

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**

**FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA**



**DISEÑO DE ROBOT MANIPULADOR CON EFECTOR FINAL  
ENCORTE LÁSER APLICADO AL SECTOR TEXTIL PERUANO**

**Tesis para obtener el título profesional de Ingeniero  
Mecatrónico**

**AUTOR:**

**DÍAZ GODOS, Diego Fernando**

**ASESOR:**

**QUIROZ VELÁZQUEZ, Diego Eduardo**

**Lima, Abril, 2023**

### Informe de Similitud

Yo, Diego Eduardo Quiroz Velasquez, docente de la Facultad de Ciencias e Ingeniería de la Pontificia Universidad Católica del Perú, asesor(a) de la tesis/el trabajo de investigación titulado

DISEÑO DE ROBOT MANIPULADOR CON EFECTOR FINAL ENCORTE LÁSER APLICADO AL SECTOR TEXTIL PERUANO,

del/de la autor(a)/ de los(as) autores(as)

Diego Fernando Díaz Godos,

dejo constancia de lo siguiente:

- El mencionado documento tiene un índice de puntuación de similitud de 6%. Así lo consigna el reporte de similitud emitido por el software *Turnitin* el 31/07/2023.
- He revisado con detalle dicho reporte y la Tesis o Trabajo de Suficiencia Profesional, y no se advierte indicios de plagio.
- Las citas a otros autores y sus respectivas referencias cumplen con las pautas académicas.

Lugar y fecha: Lima, 01 de Agosto 2023

Apellidos y nombres del asesor / de la asesora: <u>Quiroz Velasquez, Diego Eduardo</u>	
DNI:45872538	Firma 
ORCID: 0000-0001-8505-3045	

## RESUMEN

La presente tesis describe la problemática del sector textil peruano frente a otros mercados internacionales, como el de China; y la solución propuesta: la implementación de un sistema robótico que permita mejorar la eficiencia de procesos. En los subsiguientes capítulos se detalla el sistema mecatrónico en su conjunto, así como la arquitectura de funciones y los diagramas de flujos generales y específicos. Adicionalmente, en el capítulo 3 y 4 se explica detalladamente el diseño del brazo robótico y la mesa de corte, respectivamente; desde el enfoque mecánico, electrónico, selección de componentes y actuadores. Para el brazo robótico, se exponen las ecuaciones de control y procedimientos necesarios para el correcto funcionamiento del sistema mecatrónico. Por último, se presentan las simulaciones mecánicas para resistencia de los elementos mecánicos, resaltando los parámetros de esfuerzos de Von Mises, desplazamiento y factor de seguridad, para ser validados en su diseño; y los costos de los elementos más resaltantes dentro del diseño mecatrónico.

Agradecimiento:

A mi familia por el apoyo constante durante todos los años de mi formación profesional, en especial a mis padres por sus enseñanzas de vida. A los profesores que dedicaron tiempo en educar y enseñar sus conocimientos para que esta tesis sea realidad.



**INDICE DE CONTENIDO**

	Pág.
RESUMEN .....	i
INDICE DE TABLAS .....	iv
INDICE DE FIGURAS .....	v
LISTA DE SÍMBOLOS .....	vii
INTRODUCCIÓN .....	1
CAPÍTULO 1: ANÁLISIS DEL PROBLEMA Y ESTADO DEL ARTE.....	2
1.1 Planteamiento del Problema.....	2
1.2 Objetivos de tesis.....	8
1.2.1 Objetivo General.....	8
1.2.2 Objetivos Específicos .....	8
1.3 Diseño Conceptual.....	9
1.3.1 Caja Negra.....	9
1.3.2 Estructura de Funciones .....	11
1.3.3 Matriz Morfológica.....	17
1.3.4 Concepto de Solución .....	18
1.3.5 Evaluación técnica-económica .....	24
1.3.6 Concepto de Solución Óptima.....	27
1.4 Alcance .....	28
1.5 Metodología .....	29
1.6 Antecedentes .....	30
CAPÍTULO 2: SISTEMA MECATRÓNICO INTEGRAL .....	32
2.1 Sistema Mecatrónico.....	32
2.2 Diagrama de Operaciones .....	33
2.3 Arquitectura de Hardware.....	34
2.4 Diagrama de Flujo .....	36
CAPÍTULO 3: DISEÑO DEL BRAZO ROBÓTICO.....	41
3.1 Diseño Mecánico .....	41
3.1.1 Base.....	41
3.1.2 Brazo.....	45
3.1.3 Antebrazo .....	47

