \theta_{Ai} \quad R_A \cdot \sin \theta_{Ai}]^T \quad (10)$$

Para determinar el vector desplazamiento de la plataforma móvil con respecto a **O** se obtiene mediante una ecuación cerrada de cada cable mediante la siguiente ecuación:

$$\overrightarrow{OW} = \overrightarrow{OA_i} + \overrightarrow{A_iB_i} - \overrightarrow{B_iW} \quad (11)$$

Para determinar la longitud de cada uno de los cables se deberá analizar la ecuación (11) donde:

$$\overrightarrow{A_iB_i} = \overrightarrow{OW} + \overrightarrow{B_iW} - \overrightarrow{OA_i}$$

$$\vec{L}_i = \vec{P}_G + \vec{R}_B - \vec{R}_A$$

Remplazando las ecuaciones obtenidas anteriormente se determina que la longitud de cables está dada mediante la siguiente ecuación:

$$L_i = \left[(P_{Wx} + R_B \cos \varphi_i - R_{xA_i})^2 + (P_{Wy} + R_B \sin \varphi_i - R_{yA_i})^2 \right]^{(1/2)} \quad (12)$$

Además, el ángulo que forma cada cable con la horizontal está dada mediante la siguiente ecuación:

$$\alpha_i = \arctg \left[\frac{(P_{Wx} + R_B \sin \varphi_i - R_{yA_i})}{(P_{Wy} + R_B \cos \varphi_i - R_{xA_i})} \right] \quad (13)$$

De acuerdo con los movimientos a realizarse por el robot, los cuales fueron determinados en la Tabla 2-1 según las dimensiones del brazo (Tabla 2-2) se considera los siguientes parámetros:

Tabla 1-4: Dimensiones de la plataforma

	mm	Mm
Plataforma fija	780	680
Plataforma móvil	150	150

Realizado por: Autores, 2018

Fuente: Autores

Para el análisis cinemático se considera las posiciones extremas del robot en el espacio de trabajo. En la figura 4-4 se esquematiza el desplazamiento del efector final en la plataforma fija.

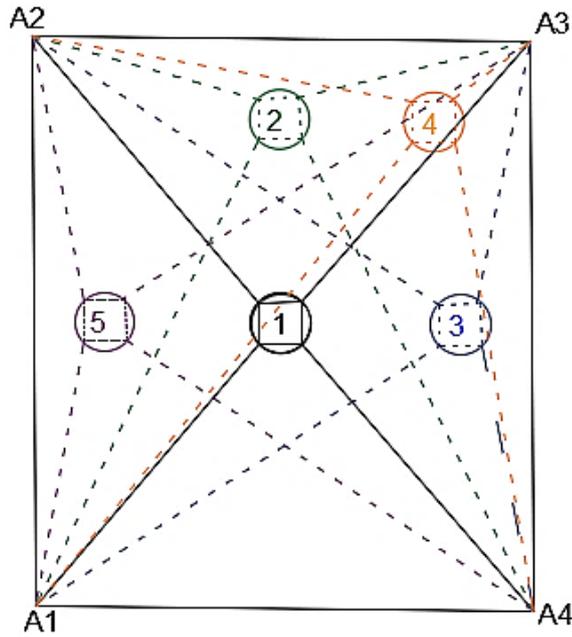


Figura 4-4: Esquema de Posiciones

Fuente: Autores

En la Tabla 2-4 se detallan la magnitud de desplazamientos en cada punto de análisis.

Tabla 2-4: Posiciones del efector final

Posiciones	X (m)	Y (m)	ϕ ($^{\circ}$)
1	0,34	0,39	0
2	0,34	0,69	0
3	0,54	0,39	0
4	0,54	0,69	0
5	0,14	0,39	30

Realizado por: Autores, 2018

Fuente: Autores

Flujograma de la cinemática inversa.

El flujograma de cinemática inversa determina la longitud de los cables y el ángulo que forman con la horizontal en cada una de las posiciones críticas.

El cálculo de longitudes y ángulos se los realiza en la hoja de programación de Matlab y en la figura 5-4 se representa el flujograma de cinemática mediante las ecuaciones obtenidas anteriormente en el estudio cinemático del robot, el análisis se los realiza en las posiciones extremas determinando las máximas longitudes de cable.

El algoritmo completo de la programación de Matlab se adjunta en el ANEXO A

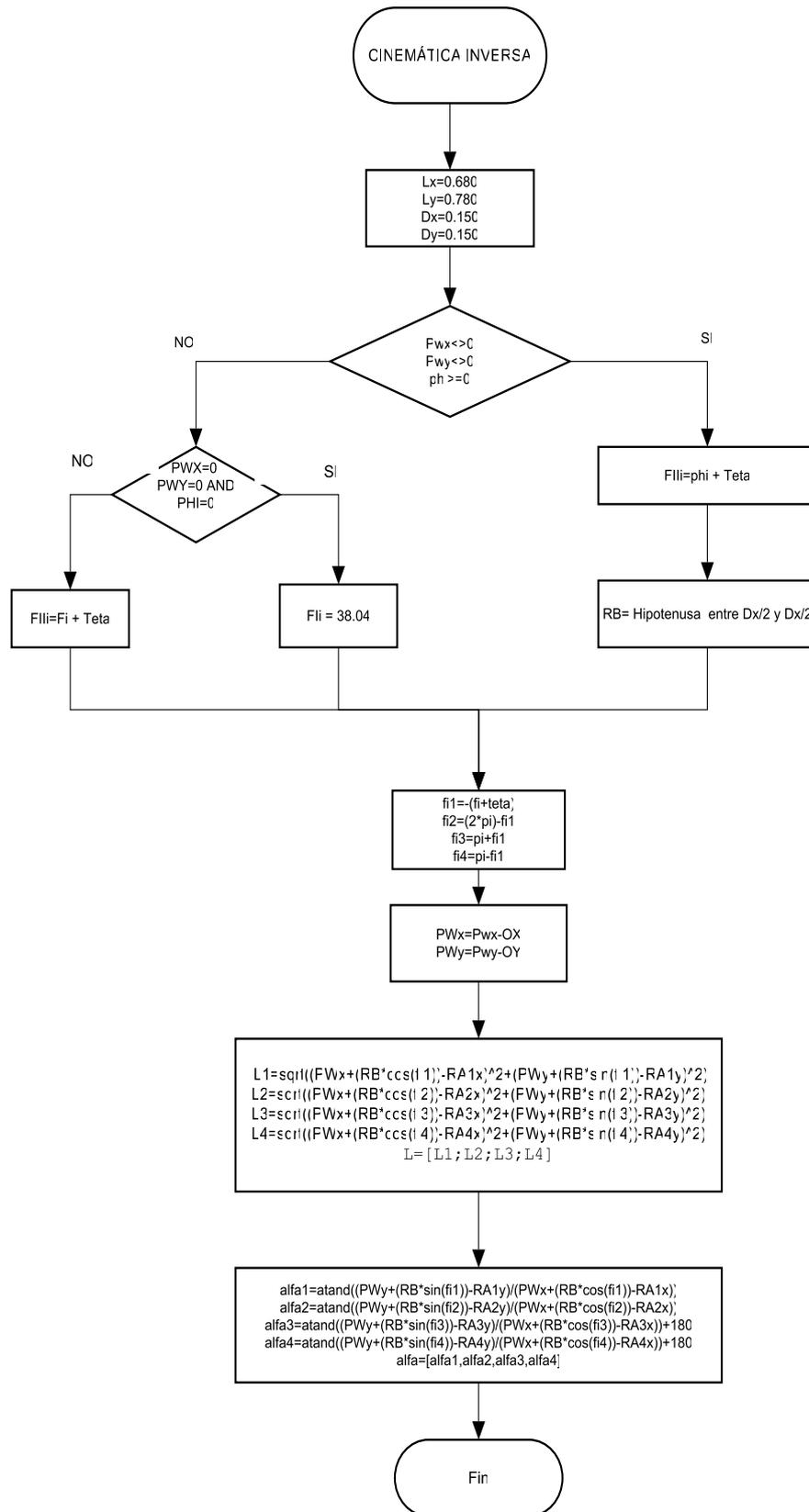


Figura 5-4: Flujograma Cinemática Inversa

Fuente: Autores

El resultado de longitudes y ángulos que forman los cables con la horizontal se presenta en la Tabla 3-4

Tabla 3-4: Longitudes y ángulos

Posiciones	L1 (m)	L2 (m)	L3 (m)	L4 (m)	$\alpha 1$ (°)	$\alpha 2$ (°)	$\alpha 3$ (°)	$\alpha 4$ (°)
1	0,521	0,521	0,521	0,521	37,12	-37,12	37,12	-37,12
2	0,742	0,415	0,415	0,742	55,989	-2,07	2,07	-55,989
3	0,691	0,691	0,381	0,381	27,121	-27,121	55,685	-55,685
4	0,87	0,615	0,215	0,652	45	-1,397	3,99	-70,73
5	0,333	0,333	0,636	0,636	59,786	-59,786	-26,873	-26,873

Realizado por: Autores, 2018

Fuente: Autores

En la tabla anterior se determinó la longitud máxima que tiene un cable es de 870mm el ángulo máximo que forma con la horizontal es de $-70,73^\circ$ la longitud del cable solo se lo considera desde la plataforma móvil hasta nuestro espacio de trabajo que servirá de ayuda en el momento de fabricación.

Análisis de la matriz Jacobiana

La matriz jacobina estudia las velocidades de nuestro manipulador final teniendo en cuenta las particularidades del sistema. La cinemática diferencial relaciona las velocidades lineales y angulares de nuestro efector final con las velocidades de las articulaciones. (URREA, 2012)

El estudio de la jacobiana se lo baso en el estudio por (PÉREZ, 2015)

El análisis de la Jacobiana relaciona la velocidad de las articulaciones activas ($\dot{\mathbf{L}}$) y la velocidad de la plataforma móvil ($\dot{\mathbf{P}}_w$).

$$\dot{\mathbf{L}} = \mathbf{J} \cdot \dot{\mathbf{P}}_w \quad (14)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{L}_1 \\ \dot{L}_2 \\ \dot{L}_3 \\ \dot{L}_4 \end{bmatrix} = J \begin{bmatrix} \dot{P}_{wx} \\ \dot{P}_{wy} \\ \dot{\phi} \end{bmatrix}$$

Dónde: J es una matriz no simétrica 4x3 (4 cables x 3 GDL)

Para el análisis de la jacobina se debe realizar la derivada respecto al tiempo de la ecuación 4 por el análisis de la cadena cinemática cerrada.

$$\overrightarrow{OW} = \overrightarrow{OA_i} + \overrightarrow{A_iB_i} - \overrightarrow{B_iW}$$

Donde el vector \overrightarrow{OW} solo varia respecto a la posición del punto Pw, $\overrightarrow{OA_i}$ permanece constante, $\overrightarrow{A_iB_i}$ o L_i cambia la posición y rotación y $\overrightarrow{B_iW}$ o R_{B_i} varia solo en su rotación.

Al derivar la ecuación 4 y realizar varias operaciones tenemos:

$$\overrightarrow{OW} - \overrightarrow{OA_i} + \overrightarrow{B_iW} = \overrightarrow{A_iB_i}$$

$$\frac{d(\overrightarrow{OW})}{dt} - 0 + \frac{d(\overrightarrow{B_iW})}{dt} = \frac{d(\overrightarrow{A_iB_i})}{dt}$$

$$\frac{d(P_w)}{dt} + \frac{d(R_{B_i})}{dt} = \frac{d(L_i)}{dt}$$

Al vector L_i se lo represento como su módulo y vector

$$\dot{P}_G + R_{B_i} = L_i \cdot \hat{S}_1$$

El vector R_{B_i} se lo represento como cruz K por el módulo R_{B_i} porque nuestra plataforma gira alrededor de nuestro eje Z y multiplicado por nuestro ángulo de giro ϕ

$$\dot{P}_W + \dot{\phi}(\hat{K} \times R_{B_i}) = \dot{L}_i \hat{S}_1 + L_i \dot{\hat{S}}_1$$

Después de derivar cada uno de nuestros vectores respecto al tiempo obtenemos la siguiente ecuación:

$$\dot{L}_i \widehat{S}_i + \dot{\alpha}_i L_i (\widehat{K} \times \widehat{S}_i) = v_W + \dot{\varphi} (\widehat{K} \times R_{Bi}) \quad (15)$$

Donde V_w es la velocidad de la plataforma móvil en el punto W

$$v_G = [P_{Gx}, P_{Gy}]^T$$

Nuestro vector R_{Bi} y su unitario

$$R_{Bi} = [R_{Bix} \quad R_{Biy}]^T = [R_B \cos(\varphi_i) \quad R_B \sin(\varphi_i)]^T,$$

$$S_i = [S_{ix} \quad S_{iy}]^T = [\cos(\alpha_i) \quad \sin(\alpha_i)]^T$$

\widehat{K} = vector unitario en Z

Al realizar el producto punto a los dos lados de la ecuación 8 tenemos lo siguiente:

$$J = [S_{ix} | S_{iy} | R_{Bix} S_{iy} - R_{Biy} S_{ix}] \quad (16)$$

La matriz jacobina nos permite relacionar los parámetros de la plataforma con los cuatro cables para el cual obtenemos la siguiente matriz:

$$J = \begin{bmatrix} S_{1x} | S_{1y} | R_{B1x} S_{1y} - R_{B1y} S_{1x} \\ S_{2x} | S_{2y} | R_{B2x} S_{2y} - R_{B2y} S_{2x} \\ S_{3x} | S_{3y} | R_{B3x} S_{3y} - R_{B3y} S_{3x} \\ S_{4x} | S_{4y} | R_{B4x} S_{4y} - R_{B4y} S_{4x} \end{bmatrix}$$

Al hacer una multiplicación en cruz en ambos lados de la ecuación (15) por \widehat{S}_i obtenemos:

$$J_\alpha = \frac{1}{L_i} [-S_{iy} | S_{ix} | R_{Bix} S_{ix} - R_{Biy} S_{iy}] \quad \text{para } i = 1,2,3,4 \quad (17)$$

$$J_{\alpha} = \frac{1}{L_i} \begin{bmatrix} -S_{1x} | S_{1y} | R_{B1x} S_{1x} - R_{B1y} S_{1y} \\ -S_{2x} | S_{2y} | R_{B2x} S_{2x} - R_{B2y} S_{2y} \\ -S_{3x} | S_{3y} | R_{B3x} S_{3x} - R_{B3y} S_{3y} \\ -S_{4x} | S_{4y} | R_{B4x} S_{4x} - R_{B4y} S_{4y} \end{bmatrix}$$

Esta matriz relaciona las velocidades de la plataforma móvil con el punto Pw con el vector de velocidades angulares

Flujograma de matriz jacobiana

Representación del cálculo de la matriz J en Matlab (Anexo A)

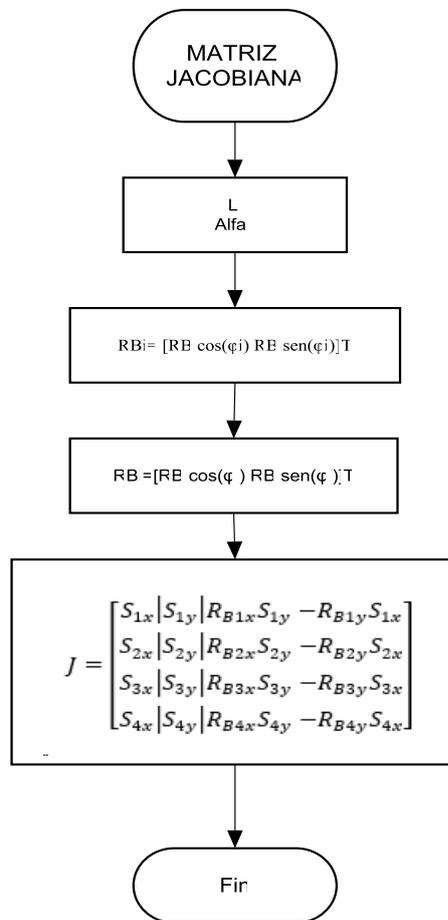


Figura 6-4: Flujograma matriz Jacobiana

Fuente: Autores

4.3 Análisis dinámico

Un CDPR está constituido por dos subsistemas dinámicos:

- Subsistema del efector final
- Subsistema de los actuadores

En el estudio dinámico de un CDPR no se considera el peso de los cables, por ser es mucho menor en comparación con la del efector final.

Análisis del subsistema del efector final

La dinámica del efector final se lo realiza usando la ecuación de movimientos de Newton-Euler cuando los cables están en tensión.