3.2	Selección de materiales.....	49
3.3	Selección de motores .....	50
3.4	Selección de componentes .....	52
3.4.1	Sensores .....	52
3.4.1.1	Encoder inductivo .....	53
3.4.1.2	Acelerómetro lineal .....	54
3.4.1.3	Sensor láser .....	55
3.4.2	Microcontrolador .....	56
3.5	Estrategia de control .....	57
3.5.1	Cinemática Inversa.....	57
3.5.2	Cinemática Directa .....	58
3.5.3	Control PID .....	60
3.5.4	Filtro de Kalman.....	61
3.6	Diseño de PCB .....	61
3.7	Lista de Planos Mecánicos .....	62
CAPÍTULO 4: DISEÑO DE MESA DE CORTE .....		64
4.1	Diseño Mecánico .....	64
4.2	Selección de componentes .....	66
4.2.1	Microprocesador.....	66
4.2.2	Microcontrolador .....	67
4.2.3	HMI.....	67
4.3	Selección de motores .....	68
4.4	Lista de Planos Mecánicos .....	70
CAPÍTULO 5: SIMULACIONES MECÁNICAS.....		71
5.1	Simulaciones Mecánicas del Brazo Robótico .....	71
5.1.1	Base.....	72
5.1.2	Brazo.....	75
5.2	Costos Generales .....	79
RECOMENDACIONES .....		80
CONCLUSIONES .....		81
BIBLIOGRAFIA.....		82

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Evaluación técnica de los conceptos de solución. ....	25
Tabla 1.2. Evaluación Económica de los conceptos de solución.....	36
Tabla 1.3. Comparación entre modelos comerciales de corte láser .....	31
Tabla 3.1. Propiedades de materiales para impresión 3D.....	49
Tabla 3.2. Comparativa de motores para el movimiento del brazo.....	51
Tabla 3.3. Comparativa de motores para el movimiento del antebrazo .....	51
Tabla 3.4. Comparativa de motores para el movimiento del cabezal láser.....	52
Tabla 3.5. Comparativa entre encoder inductivos comerciales.....	54
Tabla 3.6. Comparativa entre acelerómetros lineales comerciales .....	55
Tabla 3.7. Comparativa entre sensores láser comerciales .....	56
Tabla 3.8. Comparativa entre microcontroladores comerciales.....	56
Tabla 3.9. Denavit-Hatenberg del Brazo Robótico .....	59
Tabla 3.10. Lista de Planos Mecánicos del Brazo Robótico.....	63
Tabla 4.1. Comparativa entre HMI comerciales .....	68
Tabla 4.2. Comparativa de actuadores lineales.....	69
Tabla 4.3. Lista de Planos Mecánicos de la Mesa de Corte.....	70
Tabla 5.1. Lista de Costos Generales .....	79

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Variación de Montos de Exportación del Sector Textil Peruano .....	4
Figura 1.2. Diagrama de bloques del Proceso de Confección de Prendas .....	6
Figura 1.3. Tiempos de Producción por estación de trabajo... ..	7
Figura 1.4. Caja Negra del Sistema .....	9
Figura 1.5. Dominio Interfaz.....	12
Figura 1.6. Dominio Sensores .....	13
Figura 1.7. Dominio Control.....	14
Figura 1.8. Dominio Energía.....	14
Figura 1.9. Dominio Actuadores .....	15
Figura 1.10 Dominio Mecánico .....	16
Figura 1.11. Estructura de Funciones .....	17
Figura 1.12. Concepto de Solución A.....	19
Figura 1.13. Esquema eléctrico de Concepto de Solución A .....	20
Figura 1.14. Concepto de Solución B.....	21
Figura 1.15. Esquema eléctrico de Concepto de Solución B .....	22
Figura 1.16. Concepto de Solución C.....	23
Figura 1.17. Esquema eléctrico de Concepto de Solución C .....	24
Figura 1.18 Evaluación técnica-económica .....	26
Figura 1.19. Concepto de Solución Óptima .....	28
Figura 2.1. Sistema Mecatrónico.....	33
Figura 2.2. Diagrama de Operaciones .....	33
Figura 2.3. Arquitectura de Hardware del Sistema Robótico.....	35
Figura 2.4. Diagrama de Flujo General .....	36
Figura 2.5. Diagrama de Flujo de la Función: Cargar Base de Datos.....	37
Figura 2.6. Diagrama de Flujo de la Función: Regresar a Posición Inicial.....	38
Figura 2.7. Diagrama de Flujo de la Función: Proceso de Corte.....	39

Figura 3.1. Brazo Robótico .....	41
Figura 3.2. Vista Isométrica de la Base del Brazo Robótico.....	41
Figura 3.3. Vista Explosionada de la Base del Brazo Robótico .....	42
Figura 3.4. Eje de transmisión. Izquierda: Eje 1. Derecha: Eje 2.....	43
Figura 3.5. Diagrama de Cuerpo Libre de la Brida (Base) .....	45
Figura 3.6. Brazo. Arriba: Vista Isométrica. Abajo: Vista de Explosión.....	46
Figura 3.7. Diagrama de Cuerpo Libre de la Brida (Brazo).....	47
Figura 3.8. Antebrazo. Arriba: Vista Isométrica. Abajo: Vista de Explosión.....	48
Figura 3.9. Estrategia de control .....	57
Figura 3.10. Cinemático Inversa en Brazo Robótico.....	58
Figura 3.11. Diagrama de ejes del Brazo Robótico .....	59
Figura 3.12. Diagrama de bloques de Control PID .....	59
Figura 3.13. Diseño del PCB. Izq: Capa Superior. Der: Capa Inferior.....	62
Figura 4.1. Diseño mecánico de Mesa de Corte.....	65
Figura 4.2. Caja Eléctrica.....	66
Figura 4.3. Raspberry Pi 4 .....	67
Figura 4.4. Mordazas de sujeción.....	68
Figura 5.1. Simulación Mecánica Base Tapa Inferior. Arriba: Esfuerzo de Von Mises(izq), Desplazamiento (der), Abajo: Factor de seguridad .....	72
Figura 5.2. Simulación Mecánica Base Tapa Superior. Arriba: Esfuerzo de Von Mises (izq),Desplazamiento (der), Abajo: Factor de seguridad .....	73
Figura 5.3. Simulación Mecánica Base Contratapa. Arriba: Esfuerzo de Von Mises (izq),Desplazamiento (der), Abajo: Factor de seguridad .....	74
Figura 5.4. Simulación Mecánica Brazo Tapa Inferior. Esfuerzo de Von Mises .....	75
Figura 5.5. Simulación Mecánica Brazo Tapa Inferior. Arriba: Desplazamiento, Abajo: Factorde seguridad .....	76
Figura 5.6. Simulación Mecánica Brazo Tapa Superior. Arriba: Esfuerzo de Von Mises (izq), Desplazamiento (der), Abajo: Factor de seguridad .....	77
Figura 5.7. Simulación Mecánica Brazo Contratapa. Arriba: Esfuerzo de Von Mises (izq),Desplazamiento (der), Abajo: Factor de seguridad .....	78

## LISTA DE SÍMBOLOS

$M_t$ : momento torsor

[N-m] F: fuerza [N].

r: radio de eje [mm].

$M_f$ : momento flector

[N-m]. d: distancia

[mm].

$F_t$ : fuerza tangencial [N].