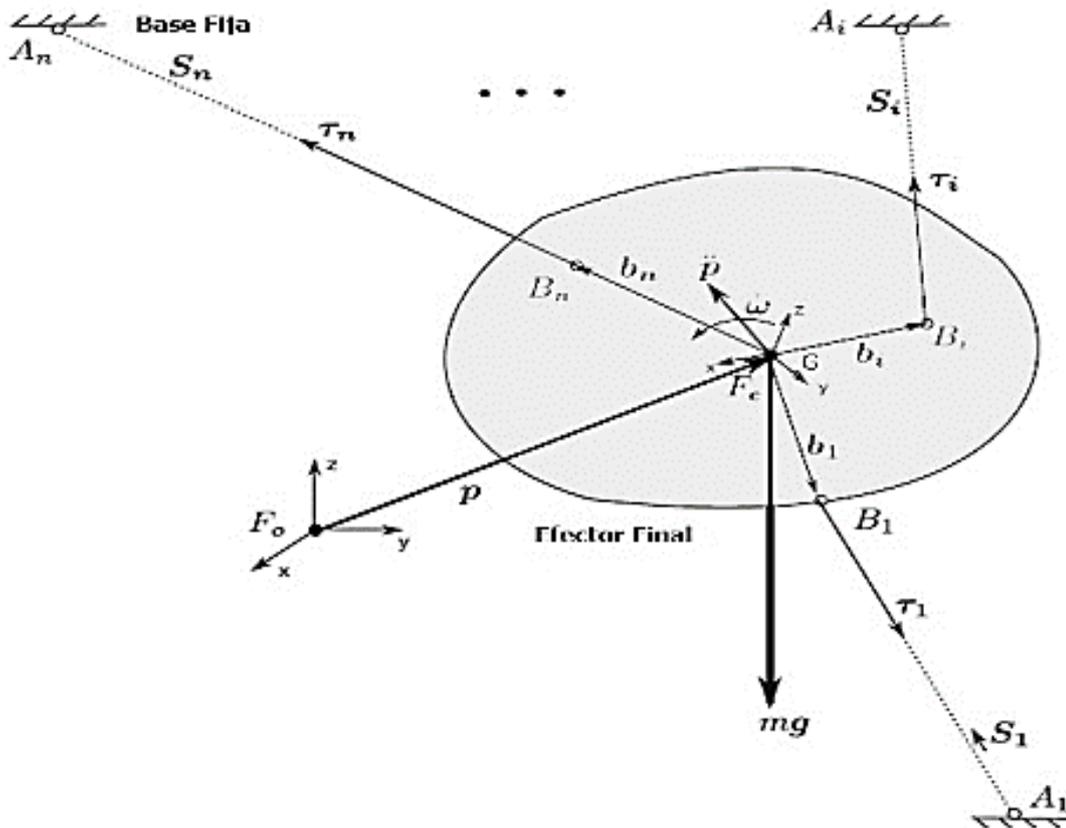


Figura 7-4: Esquema Dinámico de un CDPR

Fuente: KHOSRAVI M. 2014

El estudio dinámico de la plataforma móvil se lo plantea como un sistema mecánico cuyo movimiento se basa en la segunda Ley de Newton

$$fot(t) = M \cdot \frac{d^2}{dt^2} x(t) + C \frac{d}{dt} x(t) + Kx(t) \quad (18)$$

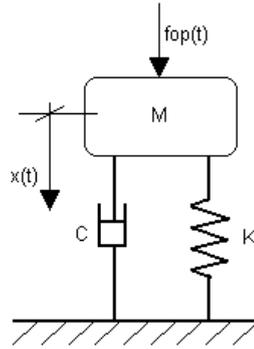


Figura 8-4: Sistema Mecánico

Fuente: OGATA K., 2010

Donde:

M = Masa del cuerpo en movimiento

C = Fuerza de rozamiento viscosa

K = Energía potencial

Haciendo una analogía a nuestro sistema y las ecuaciones de Newton Euler que se basa el movimiento de un robot paralelo se obtiene la ecuación (19) donde C que representa el movimiento relativo (matriz de Coriolis y centrípeta) se anulan debido a que no existen estos movimientos M la masa de la plataforma móvil y G vector gravitacional y τ vector de fuerzas.

$$M(x)\ddot{x} + G(x) = J^T\tau \quad (19)$$

Para $T \geq 0$

Donde:

Masa de la plataforma

$$M(x) = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{2}m(Dx^2 + Dy^2) \end{bmatrix}$$

Vector gravitacional

$$G(x) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -mg \end{bmatrix}$$

Vector posición y orientación de la plataforma

$$x = \begin{bmatrix} P_{GX} \\ P_{GY} \\ \varphi \end{bmatrix}$$

Vector de fuerzas

$$\tau = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \\ \tau_4 \end{bmatrix}$$

Subsistema de los actuadores

Para el análisis de los actuadores se toma como modelo general de un motor CD relacionado las variables eléctricas del motor con carga según la segunda ley de newton para el movimiento rotatorio obtenemos la siguiente ecuación:

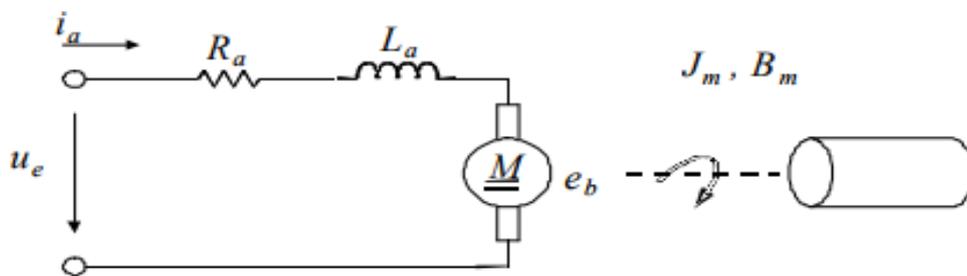


Figura 9-4: Diagrama de un motor CD

Fuente: Kuho, 1996

$$J_m \dot{\omega}(t) + B\omega(t) = T \quad (20)$$

Donde:

J = Momento de inercia del actuador

B = Fricción viscosa

ω = velocidad angular del actuador

T = Torque

Relacionando la ecuación (20) a nuestro sistema se obtiene la ecuación (21) donde I_m es el momento de inercia, d la matriz de fricción viscosa y r el radio de la polea.

$$I_m \ddot{q} + D \dot{q} - r\tau = T \quad \tau \geq 0 \quad (21)$$

Donde:

Inercia de los actuadores

$$I_m = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} m_{act} r^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{2} m_{act} r^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{2} m_{act} r^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2} m_{act} r^2 \end{bmatrix}$$

Fricción viscosa de los actuadores

$$D = \begin{bmatrix} d & 0 & 0 & 0 \\ 0 & d & 0 & 0 \\ 0 & 0 & d & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d \end{bmatrix}$$

Fuerza en los cables

$$\tau = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \\ \tau_4 \end{bmatrix}$$

Torques en los motores

$$T = \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \end{bmatrix}$$

Modelo dinámico de un C DPR

Para encontrar el modelo dinámico de un C DPR se relaciona los subsistemas analizados anteriormente, además de definir que $q = 0$ en el centroide del efector final siendo q un ángulo positivo cuando este varié provoca un cambio en la longitud de los cables.

$$\Delta L = rq = L - L_0$$

Despejando q se tiene:

$$q = r^{-1}(L - L_0) \quad (22)$$

Donde L_0 = Vector longitud inicial en $P_W = 0$ al diferenciar la ecuación (22) y usando la ecuación (11) se obtiene:

$$\dot{q} = r^{-1}\dot{L} = r^{-1}J \cdot \dot{P}_W \quad (23)$$

$$\ddot{q} = r^{-1}J\dot{P}_W + r^{-1}J\dot{P}_W \quad (24)$$

Relacionando las ecuaciones (21), (19) (23) y (24) y la ecuación de movimiento de newton Euler se obtiene:

$$M_{eq}(x)\ddot{x} + N_{eq}(x) = J^T T \quad (25)$$

Donde:

$$M_{eq}(x) = rM(x) + r^{-1}J^T I_m$$

$$N_{eq}(x) = rG(x) + r^{-1}J^T I_m \dot{x} + r^{-1}J^T D \dot{x}$$

La ecuación (25) relaciona la dinámica de actuadores con la del efector final y su espacio de trabajo mediante la matriz Jacobiana.

Flujograma del análisis dinámico

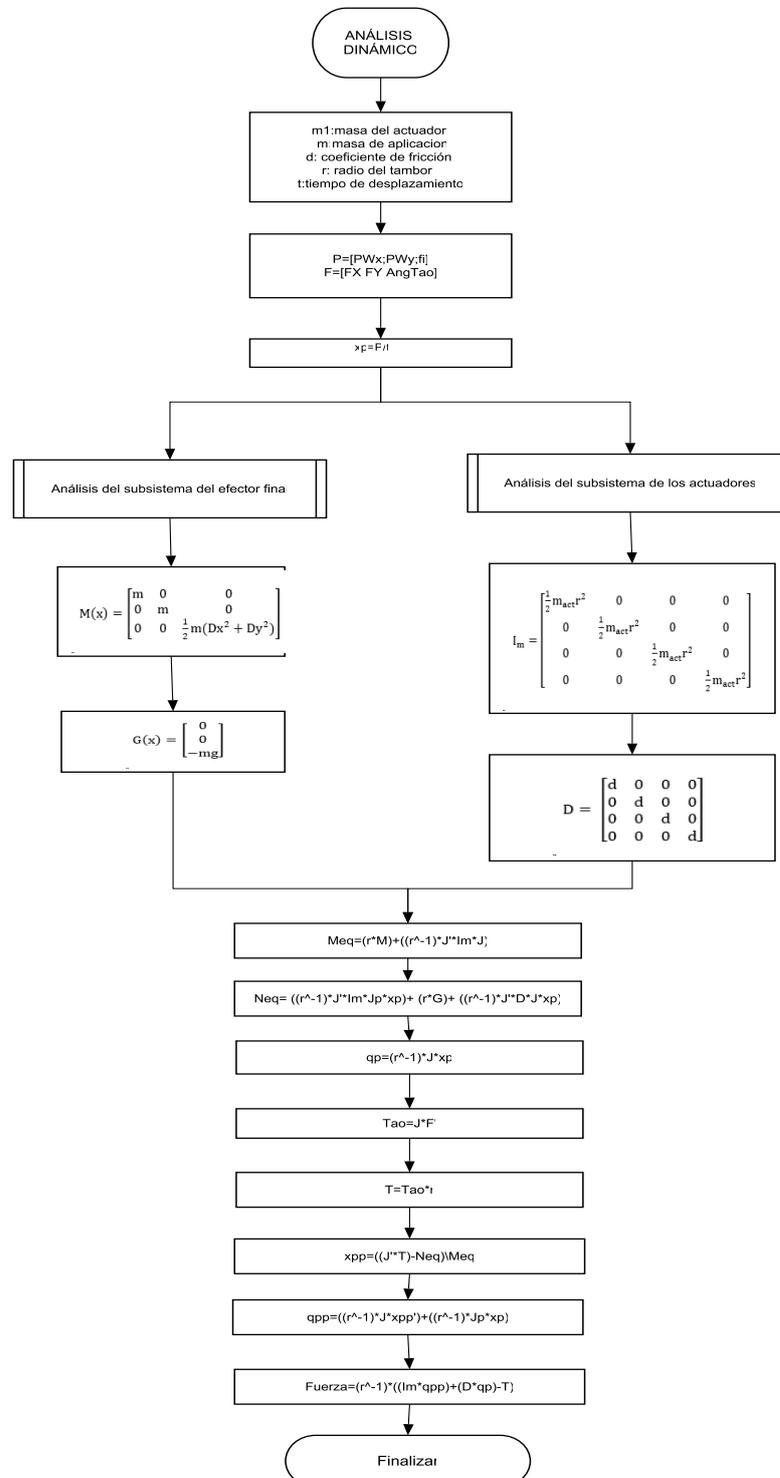


Figura 10-4: Flujograma del análisis dinámico

Fuente: Autores

El estudio dinámico realizado en Matlab (Anexo A) se lo desarrolla a través del siguiente flujograma que realiza el estudio del subsistema del actuador y efector final relacionándolos para determinar el torque en los actuadores y la fuerza en cada cable.

De acuerdo con los movimientos realizados por la plataforma en el análisis dinámico se determina el torque, la velocidad angular de los actuadores y las fuerzas en los cables en las posiciones consideradas anteriormente:

Para el análisis dinámico se consideran los siguientes parámetros:

Tabla 4-4: Parámetros de los elementos de CDPR

Descripción	Denominación	Valor	Unidades
Masa plataforma móvil	m	4	Kg
Masa del eje motor	Mt	0,7	Kg
Viscosidad en el eje motor	μ	0,2	N.ms/rad
Radio de la polea	r	15	mm

Realizado por: Autores, 2018

Fuente: Autores

Para masa de la plataforma se le considero el peso del brazo que es el 0,05 PC y de la plataforma móvil. (V.Frankel, 2001).El cálculo de los parámetros dinámico se lo realizó mediante el uso de software Matlab (Anexo A) en el cual se usaron las ecuaciones encontradas en el análisis dinámico del CDPR.

Tabla 5-4: Fuerzas en los cables

Posiciones	F1 (N)	F2 (N)	F3 (N)	F4 (N)
1	-67,408	-9,043	67,078	9,373
2	17,28	-49,767	-45,907	-71,298
3	-4,574	39,495	-28,412	50,53
4	51,482	18,427	23,412	-44,11
5	-86,447	-29,911	-143,043	-63,225
6	-86,447	-29,911	-143,043	-63,225

Realizado por: Autores, 2018

Fuente: Autores

En la Tabla 5-4 se encuentran las fuerzas producidas por los cables en las diferentes posiciones de análisis, se determinó que la fuerza máxima que soportan de 143,043N.

Tabla 6-4: Torques de motores

Posiciones	T1 (Nm)	T2 (Nm)	T3 (Nm)	T4 (Nm)
1	0,876	0,118	-0,872	-0,122
2	0,868	0,599	0,644	-0,166
3	0,842	0,269	0,865	-0,161
4	0,88	0,607	0,664	-0,381
5	0,8548	-0,227	0,836	0,277

Realizado por: Autores, 2018

Fuente: Autores

En la Tabla 6-4 se encuentran el torque que necesitan los motores para que la plataforma móvil llegué a las posiciones de análisis, el torque máximo en los motores es 0,88 Nm.

Tabla 7-4: Velocidad angular en ejes

Posiciones	w1 (rad/s)	w2 (rad/s)	w3 (rad/s)	w4 (rad/s)
1	2,405	1,012	-2,402	-1,023
2	0,247	2,138	2,057	2,1036
3	-0,042	-2,688	1,529	-3,259
4	-3,074	-1,99	-2,202	1,508
5	1,919	1,128	1,124	0,715

Realizado por: Autores, 2018

Fuente: Autores

En la Tabla 7-4 se observa las diferentes velocidades angulares de los ejes de los motores para las diferentes posiciones de análisis, la velocidad angular máxima en los ejes del motor es de 3,259 rad/s.

CAPÍTULO V

5. DISEÑO MECÁNICO

El presente capítulo se enfoca en el diseño de los elementos mecánicos que son parte del robot manipulado por cables el cual está constituido principalmente por una plataforma fija y por otra móvil, las que serán dimensionadas luego de considerar: el área de trabajo, resistencia, el peso propio, la carga que debe soportar y los esfuerzos a los que serán sometidos los componentes de cada mecanismo; para el modelado de las piezas se utilizará el software para modelado mecánico Solidworks en forma conjunta con las especificaciones establecidas en los capítulos anteriores según las condiciones de diseño y los resultados obtenidos mediante el análisis cinemático y dinámico.

- Desplazamiento en x : 400 mm
- Desplazamiento en y : 500 mm
- Carga: 4 kg
- Torque de motores: 0,88 $N.m$
- Fuerza en los cables: 143,04 N

Análisis del espacio de trabajo

El espacio de trabajo se limita por el rango de amplitud en los movimientos que realiza en los ejercicios de rehabilitación seleccionados de Tabla 1-2 a realizarse por el prototipo, el desplazamiento máximo realizado es de 400 mm y 500 mm en los ejes x y y respectivamente. Además, se determina las longitudes que deben tener los cables, aunque esto no afecta directamente en el espacio de trabajo, se debe considerar la conexión de los cables en la plataforma móvil porque presenta singularidades en el movimiento.

Singularidades. Son las posiciones en las que el movimiento del equipo se vuelve incontrolable

Teniendo en cuenta la amplitud de los desplazamientos y las dimensiones de la plataforma móvil se determina que las longitudes máximas del prototipo serán de 680x780 mm permitiendo así que se pueda cumplir libremente con los movimientos. El espacio de trabajo se considera solo en el plano $x-z$ debido a que solo presenta traslación en el mismo y giro en el eje y (vertical).

5.1 Diseño de detalle

Para el desarrollo del diseño de detalles se tomará como base el diseño conceptual previamente estudiado, tomando en cuenta la mejor alternativa para el diseño y modelado del prototipo, se debe considerar que no todos los elementos serán diseñados, algunos serán seleccionados.

Los elementos que se diseñaran y fabricaran son:

- Plataforma móvil
- Sistema de recolección de cable
- Estructura de soporte

Los elementos que deben ser seleccionados son:

- Motor
- Rodamientos
- Tornillos
- Cables

Dimensionamiento del prototipo

El dimensionamiento del prototipo se lo basó en el espacio de trabajo disponible, las dimensiones del brazo (Tabla 2-2), las características de los elementos seleccionados y

las especificaciones determinadas anteriormente. Para el diseño de poleas y tambor se requiere conocer el diámetro del cable.

5.1.1 Selección de cable

La fuerza máxima que debe soportar los cables es de 143,04 N en el mercado nacional existen gran variedad de cables para diferentes aplicaciones; dada la necesidad presentada, las dimensiones y los requerimientos especificados se selecciona un cordón de nylon con las siguientes características (Anexo B).

El cable al pasar por la polea pierde 7% de la fuerza, por lo que al pasar por 2 poleas su fuerza es la siguiente:

$$F_p = 0,07 \times 2 \times 143,04 N = 20,03 N$$

$$F = 163,07 N$$

Tabla 1-5: Propiedades de cuerda de Nylon

Material	E(MPa)	Esfuerzo de tracción (MPa/mm ²)
Nylon	1300	1372

Realizado por: Autores, 2018

Fuente: (www.king-cord.com, 2017)

El factor de seguridad que recomienda (BUDYNAS, 2008) para cables de sujeción para grúas es de 6 (Anexo C)

Calculo de la fuerza ultima que soporta un cable es:

$$W_d = 2 * n * F \tag{26}$$

Donde

W_d = carga de diseño

n =factor de seguridad sugerido

$$W_d = 2 \times 6 \times 163,07 N$$

$$W_d = 1956,84N$$

Determinación del diámetro del cable:

$$\sigma_T = W_d$$

$$1372xd^2 = 1956,84$$

$$d = 1,2mm$$

El cable es de nylon con un diámetro de $1,2mm$ y con un peso de $1,4gr/m$ (Anexo D)

5.1.2 Diseño de la polea

Para el diseño de la polea se considera el diámetro del cable y el direccionamiento hacia el tambor por lo que (BORELL, 2011) recomienda un diámetro de $20 \leq \frac{Dt}{d} \leq 60$

Calcular de los parámetros de la polea

$$Dp = 30xd$$

$$Dg = Dp - 4d \tag{27}$$

$$a = 2,8d \tag{28}$$

$$b = 2,1d \tag{29}$$

Donde:

Dp = Diámetro de la polea

Dg = Diámetro de la garganta

d = Diámetro del cable

Después de los cálculos realizados tenemos:

Diámetro de polea = 36 mm

Diámetro de la garganta = 31mm

Angulo de apertura entre los flancos 45°

$$a = 2,25mm$$

$$b = 1,7mm$$

Los valores de a y b son pequeños por lo que se considerara 2 veces el valor de a y b .
Con los datos obtenidos se selecciona una polea con las siguientes características

Material: Nylon

Diámetro exterior: 36 mm

Diámetro de garganta :29 mm

El diámetro del hueco interior de la polea es de 19 mm

Fuerza de presión: 25N/[mm]²

Análisis a condiciones normales

$$W' = W + w + W_b \quad (30)$$

Donde:

W' = Carga efectiva

W = Carga a elevar

w = Peso a elevar

W_b = Carga equivalente debido a la flexión

$$w = 1,4 \frac{gr}{m} \times 0,870m$$

$$w = 1,21 \times 10^{-3} N$$

Esfuerzo de flexión al enrollar el cable a la polea

$$\sigma_b = \frac{Et \times dw}{D} \quad (31)$$

Donde:

σ_b = esfuerzo de flexión

$Et = 3/8 E$ del material del cable. (KHURMI, y otros, 2005)

dw = Diámetro del alambre (d)

D = Diámetro de la polea

Resolviendo la ecuación (31)

$$\sigma_b = \frac{487,5 \times 1,2}{42}$$

$$\sigma_b = 13,93 \text{ MPa}$$

Esfuerzo de flexión

$$Wb = \sigma_b \times A \quad (32)$$

Donde: Área transversal del cable

$$Wb = 13,93 \text{ MPa} \times 1,13 \text{ mm}^2$$

$$Wb = 15,73 \text{ N}$$

Calculo de carga efectiva

$$W' = W + w + W_b$$

$$W' = 153,07N + 1,21 \times 10^{-3}N + 15,73N$$

$$W' = 178,80N$$

Factor de seguridad a fatiga

$$Wd_{\text{corregido}} = 1372,08 \times 1,2^2 = 1972,08N$$

$$n = \frac{Wd_{\text{corregido}}}{W'}$$

$$n = \frac{1972,08}{178,80}$$

$$n = 11$$

Durante el arranque

$$\sigma = \sigma_s + \sigma_b$$

$$W'_2 = W_{st} + W_b \quad (33)$$

$$W_{st} = 2(W + w) \quad (34)$$

Donde:

W'_2 =Carga efectiva

W_{st} = carga de impacto

W_b = carga de diseño corregida

Resolviendo las ecuaciones anteriores

$$W_{st} = 2(W + w)$$

$$W_{st} = 2(163,07N + 1,21 \times 10^{-3}N)$$

$$W_{st} = 326,14N$$

Calculo de carga efectiva

$$W'_2 = W_{st} + W_b$$

$$W'_2 = 326,14N + 15,73N$$

$$W'_2 = 341,87N$$

Factor de seguridad durante el arranque

$$n_2 = \frac{W d_{\text{corregido}}}{W'_2}$$

$$n_2 = \frac{1972,08N}{341,87N}$$

$$n_2 = 5,76$$

Durante la aceleración

$$\sigma = \sigma_s + \sigma_b + \sigma_d$$

$$W'_3 = W + w + W_b + W_a \quad (35)$$

$$W_a = \frac{W+w}{g} * a \quad (36)$$

Donde:

$W_a =$ carga por aceleración

Resolviendo las ecuaciones anteriores

$$v = 0,1128m/s$$

$$t = 2s$$

Cálculo de la aceleración

$$a = \frac{v}{t}$$

$$a = \frac{0,1128m/s}{2s}$$

$$a = 0,0141 \frac{m}{s^2}$$

Cálculo de la carga de aceleración

$$W_a = \frac{W + w}{g} * a$$

$$W_a = \frac{163,07N + 1,21 \times 10^{-3}N}{9,8 \frac{m}{s^2}} * 0,0141 \frac{m}{s^2}$$

$$W_a = 0,46N$$

Cálculo de la carga efectiva

$$W'_3 = W + w + W_{b+} + W_a$$

$$W'_3 = 163,07N + 1,21 \times 10^{-3}N + 15,73N + 0,46N$$

$$W'_3 = 179,27$$

Factor de seguridad durante la aceleración

$$n_3 = \frac{Wd_{\text{corregido}}}{W'_3}$$

$$n_3 = \frac{1972,08N}{179,27N}$$

$$n_3 = 11$$

Los factores de seguridad calculados en condiciones normales, durante el arranque y durante la aceleración son satisfactorios con el sugerido para este tipo de función (n=6)

Cálculo de la presión en la garganta de la polea y el hueco interior de la polea.

$$P_g = \frac{2x\left(\frac{U}{Fd}\right)}{dxDg} \quad (37)$$

Donde:

P_g = máxima presión en la garganta (N/mm²)

U = Resistencia a rotura del cable (N)

Fd =Factor de seguridad del cable

U/Fd = Máximo esfuerzo (N)

d = Diámetro del cable (mm)

Dg = diámetro de la garganta (mm)

$$P_d = \frac{2x\left(\frac{U}{Fd}\right)}{DbxWh} \quad (38)$$

Donde:

P_d = Presión máxima en el hueco interior de la polea

Db = Diámetro del interior de la polea (mm)

Wh = Anchura de cubo en contacto con el rodamiento (mm)

$$P_g = \frac{2x \left(\frac{U}{Fd} \right)}{dx Dg}$$

$$P_g = \frac{2x \left(\frac{1176}{6} \right)}{0,8x29}$$

$$P_g = 16,89N/mm^2$$

De acuerdo con ecuación (30) si P_g es mayor el diámetro de la polea deberá ser mayor a la seleccionada por lo que se procede a calcular la presión en el hueco interior de la polea.

$$P_d = \frac{2x \left(\frac{U}{Fd} \right)}{DbxWh}$$

$$P_d = \frac{2x \left(\frac{1176}{6} \right)}{6x19}$$

$$P_d = 3,44N/mm^2$$

La máxima capacidad de una polea de nylon es de

$$L_c = 25N/mm^2 \times dx Dg = 725N$$

$$L_c = 25N/mm^2 \times DbxWh = 1500N$$

La presión máxima es de 725N

5.1.3 Diseño del tambor

El diámetro del tambor recomendado por (BORELL, 2011) para un arrollamiento óptimo es de $20 \leq \frac{Dt}{d} \leq 60$. Considerando una relación de $\frac{Dt}{d} = 25$, el diámetro del tambor es de 28 mm.

Para calcular la longitud del tambor se considera la longitud del cable a usar por el prototipo, diámetro del tambor y diámetro del cable.

$$\# \text{ vueltas} = \frac{L_c}{\pi Dt} \quad (39)$$

$$L_t = (\# \text{ vueltas} \times d) + (\# \text{ vueltas} + 1) * 0,15d \quad (40)$$

$$A = \frac{At - Dt}{2} - B$$

Donde:

- L_t = Longitud del tambor.
- Dt = Diámetro del tambor.
- A = Profundidad de capas del tambor. Para tambores lisos es igual diámetro del cable por el número de vueltas de enrollamiento
- B = Claro de seguridad entre el cable y borde del carrete. Es recomendable que debe ser mínimo al diámetro del cable.
- B_t = Ala del tambor. Se recomienda un diámetro del cable.

Datos

- Carga = 858,24N
- $d = 1,2$ mm
- $L_c = 395$ mm
- $Dt = 30$ mm

Al resolver las ecuaciones: 32, 33 y 34 se determina las siguientes dimensiones del tambor

$$\# \text{ vueltas} = 5$$

$$L_t = 7,08\text{mm} \text{ (Longitud mínima)}$$

$$A = 1,2\text{mm} \text{ (El cable solo se enrollará una vez en el tambor)}$$

$$B = 3,2\text{mm}$$

$$B_t = 4\text{mm}$$

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

Aplicando la ecuación (33) se tiene que la longitud mínima del tambor es de $L_t = 9,66 \text{ mm}$ para este diseño considera una longitud de 22mm .

Determinación del material del tambor

El tambor al igual que el cable se desgastan mientras este se enrolla. Si la presión es alta el material se desgasta con facilidad reduciendo la vida útil del tambor y de los cables. Para el cálculo de la presión y del tambor se utiliza la siguiente fórmula. (MÉNDEZ, 2006)

$$P_t = \frac{2x \frac{U}{Fd}}{dxDt} \quad (41)$$

Donde:

P_t = Presión en el tambor

D_t = Diámetro del tambor

F_d = factor de seguridad

Resolviendo:

$$P_t = \frac{2x\left(\frac{1176}{6}\right)}{1,2x30}$$

$$P_t = 10,88N/mm^2$$

Según (MÉNDEZ, 2006) la presión máxima que puede soportar una polea o tambor de nylon es de $25 N/mm^2$ al comparar con P_t es mucho menor al sugerido por lo que se puede continuar con el diseño.

Análisis estático

Para determinar el factor de seguridad estático y de fatiga del tambor se considera las siguientes formulas tomadas de (BUDYNAS, 2008):

$$Wb = \frac{EtxdwxA}{D} \quad (42)$$

Donde:

Wb = Fuerza del cable

$Et = 3/8 E$ del material del cable. (KHURMI, y otros, 2005)

dw = diámetro del alambre

A = área transversal del cable

D = diámetro del tambor

$$n_{est} = \frac{Fu-Fb}{F} \quad (43)$$

Donde:

n_{est} = rendimiento estático

Fu = Fuerza ultima (N)

F = Fuerza máxima que soporta el cable (N)

Al resolver las ecuaciones 36 y 37 se determina lo siguiente:

$$Fb = \frac{Et dx dA}{Dt}$$

$$Et = 1400N/mm^2 \text{ (ANEXO B)}$$

$$dw = d$$

$$A = 1,14 \text{ mm}^2$$

$$Fb = \frac{525 \text{ N/mm}^2 \times 1,2 \text{ mm} \times 1,14 \text{ mm}^2}{30 \text{ mm}}$$

$$Fb = 30,24 \text{ N}$$

$$n_{est} = \frac{978,42 - 81,02}{163,07}$$

$$n_{est} = 5,81$$

El análisis estático es satisfactorio pues es similar al valor sugerido en el (ANEXO C)

Análisis Dinámico

El tambor está sometido a esfuerzos de compresión, torsión y flexión; se analizará de acuerdo a las siguientes ecuaciones.

$$\sigma_f = 9,6xSx^4 \sqrt{\frac{1}{h^6xDt^2}} \quad (44)$$

Donde:

σ_f = Esfuerzo a flexión

S = Tracción del cable

h = espesor del tambor

Dt = Diámetro del tambor

$$\sigma_c = 0,85 \frac{S}{hxs} \quad (45)$$

Donde:

σ_c = Esfuerzo a compresión

S = Tracción del cable

s = paso de enrollamiento

$$\sigma_{ca} = 0,5 \frac{S}{hxs} \quad (46)$$

Donde:

σ_{ca} = Esfuerzo a compresión en los extremos del tambor

h = espesor del tambor

Dt = Diámetro del tambor

Al resolver las ecuaciones 38, 39 y 40 tomando en cuenta los valores de h , S y s se determinan los siguientes valores de esfuerzo:

$$h = 28mm$$

$$S = 163,09N \text{ (Se considera } 2 F_{cable})$$

$$s = 1,47mm$$

$$\sigma_c = 0,85 \frac{326,18N}{30mm \times 1,38mm} = 6,69N/mm^2$$

$$\sigma_f = 9,6 \times 326,18N \times \sqrt[4]{\frac{1}{(30mm)^6 \times (30mm)^2}} = 3,478N/mm^2$$

$$\sigma_{ca} = 0,5 \frac{326,18N}{30mm \times 1,38mm} = 3,94N/mm^2$$

El esfuerzo del nylon es de 78 N/mm² (Tabla 4-2) por lo que al comparar los esfuerzos calculados se demuestra que el tambor resiste satisfactoriamente los esfuerzos a los que será sometido.

La distancia de un tambor liso respecto a la polea se lo calcula mediante la siguiente ecuación:

$$L_{lis} = \frac{Dt}{2} \text{ctag}(2^\circ) \quad (47)$$

Al resolver se obtiene:

$$L_{lis} = \frac{28}{2} \text{ctag}(2^\circ)$$

$$L_{lis} = 400,90mm$$

L_{lis} es demasiado grande por lo que se diseña un tornillo de nivel que permita que el cable se enrolle en el tambor de manera correcta.

5.1.3.1 Fuerzas de reacción en el eje de tambor

La relación de diámetros adecuada de un eje es de 1,5 (BUDYNAS, 2008).

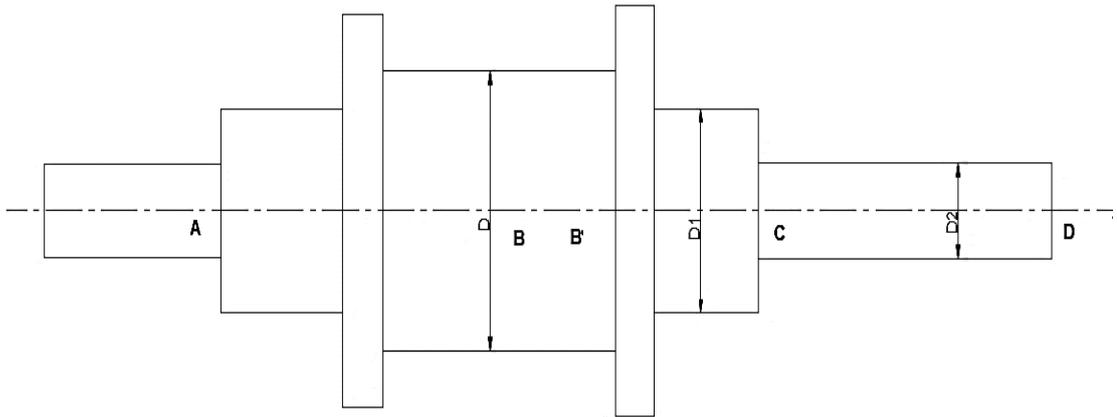


Figura 1-5: Esquema de diámetros del tambor

Fuente: Autores

$$D = 30mm$$

$$D_1 = 18mm$$

$$D_2 = 12mm$$

El tambor está diseñado como un eje por lo que una vez determinada las dimensiones se comprueba que sea capaz de soportar los esfuerzos a los que está sometido mediante el cálculo del factor de seguridad.

Para determinar las reacciones en los rodamientos no se considera el peso del tambor y del cable porque es demasiado pequeña, sin embargo, se toma en cuenta la fuerza máxima que ejerce el cable sobre el tambor y la torsión del motor. Para determinar las reacciones máximas que puede tener el tambor se analiza en 2 posiciones, cuando el cable está en la parte central y el otro en el extremo

$$F_{cable} = 163,09N$$

$$T_{motor} = 970,2 \text{ N mm}$$

$$W_{tambor} = 25gr$$

$$W_{cable} = 0,932 \text{ gr}$$

Primera posición

Fuerza en el plano x-y

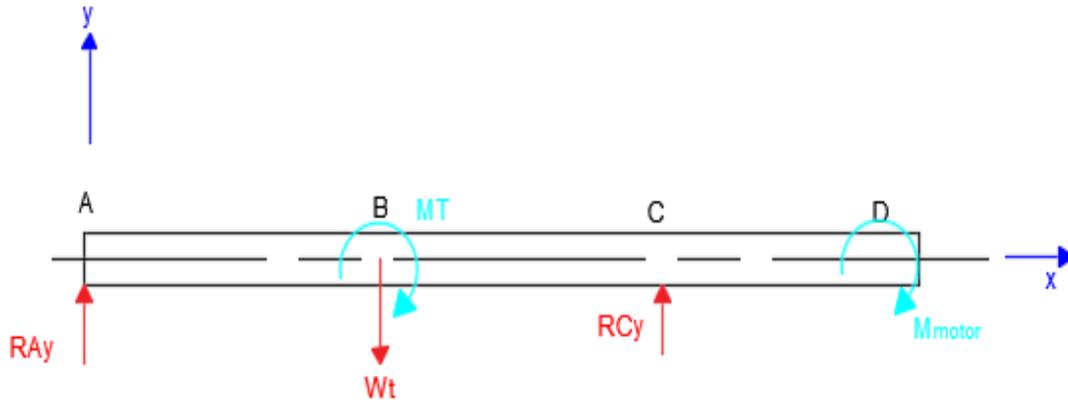


Figura 2-5: Fuerzas en el plano x-y en el tambor

Fuente: Autores

Fuerzas en el plano x-z

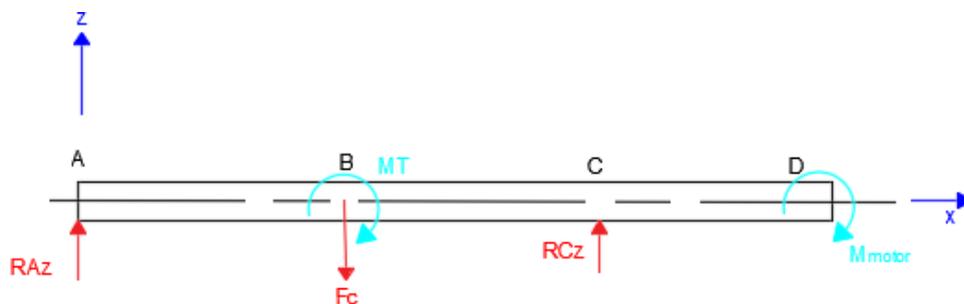


Figura 3-5: Fuerzas en el plano x-z en el tambor

Fuente: Autores

Plano x-y

El peso tanto del cable como del tambor son muy pequeños por lo que se desprecian para la realización del cálculo, entonces las reacciones en los puntos A y C son casi nulas.

Plano x-z

Se aplica sumatoria de momentos en el punto A del plano x-z

$$\Sigma M_A = 0$$

$$163,05 \text{ N}(32\text{mm}) - RB_z(64\text{mm}) = 0$$

$$RB_z = \frac{163,05 \text{ N}(32\text{mm})}{(64\text{mm})}$$

$$RB_z = 81,52\text{N}$$

Al aplicar sumatoria de fuerzas en el eje z se termina que la reacción en A

$$\Sigma F_z = 0$$

$$RA_z + RB_z - F_c = 0$$

$$RA_z = 81,525\text{N}$$

Diagrama de cortantes y momentos.