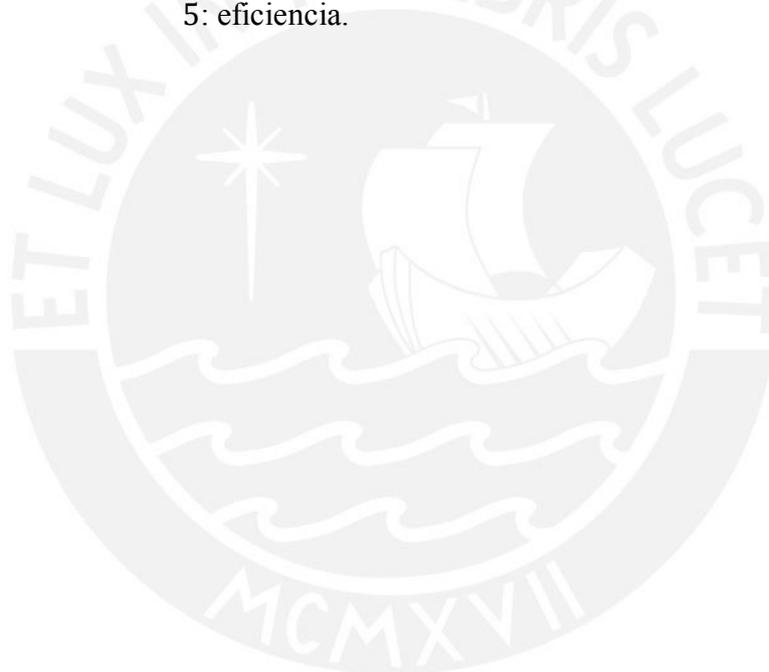
$d_2$ : diámetro primitivo [mm].

$p^s$ : ángulo efectivo de fricción [rad].

$\varphi$ : ángulo de hélice [rad].

P: paso [mm]

$\eta$ : eficiencia.



## INTRODUCCIÓN

La presente tesis detalla el diseño de un robot manipulador con efector final en corte láser aplicado al sector textil peruano para mejorar la productividad de este reduciendo tiempos de operaciones manuales como el corte de tela. En el planteamiento de problema se especifica las diferencias en el aspecto comercial entre mercados como el peruano, chino, entre otros. Además, las debilidades del sector textil peruano, el proceso de confección actual y la necesidad del diseño de este tipo de robots para el uso comercial en el Perú.

El principal objetivo de la presente tesis es el diseño de un robot manipulador aplicado al corte de tela. Se detalla el diseño mecánico, electrónico y los algoritmos de control necesarios, para que el robot manipulador pueda realizar un corte preciso de telas, como algodón o sintéticos. Asimismo, se presenta una revisión de bibliografía correspondiente a sistemas robotizados y el corte láser, atendiendo principalmente sus definiciones, tipos y aplicaciones. Además, se presenta sistema mecatrónico integrado, selección de sensores, actuadores y componentes.

Por último, se presenta en los anexos los planos mecánicos, eléctricos y diagramas de control, así como los cálculos realizados para la validación del diseño.

## **CAPÍTULO 1**

### **ANÁLISIS DEL PROBLEMA y ESTADO DEL ARTE**

En el capítulo 1, se plantea el problema principal del sector textil peruano: la falta de competitividad comparado con algunos países de Europa y Asia como China; poniendo como eje la inversión y desarrollo de la innovación tecnológica en esta industria para poder alcanzar los niveles de estos países. Además, se presenta los objetivos de la tesis, general y específicos, alcance, metodología a seguir y los antecedentes.

#### **1.1. Planteamiento del problema**

El Perú es uno de los países reconocidos a nivel mundial por ser fuente de importantes fibras de calidad, como el algodón Pima y pelos de alpaca (Diario Gestión, 2018) y es por esta materia prima que el sector textil, desde los años 80, ha ido evolucionando con tal importancia. El artículo Análisis de las Exportaciones del Sector Textil Peruano (2020)

detalla que, con el transcurso del tiempo, la textilería en el Perú se ha fortalecido y se convirtió en una industria que, sólo entre la elaboración de tejidos y vestimentas, aporta el 1,1% del PBI peruano. Asimismo, esta actividad requiere de manera intensiva la mano de obra que emplea a 424 mil personas del país y que ha permitido la constitución de Mipymes y grandes empresas que ascienden aproximadamente a 37,000 mil empresas (p. 33).