Con las reacciones determinadas se realiza el diagrama de cortantes y de momentos para su representación se utiliza el software AutoCAD.

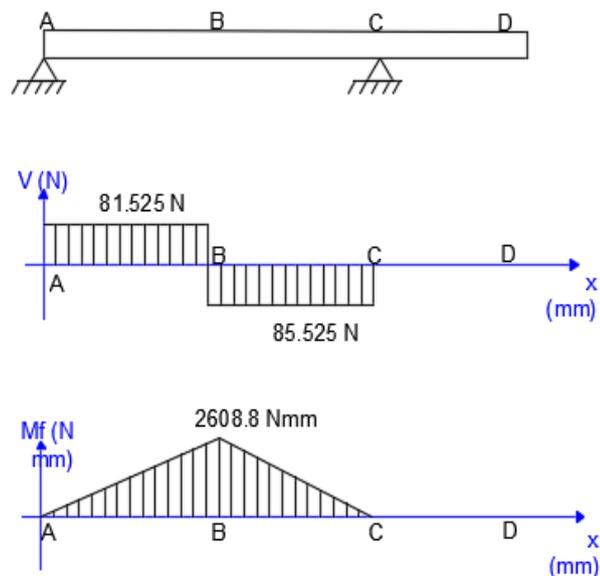


Figura 4-5: Diagrama de fuerza y esfuerzos en el plano x-y del tambor

Fuente: Autores

Momento resultante. Se determina que el punto B es el más crítico

$$M_{RB} = \sqrt{MB_{XY}^2 + MB_{XZ}^2}$$

$$M_{RB} = \sqrt{(0Nmm)^2 + (2608,9Nmm)^2}$$

$$M_{RB} = 2608,9 Nmm$$

Segunda posición

Fuerzas en el plano x-y

Mostradas en la Figura 5-5 describen el sentido y los puntos de aplicación de cada una de ellas a lo largo del eje x

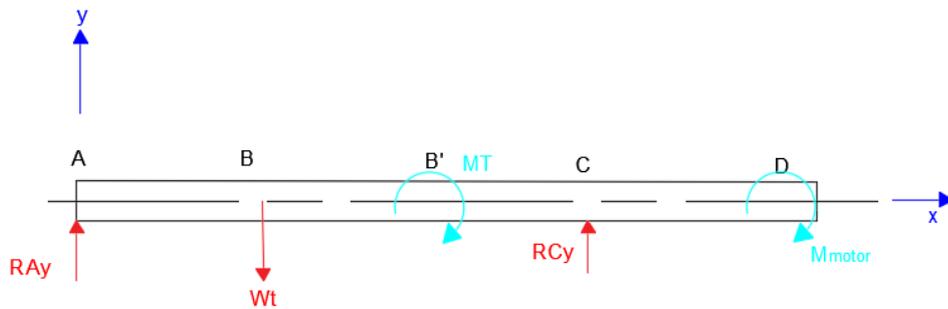


Figura 5-5: Fuerzas en el plano x-y en el tambor

Fuente: Autores

Fuerzas en el plano x-z

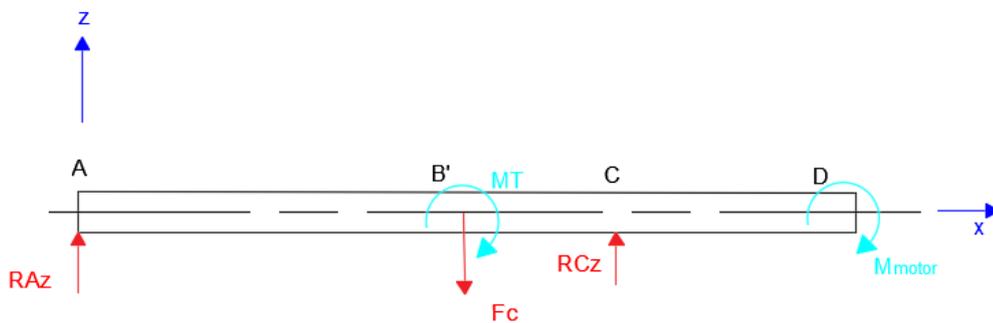


Figura 6-5: Fuerzas en el plano x-z en el tambor

Fuente: Autores

Plano x-y

El peso del cable y tambor son muy pequeños por lo que se desprecian para el cálculo, entonces las reacciones en A y C son casi nulas.

Plano x-z

Se aplica sumatoria de momentos en el punto A del plano x-z

$$\Sigma M_A = 0$$

$$163,05 \text{ N}(42\text{mm}) - RB_z(64\text{mm}) = 0$$

$$RB_z = \frac{163,05 \text{ N}(42\text{mm})}{(64\text{mm})}$$

$$RB_z = 110,45 \text{ N}$$

Al aplicar sumatoria de fuerzas en el eje z se termina que la reacción en A

$$\Sigma F_z = 0$$

$$RA_z + RB_z - F_c = 0$$

$$RA_z = 52,6 \text{ N}$$

Diagrama de cortantes y momentos.

Con las reacciones determinadas se realiza el diagrama de cortantes y de momentos para su representación se utiliza el software AutoCAD.

Plano x-z

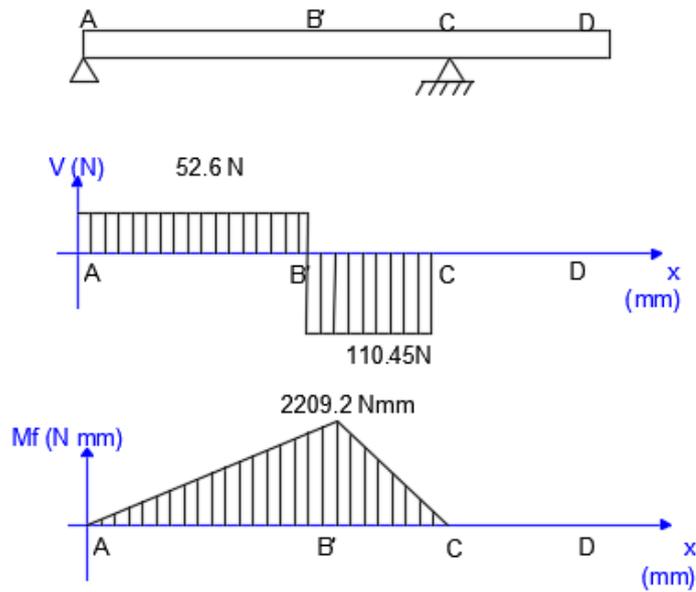


Figura 7-5: Diagrama de fuerza y esfuerzos en el plano x-z del tambor

Fuente: Autores

Momento resultante. Se determina que el punto B es el más crítico

$$M_{RB} = \sqrt{M_{B_{XY}}^2 + M_{B_{XZ}}^2}$$

$$M_{RB} = \sqrt{(0\text{Nmm})^2 + (2608,9\text{Nmm})^2}$$

$$M_{RB} = 2209,2 \text{ Nmm}$$

Al analizar la fuerza de reacción y momentos flectores en el eje se determina que en la posición dos se producen los valores más elevados además el punto crítico es en B que es donde se enrolla el cable, al realizar el análisis estático y dinámico al tambor se determina que es capaz de soportar las cargas a las que están sometido.

$$R_A = \sqrt{(A_y)^2 + (A_z)^2} = \sqrt{(0)^2 + (52,6\text{N})^2} = 52,6\text{N}$$

$$R_C = \sqrt{(C_y)^2 + (C_z)^2} = \sqrt{(0)^2 + (110,45)^2} = 110,45\text{N}$$

5.1.4 *Diseño de resortes a tracción*

Los resortes se utilizan para mantener la tensión e los cables en el momento del movimiento.

$$F_{max} = 163,07 \text{ N}$$

$$F_{min} = 4,57 \text{ N}$$

$$\Delta\delta = 14\text{mm}$$

Datos para el resorte

Material: Alambre de piano

$$m = 0,145 \text{ (Anexo E)}$$

$$A = 1855 \text{ GPa mm}^m$$

$$d = 1\text{mm}$$

$$D_{ext} = 10\text{mm}$$

$$G = 81,7 \text{ GPa (Anexo F)}$$

$$E = 29,5 \text{ GPa (Anexo F)}$$

Cálculo de parámetros principales del resorte

$$D = D_{ext} - d \tag{49}$$

Donde:

D_{ext} . Diámetro del resorte

d : diámetro del alambre

$$D = 10\text{mm} - 1\text{mm} = 9\text{mm}$$

Índice del resorte

$$C = \frac{D}{d} \quad (50)$$

Donde:

C: Índice del resorte

$$C = \frac{9\text{mm}}{1\text{mm}} = 9$$

Efectos de curvatura

$$K_B = \frac{4C + 2}{4C - 3} \quad (51)$$

$$K_B = \frac{4(9) + 2}{4(9) - 3}$$

$$K_B = 1,15$$

Índice del resorte

La fuerza se divide para dos porque se utiliza dos resortes

$$k = \frac{\Delta F}{\Delta \delta}$$

$$k = \frac{79,75\text{N}}{14\text{mm}}$$

$$k = 5,69\text{N/mm}$$

Numero de espiras activas

$$N_a = \frac{d^4 * G}{8kD^3} \quad (52)$$

Donde:

d: Diámetro del alambre

G: módulo de rigidez del alambre

k: Constante eléctrica del alambre

D: Diámetro del resorte

El número de espiras calculados es muy pequeño por lo que se consideró 20 espiras (resortes existentes en el mercado con estas características)

$$N_b = N_a - \frac{G}{E} \quad (53)$$

Donde:

Na= espiras activas del resorte

E: Modulo de elasticidad

$$N_b = 22,77$$

Longitud libre

$$L_0 = 2(D - d) + (N_b + 1)d \quad (54)$$

$$L_0 = 39,77mm$$

Deflexión de la carga

$$Y_{max} = \frac{F_{max} - F_{min}}{k} \quad (55)$$

$$Y_{max} = \frac{163,07N - 4,57N}{528,6 N/mm}$$

$$Y_{max} = 0,299mm$$

Longitud del resorte

$$L = L_o + Y_{max} \quad (56)$$

$$L = 39,77mm + 0,299mm$$

$$L = 40,07mm$$

Esfuerzo ultimo

$$S_{ut} = \frac{A}{d^m} \quad (57)$$

$$S_{ut} = \frac{1855}{0,001^{0,145}}$$

$$S_{ut} = 6,019GPa$$

Esfuerzo último al corte

$$S_{su} = 0,67S_{ut}$$

$$S_{su} = 0,67 \times 6,019$$

$$S_{su} = 4,032 GPa$$

Fatiga en el cuerpo del resorte

$$F_a = \frac{F_{Max} - F_{Min}}{2}$$

$$F_a = \frac{163,07N - 4,57N}{2}$$

$$F_a = 39,635N$$

$$F_m = \frac{F_{Max} + F_{Min}}{2}$$

$$F_m = \frac{163,07N + 4,57N}{2}$$

$$F_m = 41,91 N$$

$$\tau_a = \frac{8k_B F_a D}{\pi d^3} \quad (58)$$

$$\tau_a = \frac{8 \times 1,15 \times 39,635 \times 0,009}{\pi \times 0,001^3}$$

$$\tau_a = 1,044 GPa$$

$$\tau_m = \frac{F_m}{F_a} \tau_a \quad (59)$$

$$\tau_m = \frac{41,91 N}{39,635 N} 1,044 GPa$$

$$\tau_m = 1,1042 GPa$$

Usando Zimmerli

$$S_{se} = \frac{S_{sa}}{1 - \left(\frac{S_{sm}}{S_{su}}\right)^2} \quad (60)$$

Donde:

$$S_{sa} = 45 Kpsi \text{ (Anexo G)}$$

$$S_{sm} = 75 Kpsi \text{ (Anexo G)}$$

$$S_{se} = \frac{0,31 \text{ Gpas}}{1 - \left(\frac{0,379 \text{ Gpas}}{4,032 \text{ Gpas}}\right)^2}$$

$$S_{se} = 0,1913 \text{ GPa}$$

Aplicando el criterio de falla de Gerber para el cortante:

$$n_{f(\text{cuerpo})} = \frac{1}{2} \left(\frac{S_{su}}{T_m}\right)^2 \frac{T_a}{S_{se}} \left[-1 + \sqrt{1 + 2 \left(\frac{T_m}{S_{su}} \frac{S_{se}}{T_a}\right)^2} \right] \quad (61)$$

$$n_{f(\text{cuerpo})} = \frac{1}{2} \left(\frac{4,032}{41,91}\right)^2 \frac{1,044}{0,0193} \left[-1 + \sqrt{1 + 2 \left(\frac{1,104}{4,032} \frac{0,1913}{1,044}\right)^2} \right]$$

$$n_{f(\text{cuerpo})} = 2,57$$

Fatiga por flexión del gancho

$$\sigma_a = F_a \left[K_A \frac{16D}{\pi d^3} + \frac{4}{\pi d^2} \right] \quad (62)$$

$$K_A = \frac{4C_1^2 - C_1 - 1}{4C_1(C_1 - 1)} \quad (63)$$

$$r_i = \frac{D-d}{2} \quad (64)$$

$$C_1 = \frac{2r_i}{d} \quad (65)$$

Resolviendo las ecuaciones 62, 63 y 65

$$C_1 = 2 * \frac{4}{1} = 8$$

$$K_A = \frac{4 * 8^2 - 8 - 1}{4 * 8(8 - 1)} = 1,1$$

$$\sigma_a = 39,625 \left[1,1 \frac{16 * 9}{\pi * 1^3} + \frac{4}{\pi * 1^2} \right]$$

$$\sigma_a = 2,048 GPa$$

$$\sigma_m = \frac{F_m}{F_a} \sigma_a$$

$$\sigma_m = \frac{41,91 N}{39,635 N} * 2,048 GPa$$

$$\sigma_m = 2,166 GPa$$

$$S_e = \frac{0,1913 GPa}{0,577}$$

$$S_e = 0,334 GPa$$

Aplicando criterio de Gerber

$$n_f = \frac{1}{2} \left(\frac{S_{ut}}{\sigma_m} \right)^2 \frac{\sigma_a}{S_e} \left[-1 + \sqrt{1 + 2 \left(\frac{\sigma_m}{S_{ut}} \frac{S_e}{\sigma_a} \right)^2} \right]$$

$$n_f = \frac{1}{2} \left(\frac{6,019}{2,166} \right)^2 \frac{2,048}{0,334} \left[-1 + \sqrt{1 + 2 \left(\frac{2,166}{6,019} \frac{0,334}{2,048} \right)^2} \right]$$

$$n_f = 1,4$$

Fatiga a torsión el gancho

$$\tau_a = 1,044 GPa$$

$$\tau_m = 1,1042 GPa$$

$$n_f = \frac{1}{2} \left(\frac{S_{ut}}{\sigma_m} \right)^2 \frac{\sigma_a}{S_e} \left[-1 + \sqrt{1 + 2 \left(\frac{\sigma_m}{S_{ut}} \frac{S_e}{\sigma_a} \right)^2} \right]$$

$$n_f = \frac{1}{2} \left(\frac{4,032}{41,91} \right)^2 \frac{1,044}{0,0193} \left[-1 + \sqrt{1 + 2 \left(\frac{1,104}{4,032} \frac{0,1913}{1,044} \right)^2} \right]$$

$$n_f = 1,8$$

5.1.5 Diseño de la plataforma móvil

La plataforma móvil está sometida directamente a la carga útil, por lo que debe ser resistente y capaz soportar los esfuerzos producidos en la variación de posiciones y orientación del efector final. Para facilitar el movimiento se considera materiales livianos y resistentes.

Efector final. Para la sujeción de la mano se toma 2 posibilidades

- 1.- En forma esférica de manera que el usuario sostenga el efector final en el momento de su uso.
- 2.- En forma de manija, de modo que la persona pueda sujetar mientras la plataforma se mueve a las posiciones.

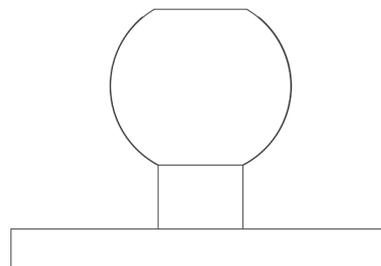


Figura 8-5: Plataforma móvil con mango esférico

Fuente: Autores

Dimensiones del efector final. Las dimensiones de los sujetadores se los especifica usando las dimensiones de la mano detalladas en la tabla 3-2.

Donde

$L_m = 100 \text{ mm}$ (Longitud de colocación de los dedos)

$Altura = 60 \text{ mm}$ (Altura del mango)

$D = 60 \text{ mm}$ (Diámetro de la esfera)

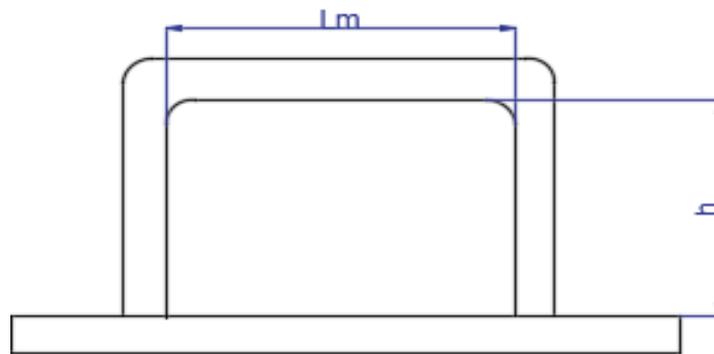


Figura 9-5: Plataforma móvil con mango

Fuente: Autores

Base de la plataforma. La base es de forma circular con un diámetro de 150 mm de manera que se puedan acoplar los sujetadores y varios componentes. Hecho de madera con espesor de 12 mm .

Para que la plataforma se mueva con facilidad se colocan 4 ruedas locas de 12 mm de diámetro en la base, permitiendo que se muevan en todas direcciones.

La carga útil que soporta la plataforma es de $37,85 \text{ N}$

5.1.6 *Diseño de la plataforma fija*

La carga útil que manipula el robot es de 4 Kg y la carga muerta que debe soportar es de $3,5 \text{ Kg}$ donde está considerado el peso del efector final, motores y elementos electrónicos. Para que el robot maniobre de manera correcta y sea fácil de utilizar es necesario que el efector final sea ligero y su estructura resistente. El soporte de la plataforma es tubo cuadrado de acero estructural A36 capaz de soportar los esfuerzos y

cargas aplicadas por el efector final, la superficie de la plataforma es de madera para facilitar el acople de los componentes del sistema de recolección de cable.

La plataforma debe tener las siguientes posiciones:

- Horizontal: Es asegurado con un perno de sujeción en la parte extrema en dos lados de la plataforma para inmovilizarlo.
- Inclinación a 45° Se acopla un eje central a la plataforma acopladas a la estructura mediante chumaceras para facilitar el giro.

Diseño del eje central

Para el diseño del eje se considera la carga útil, peso de la plataforma móvil, plataforma fija y el peso de los motores, se traslada las fuerzas que actúan en la plataforma al eje haciendo uso del principio de transmisibilidad. Debido a que el efector final varía su posición se analiza en la posición de estudio 3, definida previamente puesto que además de las cargas consideradas, se provoca un momento en alrededor del eje x de $18,01 Nm$.

La figura 19-5 muestra las fuerzas que actúan en el eje y ayuda a realizar los cálculos necesarios para determinar las dimensiones necesarias para soportar las cargas a las que el eje está sujeto.

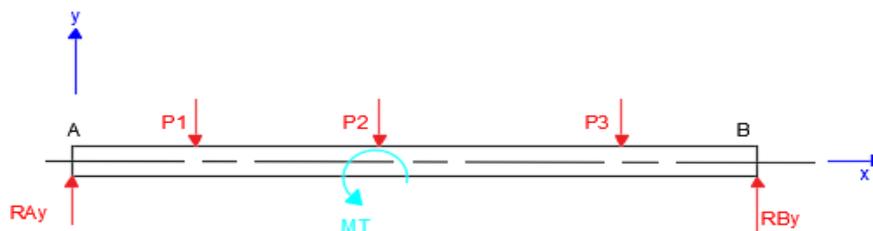


Figura 10-5: Diagrama de fuerzas y esfuerzos en el plano x-y del eje central

Fuente: Autores

Se procede a calcular las reacciones en el punto A y E.

P_1 = Peso de los Wincher de los extremos

P_2 = Peso del brazo, plataforma móvil y fija

P_3 = Peso de los Wincher de los externos

T = Torque generado cuando el actuador se encuentra a 250 mm del centro

Plano x-y

Se aplica sumatoria de momentos en el punto A del plano x-y

$$\Sigma M_A = 0$$

$$14,7\text{ N}(50\text{mm}) + 58,8\text{N}(390\text{mm}) + 14,7\text{N}(730\text{mm}) - RB_y(780\text{mm}) = 0$$

$$RB_y = \frac{34398\text{ Nmm}}{(780\text{mm})}$$

$$RB_y = 44,1\text{N}$$

Al aplicar sumatoria de fuerzas en el eje y se termina la reacción en A

$$\Sigma F_y = 0$$

$$RA_y + RB_y - P_1 - P_2 - P_3 = 0$$

$$RA_y = 44,10\text{N}$$

Diagrama de cortantes y momentos.

Con las reacciones determinadas se realiza el diagrama de cortantes y de momentos para su representación se utiliza el software AutoCAD

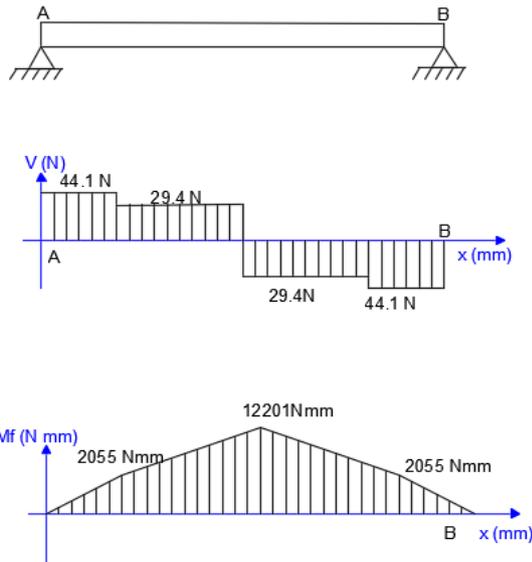


Figura 11-5: Diagrama de cortantes y momentos en el plano x-y del eje central

Fuente: Autores

El eje no se encuentra girando todo el tiempo, por lo se analiza como un eje sometido a flexión sin embargo el momento torsor generado no se lo puede despreciar. Para determinar el diámetro del eje se utiliza el criterio de Von-Misses por ser un material dúctil con un factor de seguridad de 3.

Acero inoxidable AISI 304: $S_y = 310 \text{ MPa}$

$$\sqrt{(\sigma_f + \sigma_c)^2 + 3\tau_{xy}^2} = \frac{S_y}{n}$$

Cálculo del esfuerzo por flexión:

$$\sigma_f = \frac{32xM_{max}}{\pi x d^3}$$

$$\sigma_f = \frac{32x(12201 \text{ Nmm})}{\pi x d^3}$$

Reemplazando en la ecuación de Von-Misses:

$$\sqrt{\left(\frac{32x(12201 \text{ Nmm})}{\pi x d^3}\right)^2} = \frac{310}{3}$$

$$d = 10,63mm$$

El diámetro mínimo que debe tener el eje para soportar la carga es de $12mm$.

Se colocan chumaceras para lograr un giro parcial de la plataforma por lo que el diámetro máximo del eje es de $15mm$ y el diámetro donde se montan las chumaceras es de $12mm$.

Selección de chumaceras.

Con el diámetro del eje determinado se realiza la selección de la chumacera, luego de un análisis de las cargas que se encuentra sobre el eje se selecciona rodamientos de bolas rígidas del CATALOGO NTN.

La chumacera seleccionada es UCP201D1 con un diámetro de $12mm$ vea en el (ANEXO H)

$$C_r = 12,8 \text{ kN carga dinámica}$$

$$C_{or} = 6,65 \text{ kN carga estática}$$

El eje no se encuentra en movimiento continuo por lo que el análisis adecuado para esta aplicación es a carga estática para lo que se utiliza la siguiente formula establecida en el catálogo del fabricante.

$$C_{or} = fsxPo \tag{66}$$

Donde:

C_{or} = capacidad estática radial (kN)

fs = factor de servicio

P_o = Carga estática equivalente máxima (kN)

Para calcular de P_o se utiliza la siguiente formula. (ANEXO I)

$$P_o = X_o F_r + Y_o F_a \quad (67)$$

Teniendo las siguientes consideraciones (ANEXO J)

$$X_o = 0,6$$

$$Y_o = 0,5$$

$$F_r = 44,10 \text{ N}$$

$$f_s = 1 \text{ (ANEXO K)}$$

Entonces:

$$P_o = (0,6) \times 44,10 \text{ N}$$

$$P_o = 0,032 \text{ KN}$$

$$C_{or} = 1 \times 0,032$$

$$C_{or} = 0,032 \text{ KN}$$

$$C'_{or} < C_{or}$$

Por lo tanto, los rodamientos soportan y no sufrirá ningún daño en el momento de su uso.

5.1.7 Estructura

La estructura posee un sistema de elevación por tijeras elevado por un tornillo de potencia que se encuentra en su parte inferior.

Sistema de elevación

De acuerdo a la ubicación de uso del prototipo la altura debe variar desde 350 mm hasta 850 mm desde el nivel del piso. Al tener determinada las longitudes del espacio de trabajo.

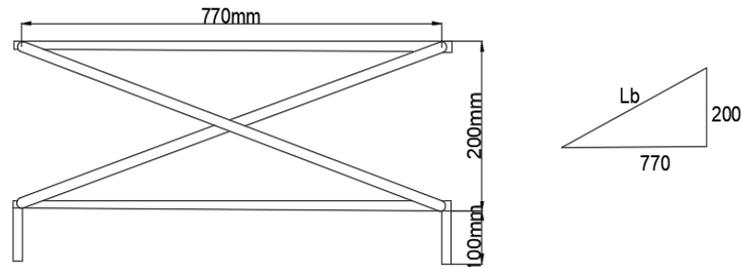


Figura 12-5: Sistema de elevación en posición más baja

Fuente: Autores

Luego de aplicar el teorema de Pitágoras se determina el valor de la longitud de la barra lateral.

$$L_{barra} = \sqrt{770^2 - 200^2}$$

$$L_{barra} = 795,5mm$$

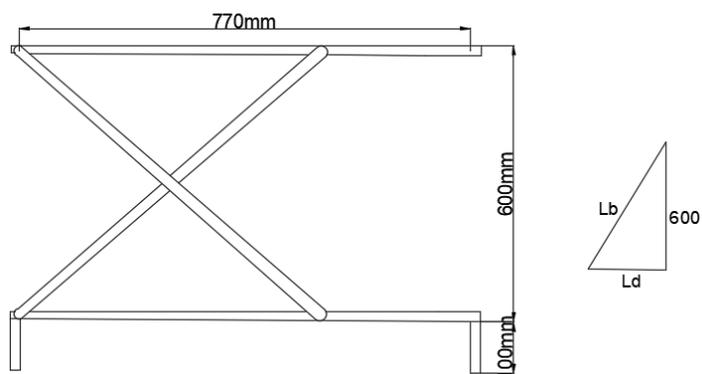


Figura 13-5: Sistema de elevación en la posición más elevada

Fuente: Autores

Para determinar el desplazamiento horizontal de la barra

$$L_d = \sqrt{L_{barra}^2 - 600^2}$$

$$L_d = \sqrt{796^2 - 600^2}$$

$$L_d = 523,1mm$$

Se coloca 2 pares de guías deslizantes un par en la parte inferior y otro en la parte superior.

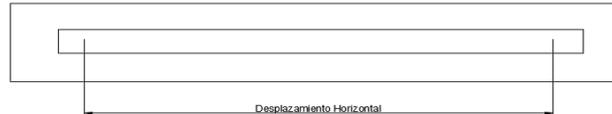


Figura 14-5: Desplazamiento total del sistema

Fuente: Autores

$$D_H = 770mm - L_d$$

$$D_H = 770mm - 523mm$$

$$D_H = 247mm$$

5.1.7.1 Análisis estructural del soporte

La estructura tiene que soportar el sistema de plataformas y la carga útil aplicada, utilizando el software SAP2000, se determina la resistencia y se verifica que la relación *demanda/capacidad* de la estructura sea menor a la unidad.

Los perfiles utilizados son:

Componente	Descripción	Material
Estructura superior e inferior	TC 40*40*1.1	Acero ASTM A36
Sistema de tijeras	PT 40*5	Acero ASTM A36

Tabla 2-5: Perfiles de la estructura

Realizado por: Autores, 2018

Las cargas aplicadas en la estructura son:

- Peso del sistema de recolección del cable: 7,35 N
- Peso de la plataforma móvil: 2,1 N

El peso de las plataformas se determina mediante el software SOLIDWORKS una vez determinada el material, forma y componentes que posee cada uno se define la carga viva que es igual a el peso de la persona y de la plataforma móvil con un valor de 40 N para el análisis. A continuación, se muestra los diagramas de fuerzas y momentos a los que la estructura está sometida y se verifica que la estructura cumpla con la relación *demanda/capacidad*.

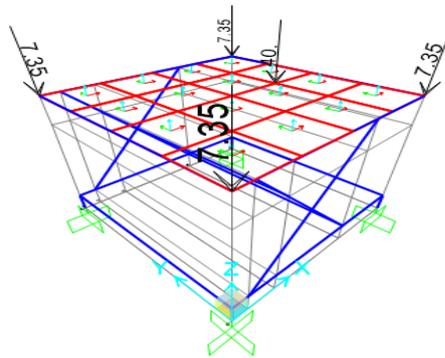


Figura 15-5: Aplicación de cargas en la estructura

Realizado por: Autores, 2018

Diagrama de cortantes

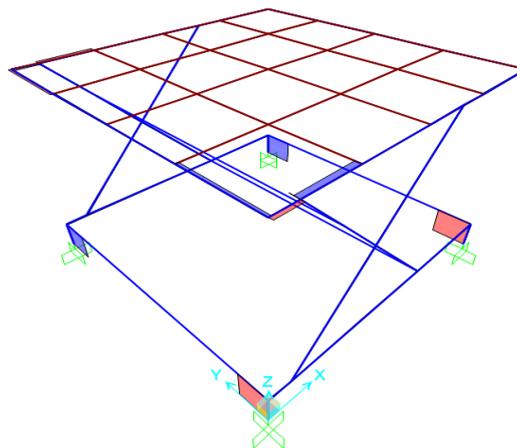


Figura 16-5: Diagrama de cortantes

Realizado por: Autores, 2018

Diagrama de momentos

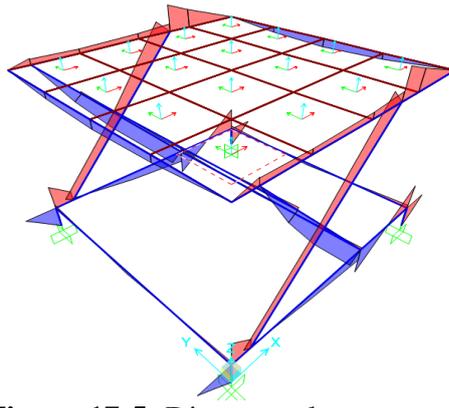


Figura 17-5: Diagrama de momentos

Realizado por: Autores, 2018

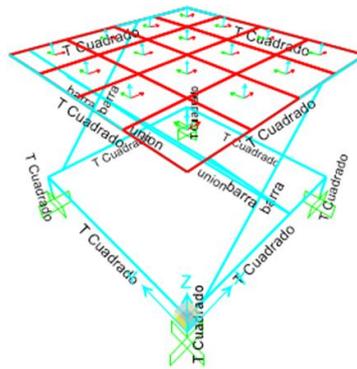


Figura 18-5: Resultado demanda capacidad

Realizado por: Autores, 2018

Gráficamente se muestra que ninguno de los elementos de la estructura se encuentra con un valor de carga superior al que puede soportar cada uno de ellos por lo que la relación demanda/capacidad se cumple sin problemas.

5.1.7.2 Diseño del tornillo de potencia.

Para el diseño del tornillo de potencia se considera el peso que debe soportar toda la estructura la longitud que debe recorrer la tuerca, el material del que está hecho y la longitud de la palanca que no debe tener mucha fricción en el momento de elevar el sistema de plataformas.

La elación del sistema se lo realiza de manera manual por lo que la fuerza máxima que puede emplear una persona en la palanca es de 40 N.

El tornillo de potencia es de rosca ACME las ecuaciones a utiliza son:

Torque para subir la carga

$$T_s = \frac{F \cdot dm}{2} \left(\frac{\mu \pi d_m \operatorname{Sec}(14,5^\circ) + \rho}{\pi d_m - \mu \rho} \right) + \frac{F d_c \mu_c}{2} \quad (65)$$

Torque para bajar la carga

$$T_b = \frac{F \cdot dm}{2} \left(\frac{\mu \pi d_m \operatorname{Sec}(14,5^\circ) - \rho}{\pi d_m - \mu \rho} \right) + \frac{F d_c \mu_c}{2} \quad (66)$$

Donde:

dm = Diámetro medio

μ = Coeficiente de fricción.

μ_c = Coeficiente de fricción entre el tornillo y la tuerca

d_c = Diámetro del collarín

ρ =paso

Se considera que el diámetro del tornillo es de ½ pulg con un paso de 0,1 pulg el coeficiente estático y cinemático son (ANEXO L):

$At = 0,142$ pulg

$dt = 0,425$ pulg

$\mu = 0,15$

$\mu_c = 0,02$

$F = 145\text{N} = 0,035745$ Kips

El diámetro medio se lo calcula con la siguiente ecuación:

$$d_m = de - \frac{\rho}{2} \quad (67)$$

$$d_m = 0,5 - \frac{0,1}{2}$$

$$d_m = 0,45 \text{ pulg}$$

El torque de subida y de bajada es:

$$T_s = \frac{0,035745 * 0,5}{2} \left(\frac{0,15 * \pi * 0,45 \text{Sec}(14,5^\circ) + 0,1}{\pi * 0,45 - (0,15 * 0,1)} \right) + \frac{0,035745 * 0,5 * 0,02}{2}$$

$$T_s = 2,22 \text{ lb.pulg}$$

$$T_b = \frac{0,035745 * 0,5}{2} \left(\frac{0,15 * \pi * 0,45 \text{Sec}(14,5^\circ) - 0,1}{\pi * 0,45 - (0,15 * 0,1)} \right) + \frac{0,035745 * 0,5 * 0,02}{2}$$

$$T_b = 2,65 \text{ lb.pulg}$$

Autobloqueo

1.- $T_b > 0$

2. $\mu > \tan \lambda \text{ Cos } 14.5^\circ$

3. $\tan \lambda = \frac{\rho}{\pi d_m}$

$$\tan \lambda = \frac{0,1}{\pi * 0,45}$$

$$\tan \lambda = 0,07$$

Se realiza las comparaciones por lo que se tiene que este sistema si tiene autobloqueo

$$\mu > \tan\lambda \text{ Cos } 14.5$$

$$0,15 > 0,067$$

Eficiencia

$$T_0 = \frac{F \times r}{2\pi} \quad (68)$$

$$n = \frac{T_0}{T_s} \quad (69)$$

Donde:

T_0 = Torque de subida con fricción

$$T_0 = \frac{0,035745 \times 0,1}{2\pi}$$

$$T_0 = 0,57 \text{ lbf} \cdot \text{pulg}$$

$$n = \frac{0,57 \text{ lbf} \cdot \text{pulg}}{2,22 \text{ lb} \cdot \text{pulg}}$$

$$n = 0,256$$

$$n = 26\%$$

Análisis de resistencia

La longitud del tornillo es de 0,92m por lo que se considera que si hay flexión y torsión.