Durante el período 2017-2019, los porcentajes de exportación del sector textil peruano han sido favorables y han ido en aumento comparados con los años 2014 al 2016, como se muestra en la Figura 1.1. Según el Reporte Mensual de Comercio de Julio de 2019 del Ministerio de Comercio Exterior y Turismo, la exportación de prendas de algodón aumentó en 7%; y las exportaciones de textiles-confecciones crecieron 2% por los mayores envíos de prendas de algodón (p. 5). Además, en el año 2017, las ventas al extranjero sumaron un valor de \$1,275 millones, lo que representa un 7% de crecimiento respecto al año anterior (ComexPeru, 2018).

Es importante detallar que el sector textil peruano es competitivo internamente, pero en comparación con países como Bangladesh, la India o China, la competitividad del Perú no es significativa, y, en consecuencia, deja al país con una porción pequeña de la demanda global (Laguna, Orozco, Piedra, Olarte, 2020, p. 41). En particular, comparando los porcentajes de exportación mundial del sector textil peruano, que sumó un total de 1,288 millones de dólares, con la exportación textil china, que alcanzó la cifra de 119 millones de dólares (Organización Mundial del Comercio, 2018, p. 119), la cual representa el 37.6% del total de exportaciones a nivel mundial en el año 2018 (Textile World, 2019).

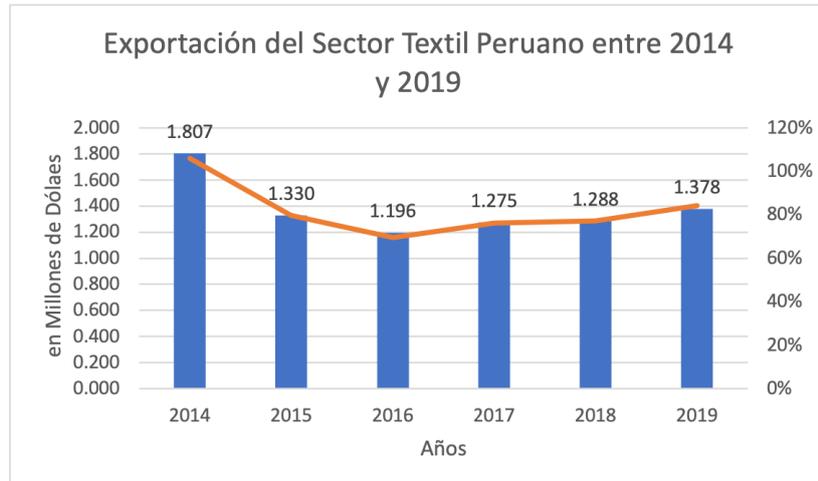


Figura 1.1. Variación de Montos de Exportación del Sector Textil Peruano. Fuente: ComexPeru.

Las principales debilidades del sector textil peruano son: la ausencia de diseñadores que se adapten a los distintos mercados y la baja capacidad de innovación y de desarrollo tecnológico (Calderón, Leiva, Miranda, País 2017, p.78). Además, Carmen León, representante comercial en el Perú, Colombia y Guatemala de UBM (United Business Media) de Estados Unidos, complementa que: “nos falta mucho por recorrer en la incorporación de tecnología [...], veo que todavía el sector de confecciones les falta un mayor esfuerzo e inversión” (Diario Gestión, 2018).

En contraste con la realidad peruana, los países productores de hilos o telas, como China, Bangladesh y Vietnam, utilizan maquinaria de punta y hacen uso de la innovación, ya que, estos factores se requieren en las nuevas técnicas de fabricación. Este hecho provocó incrementos de la productividad y la reubicación de un gran número de empleos, lo que llevó al éxito a los países asiáticos en el sector textil, ocupando así el primer lugar en las exportaciones textiles (López, Rodríguez, 2016, p. 158).