Para determinar la longitud de la palanca tenemos que se utiliza una fuerza mínima de 20N la longitud de la palanca se determina con la siguiente ecuación:

$$Lt = \frac{T_s}{F_e} \quad (70)$$

Donde:

L_t =longitud de palanca

F_e = Fuerza exterior

$$L_t = \frac{2,22 \text{ lbf} \cdot \text{pulg}}{4,49 \text{ lbf}}$$

$$L_t = 0,5 \text{ pulg}$$

La longitud necesaria es mínima ya que la carga a ser elevada no es muy grande, y para facilitar el uso se emplea una palanca de 100 mm de longitud.

A continuación, se muestra el análisis de esfuerzos a los que está sometido el tornillo y comprobar su resistencia o no al momento de entrar en funcionamiento.

Flexión

$$\sigma_{ft} = \frac{32xM}{\pi Xx^3} \quad (71)$$

$$\sigma_{ft} = \frac{32x4,47x(34,252 \text{ pulg})}{\pi x0,425^3}$$

$$\sigma_{ft} = 20,315 \text{ Ksi}$$

Torsión

$$T = \frac{16xT_{max}}{\pi x d_t^3} \quad (72)$$

$$T = \frac{16x2,2 \text{ lbf} \cdot \text{pulg}}{\pi x0,425^3}$$

$$T = 0,145 \text{ Ksi}$$

Coefficiente de seguridad

El material del tornillo es AISI 1040 con un $S_y=54$ Ksi (ANEXO M)

$$\sqrt{\sigma_{ft}^2 + 3\tau_{xy}^2} = \frac{S_y}{n}$$

$$\sqrt{(20,315)^2 + 3(0,145)^2} = \frac{54}{n}$$

$$n = 2,65$$

Diseño de la tuerca

La tuerca se analiza a cizalla, aplastamiento y flexión para determinar la longitud de la tuerca se considera un factor de seguridad de 6.

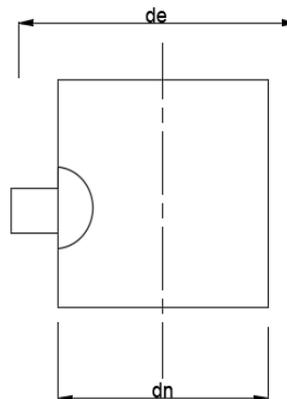


Figura 19-5: Tuerca

Fuente: (BUDYNAS, 2008)

Cizalla

$$\mathcal{J} = \frac{2F}{\pi x d e x H} = \frac{S_y}{n} \quad (73)$$

$$\frac{2x0,0357}{\pi x 0,5xH} = \frac{0,5x54}{6}$$

$$H = 0,01 \text{ pulg}$$

Aplastamiento

$$\sigma = \frac{4x\rho xF}{\pi x(de^2 - dn^2)xH} = \frac{Sy}{n} \quad (74)$$

$$\sigma = \frac{4x\rho xF}{\pi x(de^2 - dn^2)xH} = \frac{Sy}{n} \quad (75)$$

$$\frac{4x0,1x0,0357}{\pi x(0,5^2 - 0,4^2)xH} = \frac{54}{6}$$

$$H = 0,0056 \text{ pulg}$$

Flexión

$$\sigma = \frac{6F}{\pi xdmxH} = \frac{Sy}{n} \quad (76)$$

$$\frac{6x0,0357}{\pi x0,45xH} = \frac{54}{6}$$

$$H = 0,019 \text{ pulg}$$

Como vemos la longitud de la tuerca es demasiado pequeña debido a que la carga no es elevada por lo que decide poner una longitud de 10 mm.

5.2 Diseño sistema electrónico.

Para el desarrollo de los movimientos del prototipo de robot paralelo manipulado por cables se realiza un control en el sistema mediante un circuito de control y potencia.

Determinado el valor 8,80 Nmm del torque máximo al realizar los movimientos en el análisis dinámico del capítulo 4 el primer elemento a seleccionar es el motor.

El motor seleccionado es un motor paso a paso NEMA 23 (ANEXO N) con las siguientes características:

Tabla 3-5: Características del motor paso a paso NEMA23

Características	Especificaciones
Marca	Minebea Matsuchisu
Voltaje	4 V
Torque	9,9Kg-cm
Corriente	3 A
Fase	Bipolar
Angulo de paso	1,8
Peso	0,7Kg

Fuente: <http://www.imeba.com>

Los elementos electrónicos requeridos para el funcionamiento se detallan en la tabla 6-5

Tabla 4-5: Elementos electrónicos

Cantidad	Código	Descripción
4		Motor paso a paso NEMA23
1		Arduino uno
1		Shield Arduino para motor 4 drives Nema
4	DQ542MA	Driver
1	Reg 85-264VAC	Fuente de poder 12V DC

Fuente: Autores

Debido a que los drivers específicos para los motores a paso NEMA 23 es decir el driver DQ542MA no se encuentra con facilidad en el mercado de nacional y presenta algunas restricciones para ser utilizado como son: necesita una fuente de 18 – 50 V mayor a la utilizada, las dimensiones y peso son mayores por lo que la caja de control aumenta considerablemente sus dimensiones y requiriendo mayor espacio que el disponible. En base a estas consideraciones los drives a utilizar son A4988, los que ayudan a cumplir con los requerimientos de funcionamiento y espacio disponible.

Circuito de Control

Para mostrar el funcionamiento del sistema de control se utiliza un lazo de control abierto mediante el cual se envía una señal para lograr que se cumpla una acción sin la existencia de una retroalimentación que ayude a mejorar el control de dicho sistema ya que el alcance de este trabajo no llega hasta lograr un control preciso del movimiento se utiliza un control simple para comprobar el funcionamiento.

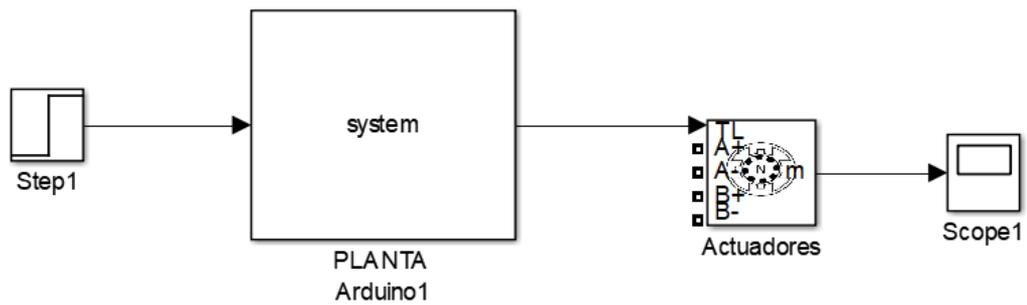


Figura 20-5: Lazo de control abierto

Fuente: Autores 2018

Circuito de Potencia

El circuito de potencia no es complejo solo necesita una fuente que asegure la conversión de corriente alterna de 110 V a corriente continua de 12 V y que además mantenga un voltaje adecuado el uso de una placa es suficiente para mantener los elementos funcionando de manera adecuada. El control del movimiento del proyecto se basa en el uso de un controlador Arduino UNO y una Shield CNC a la que se aumenta unas conexiones para lograr que cada motor tenga movimiento independiente pues la placa por sí misma no permite controlar los 4 motores de forma independiente y se debe usar los drivers DQ542MA de los motores para que cada uno funcione sin sobrecargas y tampoco con ruido exagerado, estos elementos no se encontraron en el mercado nacional

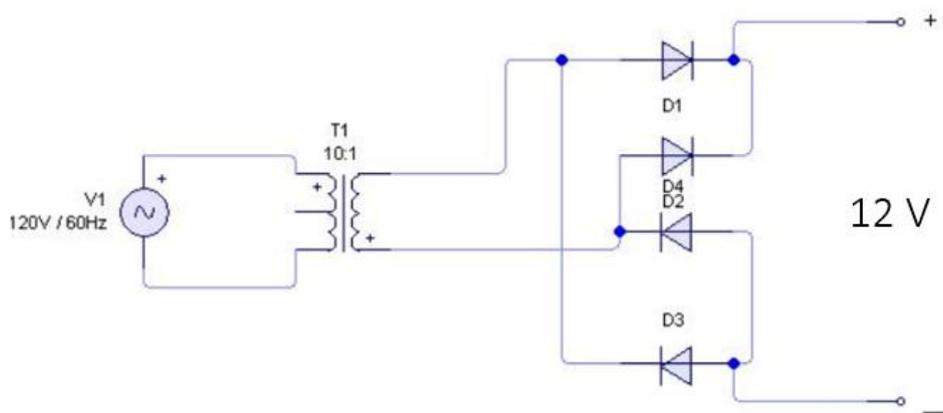


Figura 21-5: Circuito para obtener 12 V CD

Fuente: Autores 2018

La programación del controlador permite a cada uno de los motores girar de manera adecuada para que los movimientos planteados se cumplan según la manera determinada.

Además del control realizado se desarrolla un interfaz utilizando LABVIEW para que al accionar un movimiento este se pueda verificar en una pantalla de computador a través de un programa el cual captura los datos de posición que se generan durante el funcionamiento del equipo.

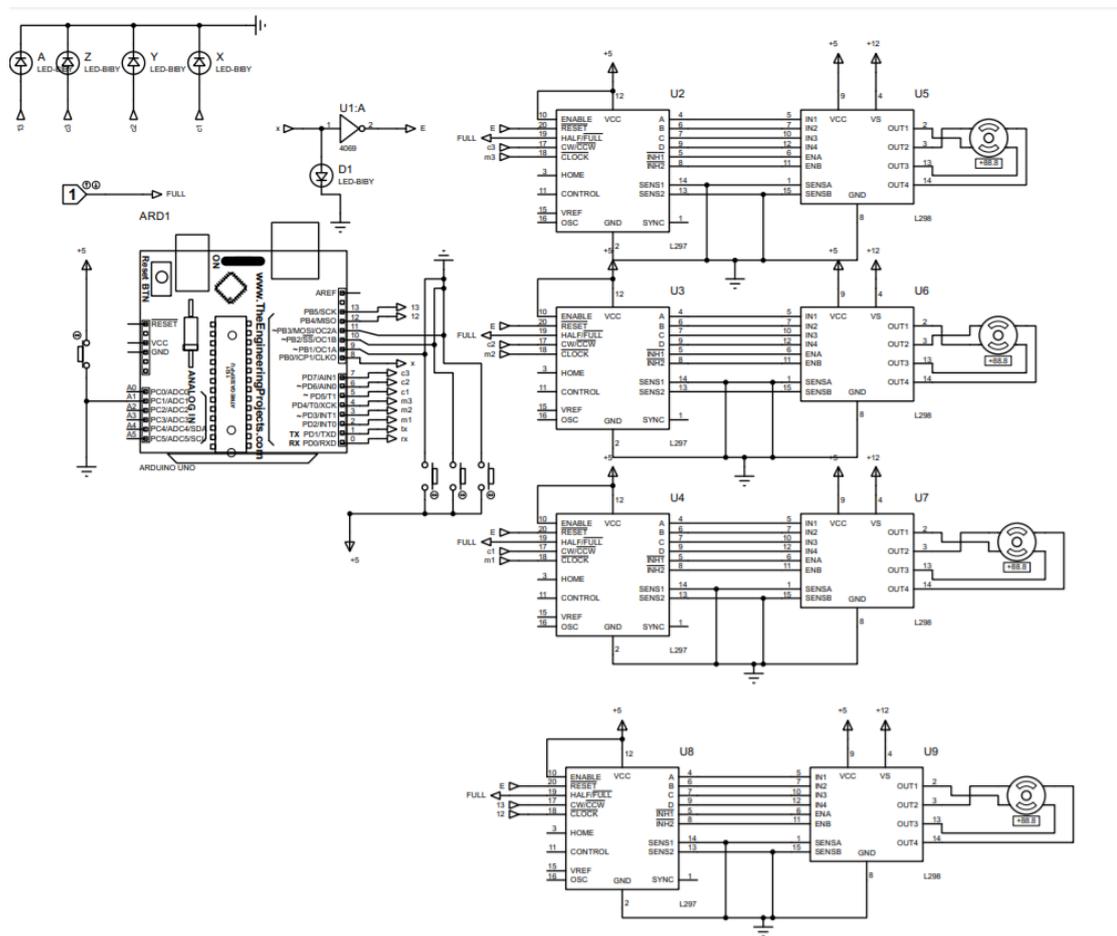


Figura 22-5: Esquema de circuito de control

Fuente: Autores, 2018

CAPÍTULO VI

6. CONSTRUCCIÓN, MONTAJE Y PRUEBA DE FUNCIONAMIENTO DEL ROBOT PARALELO DE 3 GRADOS DE LIBERTAD MANIPULADO POR CABLES.

6.1 Construcción

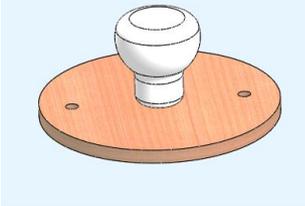
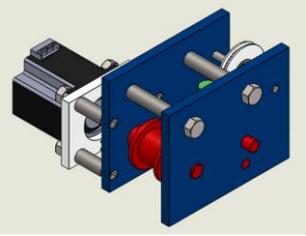
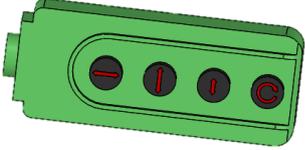
Para la construcción y montaje del robot paralelo se empleó las siguientes máquinas y herramientas de manera adecuada:

- Torno
- Fresadora
- Cortadora
- Soldadura de arco
- Taladro de mano
- Prensa de banco
- Flexómetro
- Calibrador de pie
- Escuadra
- Brocas
- Machuelo
- Martillo
- Llaves
- Destornilladores
- Impresora 3D

6.1.1 Componentes del equipo

Para mayor facilidad de construcción el equipo se ha distribuido en sistemas que faciliten la construcción total.

Tabla 1-6: Sistemas del robot paralelo manejado por cables

SISTEMA		ESQUEMA
Sistema estructural	Estructura Base	
	Estructura superior	
	Tijeras de elevación	
Sistema de plataformas	Plataforma fija	
	Plataforma móvil	
Sistema de recolección de cable		
Sistema Electrónico		

Realizado por: Autores

6.1.2 Elementos de construcción.

En la siguiente tabla se detalla, cada uno de elementos, cantidad y material/modelo que componen el equipo de rehabilitación.

Tabla 2-6: Partes constructivas del robot paralelo manejado por cables

Sistema		Elementos	Cantidad	Material/Modelo	
Sistema estructural	Estructura base	Tubo cuadrado 50x50x1.1	2	Acero ASTM A36	
	Guía deslizante	Perfil L 20x20x1.2	4	Acero ASTM A36	
	Estructura Superior	Tubo cuadrado 50x50x1.1	1	Acero ASTM A36	
	Estructura Traslacional	Tubo cuadrado 20x1.2	1	Acero ASTM A36	
	Tijeras de elevación	Tijeras		4	Acero ASTM A36 (40x6mm)
		Eje roscado		1	AISI 1020
		Soporte estructura		2	Acero ASTM A36
		Rodamientos		4	Rígido de bolas
Sistemas de plataforma		Eje central	1	Acero inoxidable AISI 304	
		Plataforma fija	1	Madera 10mm	
		Plataforma móvil	1	Madera 10mm	
		Chumaceras	2	Normalizada	
		Manijas	2	Plástico/ Nylon	
		Ruedas locas	4	Acero y plástico	
Sistema de recolección de cables		Cable	4	Acero	
		Poleas	8	Nylon	
		Soportes	4	Nylon	
		Pernos de sujeción	4	Normalizado M12	
		Tambor	4	Nylon	
		Resortes	8	Alambre de piano d 1mm	
		Pernos de sujeción	4	Normalizado M12	
Sistema electrónico		Circuito de control	1	Diseño/Selección	
		Circuito de potencia	1	Diseño/selección	
		Caja de control	1	Normalizado	
		Motor	4	Catalogo	

Realizado por: Autores

6.1.3 *Tiempo de construcción del equipo*

En la siguiente tabla se detallan los tiempos de construcción del equipo de rehabilitación.

Tabla 3-6: Tiempo de construcción del robot paralelo manipulado por cables

Sistema		Elementos	Operaciones	Tiempo (horas)
Sistema estructural	Estructura base		Toma de medidas	1
			Trazado	2
			Corte	½
			Soldadura	1
			Pintado	2
	Guía deslizante		Toma de medidas	2
			Trazado	2
			Corte	2
			Soldadura	2
			Pintado	2
	Estructura Superior		Toma de medidas	1
			Trazado	2
			Corte	1
			Soldadura	1
			Taladrado	½
			Pintado	2
	Estructura Traslacional		Toma de medidas	½
			Trazado	1
			Corte	1
			Soldadura	1
			Taladrado	1
			Pintado	1
	Sistema de Tijeras	Tijeras		Toma de medidas
			Trazado	2
			Corte	½
			Taladrado	½
			Soldadura	1
			Pintado	1
			Montaje	1

Tabla 3-6 (Continuación): Tiempo de construcción del robot paralelo manipulado por cables

	Eje roscado	Toma de medidas	½
		Trazado	½
		Corte	½
		Roscado	2
	Soporte estructura	Toma de medidas	½
		Trazado	1
		Corte	1
		Pintado	1
	Rodamientos	Montaje	1
		Lubricación	½
	Sistemas de plataforma	Eje central	Toma de medidas
Trazado			½
Corte			½
Torneado			2
Chaflanado			1
Montaje			1
Plataforma fija		Toma de medidas	1
		Trazado	2
		Corte	2
		Taladrado	1
		Montaje	1
Plataforma móvil		Toma de medidas	1
		Trazado	½
		Corte	1
		Taladrado	½
		Roscado	1
Chumaceras		Montaje	1
		Lubricación	½
Manijas		Toma de medidas	2
		Trazado	½
		Corte	½

Tabla 3-6 (Continuación): Tiempo de construcción del robot paralelo manipulado por cables

		Torneado	2
		Perforado	½
		Roscado	½
		Impresión 3D	1
		Montaje	1
	Ruedas locas	Montaje	1
Sistema de recolección de cables	Cable	Toma de medidas	½
		Corte	½
	Poleas	Toma de medidas	1
		Corte	½
		Torneado	4
	Soportes	Toma de medidas	1
		Trazado	2
		Corte	4
		Taladrado	4
	Tambor	Toma de Medidas	2
		Corte	1
		Torneado	16
Taladrado		1	
Sistema electrónico	Circuito de control	Diseño del Diagrama	4
		Conexión de la fuente	½
	Circuito de potencia	Diseño del Circuito	4
		Conexión a la fuente	1
		Conexión del Arduino	2
		Conexión de Cables	2
		Conexión de pulsadores	2
		Programación de Arduino	24
Caja de control	Montaje del circuito de potencia	8	
Motor paso a paso	Conexión del motor	5	
Tiempo Total (Horas)			119

Realizado por: Autores

6.2 Montaje del robot paralelo manipulado por cables

El montaje del equipo se lo realiza por sistemas de acuerdo al tiempo estimado para cada uno.

Montaje del sistema estructural. Este sistema es un sub ensamblaje de los elementos estructurales

Tabla 4-6: Tiempo de montaje del sistema estructural

Descripción	Tiempo (Horas)
Traslado de los componentes al sitio de trabajo	2
Montaje de tijeras de elevación	4
Montaje del sistema de tijeras a la estructura	4
Ajuste de pernos	1
Tiempo total (horas)	13

Realizado por: Autores

Montaje de los sistemas de plataformas. Consiste en ensamblar las plataformas al sistema estructural.

Tabla 5-6: Tiempo de montaje del sistema de plataformas

Descripción	Tiempo (Horas)
Traslado de los elementos al sitio de trabajo	1
Montaje de las chumaceras a la estructura	1
Colocación de los seguros fijos	2
Ajuste de pernos	2
Tiempo total (horas)	6

Realizado por: Autores

Montaje del sistema de recolección de cable. Consiste en ensamblar el sistema a las plataformas.

Tabla 6-6: Tiempo de montaje del sistema de recolección de cable

Descripción	Tiempo (Horas)
Traslado de componentes al sitio de trabajo	1
Montaje de cada elemento	16
Ajuste de pernos	4
Montaje del sistema a la estructura	4
Montaje del cable	4
Ajuste de pernos	2
Tiempo total (horas)	31

Realizado por: Autores

Montaje del sistema electrónico. Colocación y ensamblaje de cada uno de los elementos en los tiempos establecidos.

Tabla 7-6: Montaje del sistema de eléctrico

Descripción	Tiempo (Horas)
Trasporte de elementos y equipo al lugar de trabajo	2
Ensamblaje del circuito de potencia	7
Ensamblaje del circuito de control	7
Acoplamiento de la fuente	2
Acoplamiento de la caja de control	2
Ajuste de elementos de unión	2
Tiempo total (horas)	22

Realizado por: Autores

Tiempo de construcción y ensamblaje del equipo. Los tiempos realizados para cada etapa se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 8-6 Tiempo de construcción y ensamblaje

Descripción	Tiempo (Horas)
Tiempo de construcción	184
Tiempo de montaje	72
Tiempo total (horas)	256

Realizado por: Autores

El tiempo total para la construcción y montaje del robot paralelo manipulado por cables es de 264 horas considerando un día de trabajo de 8 horas son 32 días.

6.3 Pruebas del robot paralelo manipulado por cable.

Terminada la construcción del prototipo del equipo se procede a realizar las pruebas de funcionamiento mecánico y electrónico del robot, para el cumplimiento de los requisitos propuestos.

Pruebas mecánicas del robot manipulado por cables. Consiste en verificar el buen funcionamiento de los elementos que conforman el sistema de recolección de cable sistema de elevación.

Las pruebas se realizan con carga para observar el buen funcionamiento de los elementos y componentes del equipo. En la siguiente tabla se presentan los resultados de las pruebas realizadas a cada uno de los elementos y las observaciones pertinentes.

Tabla 9-6: Prueba mecánicas del robot paralelo manejado por cables

Elementos	Ruido	Calentamiento	No Problema	Observaciones
Eje deslizante-Tuerca			X	
Tambor			X	
Poleas			X	
Tijeras de elevación			X	
Rodamientos de deslizamiento			X	
Tornillo			X	
Pernos			X	

Realizado por: Autores

Pruebas de movimiento. La rehabilitación física de hombro requiere una serie repetitiva de movimientos de rehabilitación tomadas de la Tabla 1-2.

Movimientos a realizar

- Movimiento 1: Axial de 15 cm a cada lado (Eje x)
- Movimiento 2: Axial de 20 cm a cada lado (Eje y)

- Movimiento 3: Lateral de 15 cm (Eje y)
- Movimiento 4: Circular con un radio de 20 cm

Para la realización de las pruebas del equipo se lo traslado a un centro de rehabilitación física donde se realizó 5 sesiones rehabilitación de personas que ha tenido una cirugía de hombro y se encuentran en la primera etapa de recuperación.

Pruebas de movimientos sin carga. Los objetivos de la prueba del equipo sin carga son:

- Comprobar el funcionamiento del sistema de recolección de cable.
- Comprobar el control electrónico de los 4 movimientos requeridos.
- Verificar el desplazamiento y cumplimiento de los movimientos.
- Comprobar la estabilidad de la plataforma fija en el momento del desplazamiento del efector final.

Para la comprobación del adecuado funcionamiento del equipo se realizan las siguientes actividades:

- Colocación del equipo en una superficie plana.
- Elevación de la plataforma fija a la posición requerida.
- Ajustar los seguros para estabiliza las plataformas.
- Comprobación que al equipo se suministre energía.
- Activar cada uno de los movimientos mediante el panel del control.
- Verificación el cumplimiento de las secuencias de los movimientos
- Tiempo de realización de cada serie de movimientos.
- Terminación de la prueba.

Tabla 10-6: Verificación del tiempo de realización de movimiento sin carga

	Numero de repeticiones	Tiempo de realización (s)	Observaciones
Movimiento 1	5	40	
Movimiento 2	5	52	
Movimiento 3	5	16	

Movimiento 4	5	54	
--------------	---	----	--

Realizado por: Autores

Tabla 11-6: Desplazamiento en cada movimiento

	Sugerido (cm)	Obtenido (cm)	Observaciones
Movimiento 1	30	30	
Movimiento 2	25	25	
Movimiento 3	15	12	Puede mover hasta el desplazamiento sugerido, pero se pierde tensión en los cables
Movimiento 4	30	30	

Realizado por: Autores

Pruebas de movimiento con carga

Los objetivos de la prueba del equipo carga son:

- Comprobar el funcionamiento del sistema de recolección de cable con normalidad.
- Comprobar el control electrónico de los 4 movimientos requeridos.
- Verificar el desplazamiento y cumplimiento de los movimientos.
- Comprobar la estabilidad de la plataforma fija en el momento del desplazamiento del efector final.

Para la comprobación del adecuado funcionamiento del equipo se realizan las siguientes actividades:

- Colocación del equipo en una superficie plana.
- Adquisición de datos del usuario
- Elevación de la plataforma fija a la posición requerida.
- Ajustar los seguros para estabiliza las plataformas.
- Comprobación que al equipo se suministre energía.
- Colocar al usuario en la posición requerida
- Colocación del brazo en el efector final.
- Activar cada uno de los movimientos mediante el panel del control.
- Verificación el cumplimiento de las secuencias de los movimientos.
- Verificar el tiempo de realización de cada serie de movimientos.

- Adquisición de datos mediante el Software LabVIEW de cada uno de los movimientos
- Terminación de la prueba.

Datos del primer usuario

Peso: 60 Kg

Estatura: 165 cm

Edad: 28 años

Tabla 12-6: Verificación del tiempo de realización de movimiento con carga

	Numero de repeticiones	Tiempo de realización (s)	Observaciones
Movimiento 1	5	42	
Movimiento 2	5	53	
Movimiento 3	5	16	
Movimiento 4	5	55	

Realizado por: Autores

El movimiento 4 solo se lo realiza cuando el usuario se encuentra sobre una camilla para evitar incomodidad en el momento de su uso.

Mediante el software LabVIEW y Excel se adquirió los datos de desplazamiento de la plataforma móvil en cada uno de los movimientos

Las gráficas siguientes representan la posición final del efector final en función del tiempo en cada uno de los movimientos realizados.

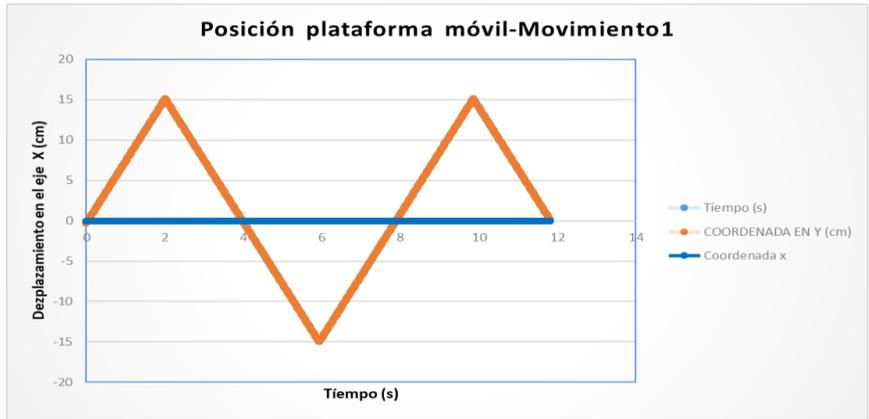


Gráfico 1-6: Posición del efector final en función del tiempo-Movimiento 1

Realizado por: Autores



Gráfico 2-6: Posición del efector final en función del tiempo-Movimiento 2

Realizado por: Autores

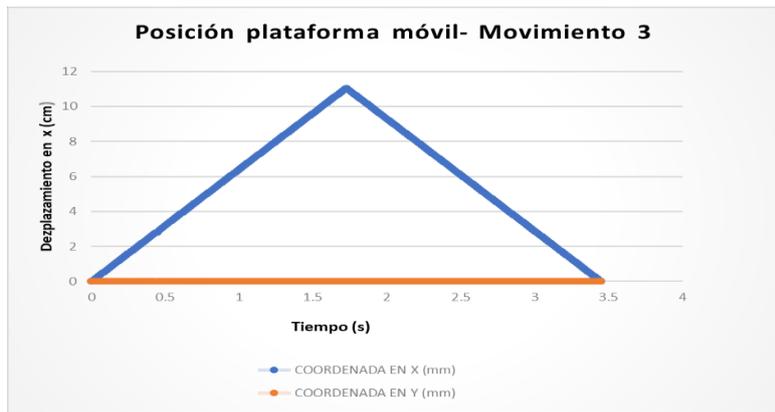


Gráfico 2-6: Posición del efector final en función del tiempo-Movimiento 3

Realizado por: Autores

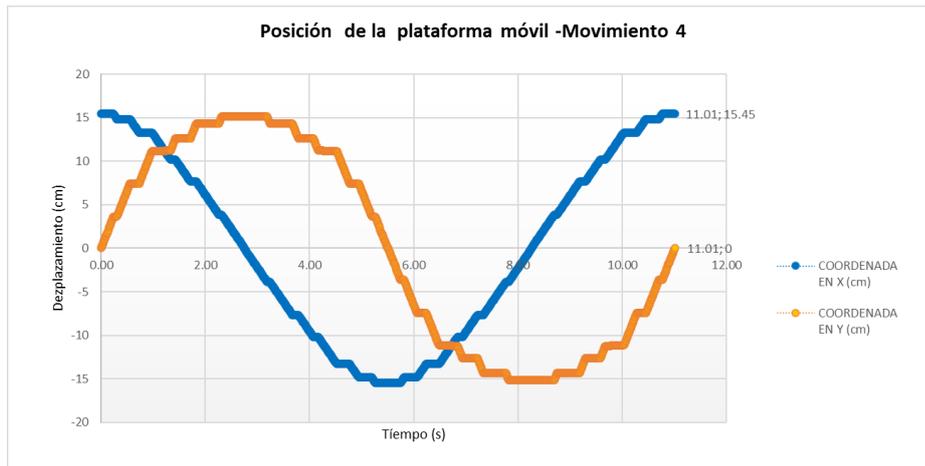


Gráfico 3-6: Posición del efector final en función del tiempo-Movimiento 4

Realizado por: Autores

El cuarto movimiento no se logró conseguir con éxito, presenta una pequeña variación en el desplazamiento sugerido debido a que se pierde tensión en los cables al realizar este movimiento, se necesita sensores de tensión de manera que cree un circuito de sistema cerrado retroalimentado por esta señal para mantener una tensión correcta

Tabla 13-6: Desplazamiento en cada movimiento

	Sugerido (cm)	Obtenido (cm)	Observaciones
Movimiento 1	30	29,9	
Movimiento 2	25	22	
Movimiento 3	15	13	
Movimiento 4	30	29,8	No realizo el mismo desplazamiento en ambos ejes

Realizado por: Autores

6.4 Verificación de requerimientos

Luego de la construcción del equipo y la realización de las pruebas de funcionamiento se verifican el cumplimiento de los requisitos planteados al iniciar el proyecto los que se obtuvieron mediante la revisión de los datos usados en la construcción de la casa de la calidad comparando los requerimientos del usuario con los definidos por el ingeniero.

6.4.1 Verificación de los requerimientos del usuario (Voz del usuario). En la siguiente tabla se verifican especificaciones dadas por el usuario.

Tabla 14-6: Verificación de los requerimientos del usuario

Requerimientos del usuario	Cumple	No Cumple
Movimientos de Rehabilitación	X	
Dimensiones adecuadas		X
Velocidad adecuada	X	
Movimiento planar	X	
Útil para todo tipo de personas		X
Conexión a un tomacorriente	X	
Resistente y fácil de fabricar	X	
Paro inmediato	X	
Bajo costo	X	

Realizado por: Autores

6.4.2 Verificación de los requerimientos del ingeniero (Voz del ingeniero). En la siguiente tablase verifican las especificaciones que considero el ingeniero para el diseño del equipo.

Tabla 15-6: Verificación de los requisitos del ingeniero

Requerimientos del usuario	Cumple	No Cumple	Observaciones
Rango de movimientos	X		Máximo desplazamiento 300 mm
Volumen del equipo	X		
Velocidad máxima de desplazamiento	X		Misma velocidad para los movimientos
Grados de libertad	X		
Carga máxima	X		Máximo peso de una persona 80 Kg
Funciona 110 V	X		
Peso máximo (Actuador)	X		
Modos de funcionamiento	X		4 modos
Nivel de automatización	X		

Ergonomía y confort	X		Depende de la posición del equipo
Costo	X		

Realizado por: Autores

CAPITULO VII

7. MANUAL DE OPERACIÓN, MANTENIMIENTO Y ANÁLISIS DE COSTOS

El presente capítulo tiene como objetivo poner a disposición de manera clara el funcionamiento, operación, mantenimiento, precauciones, así como la solución de problemas que se puedan presentar al manipular el equipo.

7.1 Manual de operación

El manual de operación enseña a detallar los aspectos más importantes de manera que se pueda utilizar el equipo de forma correcta evitando así posibles daños por mal uso del mismo.

Vista general

En la figura se muestra el robot paralelo manipulado por cables de tres grados de libertad para rehabilitación parcial de hombro.



Figura 1-7: Robot paralelo manipulado por cables.

Realizado por: Autores

7.1.1 Accesorios del robot

Son aquellos elementos complementarios para el funcionamiento óptimo del robot, de manera que cumpla con las condiciones de trabajo.

Plataforma móvil

Este elemento es el encarado de generar los movimientos al deslizarse sobre la plataforma fija.



Figura 2-7: Plataforma móvil.

Realizado por: Autores

7.1.1.1 Sistema de recolección

En este sistema de recolección se encarga del funcionamiento de las poleas las mismas que enrollan y desenrollan el cable según se requiera para generar los movimientos en la placa móvil.



Figura 3-7: Sistema de recolección de cable.

Realizado por: Autores

Panel de control

Se encarga del encendido, apagado, y controla la ejecución de los movimientos y el número de repeticiones de los mismos.



Figura 4-7: Panel de control

Realizado por: Autores

7.2 Características del equipo de rehabilitación

A continuación, en la tabla 1-7 se muestran las principales características del robot paralelo manipulado por cables de tres grados de libertad para rehabilitación parcial de hombro.

Tabla 1-7: Características del robot

Robot Paralelo manipulado por cables					
Característica Generales	<i>Dimensiones generales</i>				
	Elemento	Largo (mm)	Ancho (mm)	Altura (mm)	
				Mínima	Máxima
	Estructura	910	910	350	850
	Plataforma Fija	780	680	-	-
	Plataforma Móvil	Diámetro (mm)			
		160			
	<i>Material de construcción</i>				
	Estructura	Acero ASTM A36			
	Plataforma Fija	Madera			
	Plataforma Móvil	Madera y Nylon			
	Accesorios				
	Motor paso a paso	Voltaje (V)	Corriente (A)	Torque (kg.cm)	Peso (kg)
		2.3	3	9.9	0,7
	Cable	Nylon			
Peso total equipo (kg)	26,3				

Realizado por: Autores

7.3 Instalación del equipo

Para un adecuado funcionamiento se debe instalar de forma correcta en el lugar de trabajo. Para lo cual se recomienda.

- Colocar el equipo sobre una superficie uniforme de forma que no existan desniveles.
- Conectar la maquina a líneas de corriente eléctrica adecuada para su funcionamiento (110 V)

7.4 Instrucciones de operación

El operador debe cumplir con las siguientes recomendaciones antes de poner en funcionamiento el equipo.

7.4.1 Puesta en marcha

Para un adecuado funcionamiento del equipo la puesta en marcha es un aspecto esencial. En la tabla 2-7 se desarrolla el procedimiento a seguir para poner en marcha el equipo de una forma adecuada.