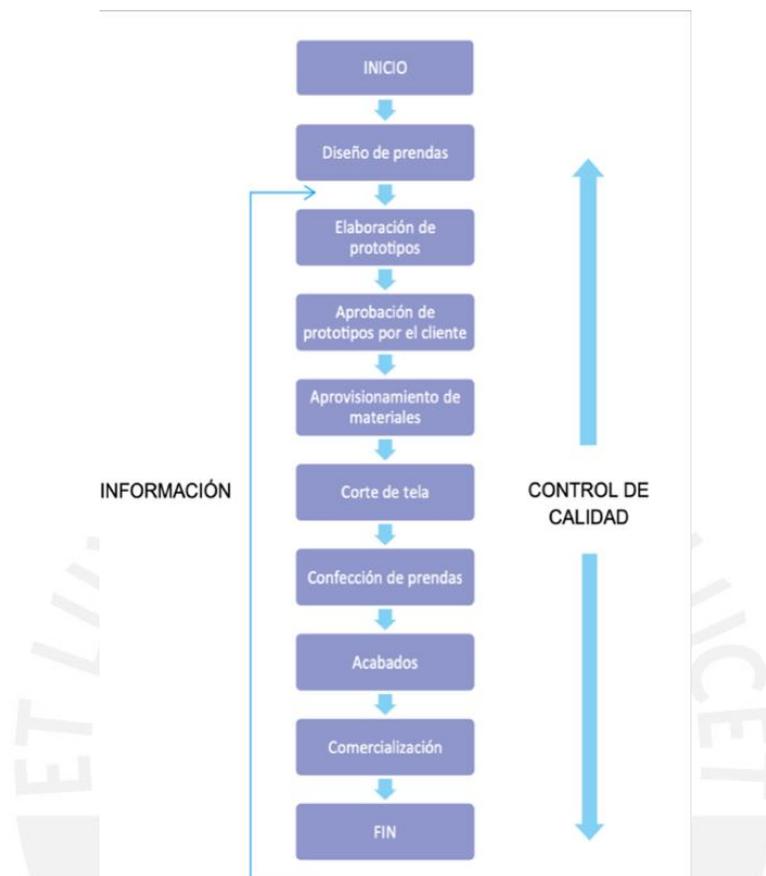
Uno de los factores de competencia en los mercados internacionales, sobre todo en mercados como el de Estados Unidos, es el menor precio en productos textiles adoptados

por países de Asia. Por ejemplo, Bangladesh y Vietnam han ganado una cuota importante dentro del mercado textil internacional debido a sus bajos costos laborales (Gaille, 2018). Sin embargo, China ha optado por una estrategia de competencia enfocada en innovación tecnológica. Las inversiones dentro de la industria textil china se han enfocado en el fomento de la innovación y tecnología de su maquinaria, teniendo como respuesta, un aumento en la productividad (Textile World, 2019). Es así como China constituye el mayor mercado de la industria textil. En el año 2015, el país contaba con 708 empresas dedicadas a la manufactura de maquinaria textil, las cuales abastecía el 80% del mercado local (Colomer Pons, 2016, p.2).

Son estos cambios del entorno que están obligando a todo el contexto textil a adquirir nuevos conocimientos e incorporar tecnologías avanzadas, con tal de hacer frente a un proceso de reestructuración y modernización permanente. Actualmente, se encuentran productos textiles para mercados muy diferentes altamente tecnificados y con un elevado nivel de exigencia (Torres, 2017, p. 13). Asimismo, Luis Torres (2017) especifica: “si se considera la competitividad del mercado global, el camino es invertir en generar valor agregado y profundizar la profesionalización de nuestros procesos de producción” (p. 14). Por otro lado, Martín Reaño, gerente del Comité Textil de la Sociedad Nacional de Industria agrega que: “[...]. Perú no puede competir en los mercados de bajos precios, por eso son más las empresas que apuestan por ofrecer productos con mayor valor agregado [...]”.

Para poder definir en que punto de la confección es necesario ofrecer un valor agregado es importante conocer el proceso de confección en el Perú, el cual fue detallado por el Ministerio de Economía y Finanzas en el año 2016 en un informe técnico llamado Pauta Metodológica para la Elaboración de Planes de Negocio de Confecciones Textiles

en el Marco de la Ley Procompite, en el cual presenta el diagrama de bloques de cada subproceso para la obtención de prendas, como se aprecia en la Figura 1.2 (p. 61).