Tabla 2-7: Procedimiento para la puesta en marcha del equipo

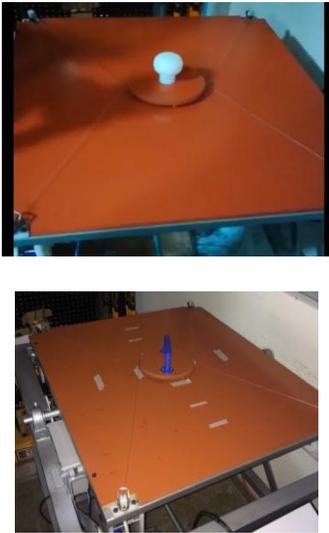
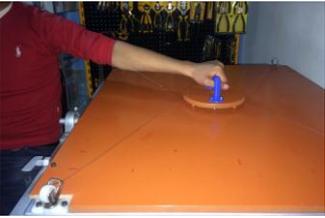
	Procedimiento	Gráfico
1	Verificar el posicionamiento del equipo (altura adecuada del equipo de acuerdo al tipo de ejercicio de rehabilitación que se vaya a realizar)	

Tabla 2-7(continuación): Procedimiento para la puesta en marcha del equipo

2	Conectar el equipo a la línea de corriente (110V)	
3	Verificar que la plataforma móvil se encuentre en la posición inicial (punto medio de la plataforma fija)	
4	Verificar los movimientos de la plataforma móvil sin carga (sin el brazo del paciente sobre la plataforma móvil)	
5	Realización de los movimientos con carga (colocar la mano del paciente sobre la plataforma móvil e iniciar con los ejercicios de rehabilitación)	

6	Retirar la mano del equipo (retirarla mano del paciente)	
---	---	--

Tabla 2-7(continuación): Procedimiento para la puesta en marcha del equipo

7	Verificar que la plataforma móvil se encuentre en la posición final (punto medio de la plataforma fija)	
8	Regresar la plataforma móvil al punto inicial	
9	Desconectar el equipo	

Realizado por: Autores

Nota. Todos los movimientos de rehabilitación deben estar supervisados por una persona especializada

7.5 Manual de mantenimiento

Para un correcto funcionamiento del robot paralelo, es necesario contar con un plan de mantenimiento, debido a que por su uso los elementos sufrirán desgaste y degradación. Además, se debe tomar en cuenta que al no realizar un mantenimiento adecuado el tiempo de vida útil del equipo se verá reducido pudiendo llegar al paro total del mismo.

El cronograma de mantenimiento se presenta a continuación en la tabla 3-7 la misma que indica el procedimiento básico para realizar un buen mantenimiento.

Tabla 3-7: Cronograma de mantenimiento

Cronograma de mantenimiento del equipo						
ACTIVIDAD	Diaria	Semanal	Mensual	Trimestral	Semestral	Anual
Tensado del cable	X					
Lubricación de rodamientos			X			
Revisión de las ruedas locas				X		
Cambio de cable						X
Revisión del sistema de recolección de cable				X		
Revisión del funcionamiento de motores				X		
Revisión de tornillos y juntas móviles				X		
Lubricación del sistema de elevación				X		
Revisión de la pintura de la estructura.						X

Realizado por: Autores

7.6 Costos operacionales

En este punto se detallará todo en cuanto a costos se refiere y estos son: costos directos y costos indirectos.

7.6.1 Costos directos

Los costos directos son aquellos que interviene directamente e la construcción del robot paralelo para rehabilitación parcial de hombro y estos son: costo de materiales, costos de mano de obra, costo de herramientas y costo de transporte.

7.6.1.1 Costo de materiales

El costo esta proporcional a las dimensiones del robot paralelo que se construyó.

Tabla 4-7: Costo de los materiales mecánicos

Materiales mecánicos				
Descripción	Unidad	Precio unidad	Cantidad	Subtotal (USD)
Tubo cuadrado ASTM A36 40x40x1.5mm	m	13,75	2	27,5
Tubo cuadrado ASTM A36 20x20x1.5mm	m	19,23	2	38,46
Plancha de madera	m ²	13	1	13
Perfil L ASTM A36 20x20x1.2mm	m	4,82	1	4,82
Eje acero inoxidable 306 Ø 15mm	m	4	1	4
Pletinas ASTM A36 40x5mm	m	12	1	12
Plancha de Nylon 1.3x1.25m	m ²	28,9	1	28,9
Barras de nylon Ø 50mm	m	40,30	1	40,30
Ruedas Locas Ø 1.1mm	u	2,50	4	10
Eje acero inoxidable 306	m	8	2	16
Chumaceras	u	16	2	32

Tornillo M5x0,8	u	0,15	8	1,20
Tornillo cabeza hexagonal hueca M5x0,8x50	u	0,4	16	6,40
Tornillo cabeza hexagonal hueca M5x0,8x40	u	0,42	8	3,36
Pernos 3/8 2"	u	0,2	4	0,80
Pernos 3/8 3"	u	0,4	8	3,20
Perno cabeza hexagonal 1/2"-16UNCX1"	u	0,3	2	0,60
Tornillos M2. 5x10	u	0,02	8	0,16
Rodamientos Øi10 , Øe18	u	0,80	8	6,40
Thinner	L	1	1Lt	1
Resortes Øi 10 d 10	u	1	4	8
Pintura	L	2,35	1Lt	2,35
Total (USD)				259,85

Realizado por: Autores

Tabla 5-7: Costos materiales electrónicos

Materiales eléctricos				
Descripción	Unidad	Precio unidad	Cantidad	Subtotal (USD)
Motores Paso a paso	U	75	4	300
Fuente de poder Reg 85-264VAC	U	32,90	1	32,90
Arduino Uno	U	15,00	1	15,00
Botonera Colgate 4 pul 5 ^a	U	11,10	1	11,10
Shield Arduino	U	18,00	1	18,00
Driver A4988	U	4,35	4	19,40
Caja Plástica JSL 175x110x83 mm	U	8,23	1	8,23
Material eléctrico	U	20,00	1	20,00
Total (USD)				424,63

Realizado por: Autores

Tabla 6-7: Costo de materiales

Descripción	USD
Materiales mecánicos	259,85
Materiales eléctricos	424,63
Total	684,48

Realizado por: Autores

7.6.1.2 Costo de mano de obra

Los costos de mano de obra se establecen según el rango que desempeñe el trabajador en el taller como indica el ANEXO W.

Tabla 7-7: Costo de mano de obra

Descripción	Categoría	Salario- hora	Horas hombre	Subtotal (USD)
Tornero	C1	3,75	16	60
Soldador	C1	3,75	6	22,50
Ayudante en general	D2	3,50	100	350
Electrónico	C1	3,25	40	130
Total				562,50

Realizado por: Autores

7.6.1.3 Costo de maquinaria y herramientas

Se considera las horas que se utilizó las distintas máquinas y herramientas de acuerdo al costo que se maneja en el medio.

Tabla 8-8: Costo de maquinaria y herramientas

Categoría	Precio- hora	Horas de equipo	Subtotal (USD)
Torno	1,5	24	36
Soldadora de arco	1,6	6	9,6
Flexómetro	0,5	2	1
Calibrador Pie de rey	1	5	5
Taladro	1	9	9
Escuadra	0,5	6	3
Machuelo	0,5	1	0,5
Pulidora	1,5	1	1,5
Prensa de banco	0,5	2	1
Herramientas menores	1	5	5
Total (USD)			71,6

Realizado por: Autores

7.6.1.4 Costo de transporte

Para la construcción del robot paralelo se consideró un costo total de transporte de \$20

7.6.2 Total, costos directos

Tabla 9-7: Total costos directos

Costos	USD
Materiales	716,18
Mano de obra	592,50
Maquinaria y herramientas	75,60
Transporte	20,00
Total (USD)	1403,68

Realizado por: Autores

7.6.3 Costos indirectos

Tabla 10-7: Costo indirectos

Costos ingenieriles	Tiempo (Horas)	Precio unitario (USD)	Precio total (USD)
Investigación	40	8,00	320,00
Diseño	40	8,00	320,00
Total (USD)			640,00

Realizado por: Autores

7.6.4 *Costo total*

Tabla 11-7: Total costo

Costo del equipo	Precio total USD
Costos directos	1403,68
Costos indirectos	640,00
Total (USD)	2043,68

Realizado por: Autores

CAPITULO VIII

8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8.1 CONCLUSIONES

- Se comprobó que un robot paralelo conducido por cables puede usarse como equipo de rehabilitación física de hombro.

- En base al estado del arte revisado de dispositivos de rehabilitación y robots paralelos conducidos por cables establece: las características del prototipo en base a modelos existentes y la metodología de diseño necesaria para el diseño del robot paralelo manipulado por cables.
- El desarrollo de la matriz morfológica permite determinar tres alternativas de diseño que cumplen con las características dadas por el usuario, se selecciona aquella que cumple con las especificaciones establecidas.
- El modelo cinemático y dinámico realizados proporcionan información de la longitud máxima del cable igual a 870 mm , y un torque máximo de los motores de 0.88Ncm .
- Las singularidades presentadas en el análisis cinemático y dinámico del prototipo muestran el espacio de trabajo sobre el cual la plataforma puede desplazarse y rotar sin problemas, definiendo un desplazamiento a lo largo del eje $x=340\text{mm}$, desplazamiento a lo largo del eje $y=390\text{mm}$ y giro alrededor del eje $z=90^\circ$.
- Las pruebas de funcionamiento realizadas al equipo de los cuatro movimientos establecidos determinaron que el primer movimiento se desplaza con una amplitud de $302,6\text{ mm}$, el segundo movimiento 220 mm , el tercer movimiento $151,5\text{ mm}$, mientras que el movimiento 4 determina un radio de giro de 150 mm .
- La construcción consta de varios sistemas como son: sistema de elevación, sistema de recolección de cable y sistema de control mismos que durante el diseño y montaje cumplieron con parámetros establecidos que facilitan el montaje de cada uno, lo que disminuye el tiempo de uso de equipos y maquinaria.

8.2 RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar un análisis del espacio de trabajo más profundo para evitar que el equipo presente singularidades que afecten el funcionamiento.

- Seguir las indicaciones establecidas en el manual de operaciones
- Hacer un nuevo análisis de un modelo cinemático y dinámico en función de la tensión de los cables.
- Añadir un sistema de control en el que se pueda definir de acuerdo al progreso de cada usuario el número de repeticiones y el tiempo para realizar cada ejercicio de acuerdo a las indicaciones del encargado de la fisioterapia.
- Se recomienda el uso de dispositivos de control propios de cada actuador para evitar el ruido producido durante el funcionamiento o probar el uso de otros actuadores.
- Acoplar un sistema de seguridad paralelo al brazo del usuario y evitar contratiempos en el momento de su uso.
- Para mejorar la trayectoria circular se recomienda el uso de componentes que ayuden a optimizar el movimiento de los motores por fracciones de pasos más pequeñas para mejorar la trayectoria.

BIBLIOGRAFÍA

ABBASNIJAD, G. *Displacement Analysis of Under-Constrained Cable-Driven Parallel Robots*. [En línea] 2014. [Citado el: 28 de Junio de 2017.] Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8078989/>.

ARACIL, R. *Robots paralelos: Máquinas con un pasado en la robotica del futuro*. Madrid : s.n., 2006, Vol. 3.

AUFFRAY, V. *Vers la manipulation précise de grandes pièces dans de très grands espaces de travail*. [En línea] 2016. [Citado el: 22 de Abril de 2017.] Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8078989/>.www.tecnalia.com/robotics.

BORELL, J. *Tambores y poleas*. [En línea] Bcelona, 04 de julio de 2011. [Citado el: 25 de Febrero de 2018.] Disponible en: <http://www.tenso.es/utilidades/glosario.asp?termino=Tambores>.

BUDYNAS, R. *Diseño de ingeniería mecánica de Shigley*. 10ª. Mexico DF : McGraw-Hill, 2008. págs. 896-903.

GOSSELIN, C. *Cable-driven parallel mechanisms: state of the art and perspectives*. 01, Quebec : s.n., 2014, JSME, Vol. 1. 1.

CANDELAS, Francisco. *Servomotores*. [En línea] 20 de Septiembre de 2007. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8078989/>.
<http://www.aurova.ua.es/previo/dpi2005/docs/publicaciones/pub09-ServoMotores/servos.pdf>.

CINTAS, P. *Técnicas para la gestion de la calidad*. España : Diaz de santos SA, 2006.

GUZMAN, C., et al; *Diseño y control de un sistema interactivo para la rehabilitación de tobillo :TobiTob*. 2014, Ingeniería mecánica, tecnología y desarrollo, Vol. 5, pág. 10.

DOMINGUEZ, M. *Evaluación de los programas del robot amadeo en la rehabilitación de la mano del hemiplejico.* 2014. Vol. 11.

EL TIEMPO. *Hospital del IESS adquiere equipos para rehabilitación.* Cuenca, Ecuador : s.n., 11 de Enero de 2016. pág. 1.

ESTRADA, J., et al; *Dimensiones antropométricas de la población latinoamericana.* SEGUNDA. Guadalajara : D.R, 2007. págs. 196-203.

FLORES, J. *Sistemas de transmisión mecánica.* La Paz, Bolivia : s.n., 2012. págs. 15-50.

GONZALEZ, G. *Cálculo analítico de la potencia nominal en transmisión por correa.* España : s.n., 2010. págs. 46-61.

GOSSELIN, C., et al; *Singularity Analysis of Closed Loop kinematic Chains.* s.l. : *IEEE Transactions on robotics and Automation*, 1990, Vol. 6, págs. 281-290.

GROOVER, M. *Fundamento de manufactura moderna: materiales, procesos y sistemas.* México : Prentice Hall, 1997. pág. 133.

GUZMÁN, C., et al; *Diseño y control de un sistema interactivo para la rehabilitación de tobillo.* 2014. págs. 255-264. Vol. 5.

HERNÁNDEZ, A. *Análisis Cinemático Directo e Inverso de un robot paralelo.* Quito : s.n., 2016.

IDELSON, S. *Simulación numérica de la biomecánica del hombro.* Santa Fe, Argentina : s.n., 2002.

INEC. *Hospital del IESS adquiere equipos para rehabilitación.* Cuenca, Azuay, Ecuador : s.n., 11 de Enero de 2016.

IPH. *Cables de acero* [En línea] España. [Citado el: 13 de Noviembre de 2017.] Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8078989/>.

http://www.rosarioagroindustrial.com/archivos/arc_productos/20160304100326_CABLE_USOS_GENERALES.pdf.

JARAMILLO, A. *Cinematica de Manipuladores Robóticos*. España : s.n., 2010. [En línea] 2008. [Citado el: 15 de 06 de 2017.] Disponible en:http://www.wag.caltech.edu/home/ajaramil/libro_robotica/cinematica.pdf.

KHURMI, R. et al; *Machine Design*. Primera. New Delhi : S.Chand & Company Ltd., 2005. págs. 727-758. 1.

KWAKKEL, G. *Lesiones del hombro más comunes* [En línea] 22 de Abril de 2008. [Citado el: 02 de Agosto de 2017.] Disponible en: https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/17876068?ordinalpos=3&itool=EntrezSystem2.PEntrez.Pubmed.Pubmed_ResultsPanel.Pubmed_DefaultReportPanel.Pubmed_RVDocSum.

LAJARA, J. *LabVIEW entorno grafico de programación*. Barcelona : MARCOMBOS.A, 2007, pág. 182.

LÓPEZ, G. *Manipulador robótico con visión artificial*. España, septiembre de 2014. Ingeniería.

LUGMAÑA, G. *Anuario de estadísticas Hospitalarias: Egresados y Camas 2014*. INEC. Quito : s.n., 2014.

MÉNDEZ. *Manual Para la formación de Operadores de Grua*. Octava. s.l. : LexNova, 2006. págs. 179-186.

MOTT, R. *Diseño de elemntos de máquinas*. CUARTA. México : PRENTICE.HALL.INC, 2006. pág. 434.

MOYANO, J. *Equipos de rehabilitación adquiridos por el IESS* [En línea] 2015. [Citado el: 23 de 05 de 2017.] Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8078989/>. https://www.iess.gob.ec/en/web/afiliado/noticias?p_p_id=101_INSTANCE_3dH2&p_p_lifecycle=0&p_p_col_id=column-

2&p_p_col_count=4&_101_INSTANCE_3dH2_struts_action=%2Fasset_publisher%2Fview_content&_101_INSTANCE_3dH2_assetEntryId=4747182&_101_INSTANCE_3dH2_typ.

MYZCA. *Máquinas y mecanismos.* págs. 260-280.

NIAMS. *Problemas de hombro. NIAMS.* [En línea] NIH, 01 de 11 de 2014. [Citado el: 2017 de 06 de 04.] www.niams.nih.gov. 1.

NORTON, R. *Diseño de Máquinas.* Cuarta. Mexico : Person Education, 2011. págs. 543-595.

PEDRAZA, F., et al; *Aproximación al diseño de robots paralelos, análisis de caso del robot delta.* Evigaado : s.n., 2015, págs. 216-224.

PÉREZ, M. *Desarrollo de un Robot planar paralelo conducido por cables.* Madrid : s.n., 2015.

RIBA, C. *Diseño concurrente.* Catalunya : Univ. Politec. de Catalunya, 2002. 8483015986.

RODRIGUEZ, C. *Movimiento del brazo humano: de los tres planos a las tres dimensiones.* Bogota : Antonio garcia rozo, 2005, Vol. 22.

RODRIGUEZ, M., et al; *Validación del prototipo de robot de cables CoGiRo para tareas de manipulación y ensamblaje de piezas complejas de alto valor económico.* [En línea] 22 de Septiembre de 2015. [Citado el: 15 de Agosto de 2017.] Disponible en: <https://www.interempresas.net/MetalMecanica/Articulos/144648-Validacion-prototipo-robot-cables-CoGiRo-tareas-manipulacion-ensamblaje-piezas-complejas.html>.

SICURI, Ch., et al; *Robotics in shoulder rehabilitation.* Italia : s.n., 2014, págs. 207-213.

TAVOLEIRI, C. *Design of a CAble-Basedparallel Manipulator for Rehabilitation Applications.* 2008.

EI TELEGRAFO, *Hospitales del IESS incorporan equipos robóticos para rehabilitación física.* Quito, Pichincha, Ecuador : s.n., 27 de septiembre de 2013.

URREA, L. *Diseño e implementación de una plataforma robótica tipo delta.* Bogotá : s.n., 2012. pág. 51.

FRANKEL V. *Biomecánica Básica del sistema muscoesquelético.* Tercera. España : Mc Graw Hill, 2001. págs. 341-342.

VIVAS, A. *Robotica paralela:Aplicaciones industriales,modelado y control.* Popayan : s.n., 2007.