*Figura 1.2.* Diagrama de bloques del Proceso de Confección de Prendas. Fuente: Ministerio de Economía y Finanzas.

Adicionalmente, en el mismo informe se presenta el tiempo que toma cada estación de trabajo por cada prenda, siendo operaciones manuales - como el corte- la estación de trabajo que más tiempo dispone de todo el proceso (36.5% del tiempo total), como se observa en la Figura 1.3. Estos tiempos son estándares de producción logrados en condiciones normales, pero considerando una eficiencia del 40%, el proceso completo toma 22 minutos para realizarse una prenda; es decir 13.2 minutos adicionales sobre el estándar.

ESTACIÓN DE TRABAJO	TIEMPO / PRENDA MIN / PRENDA
Maquina de costura recta	1.63
Maquina de remalle	2.28
Maquina de recubre	0.90
Maquina ojaladora	0.57
Maquina botonera	0.21
Operaciones manuales	3.21
<b>TOTAL</b>	<b>8.8</b>

*Figura 1.3.* Tiempos de producción por estación de trabajo. Fuente: Ministerio de Economía y Finanzas.

La estructura empresarial de la industria textil está formada en gran parte por microempresas (95%), de las cuales 64% se consideran microempresas de subsistencia, es decir que sus ventas no superan las 13 UIT (de sus siglas, unidad impositiva tributaria), que (PRODUCE, 2015). Se debe recalcar que este porcentaje es obtenido a partir de empresas registradas en SUNAT, es decir, empresas formales. Este es un factor importante, ya que, la información específica de las empresas informales, tanto su flujo económico, como la tecnología que usan; no es documentada y, por ende, no se puede analizar.

El Perú ha invertido desde el 2010 aproximadamente 800 millones de dólares en maquinariay equipos de última generación para la industria textil, que es importada de Europa, Asia y Estados Unidos (Calderón, Leiva et al, 2017, p. 62). China, principalmente, exporta a este sector máquinas de coser, maquinaria para tricotar coser por cadena, máquinas para lavar y máquinas para trabajo de piel como cuero y calzado (Laguna, Orozco et al, 2020, p. 43), la cual se adquiere cuando existe la disponibilidad de recursos para impulsar la producción y exportación (Calderón, Leiva et al 2017, p.6). Sin embargo, no se ha invertido en maquinaria que reduzca el tiempo de operaciones

manuales, como el corte, marcado, extendido, entre otras; siendo estas las funciones que más tiempo toma durante el proceso de confección, ni en tecnología que permita agregar valor a las prendas confeccionadas, como el sellado de bordes sin procesos adicionales y mejores acabados para diseños y prototipos.

En otros países, existen máquinas de corte de tela mediante tecnología de corte láser. La mayoría de estas máquinas y robots de corte láser son de tipo PPP, es decir, una mesa donde se apoya el material a cortar y un cabezal que se mueve en un plano horizontal. Sin embargo, la mayor dificultad con respecto a la geometría es que si se requiere cortar un patrón o molde de mucha área, se necesitará una máquina más grande para poder hacer el proceso. Por ejemplo, el modelo KUKA KR70 LP tiene un área de trabajo de  $0.5\text{m}^3$ , mientras que el volumen del robot es de  $25\text{m}^3$ ; es decir 50 veces más que su área de trabajo. Además, el otro factor que dificulta la implementación de estos sistemas en microempresas es el costo, ya que no solo se compra el robot manipulador, sino que se compra el controlador y circuitería específica para cada marca o modelo.

Debido a ello, el presente trabajo busca diseñar un sistema robotizado con aplicación de corte láser para reducir el tiempo de confección de prendas, especialmente el de operaciones manuales; y además ofrecer un valor agregado a los diseños y prendas.

## **1.2. Objetivos de tesis**

### **1.2.1. Objetivo general**

Diseñar un sistema robotizado aplicado a corte láser para mejorar el proceso de confección en el sector textil peruano.

### **1.2.2. Objetivos específicos**

- Definir un concepto de solución óptima para resolver la problemática planteada de

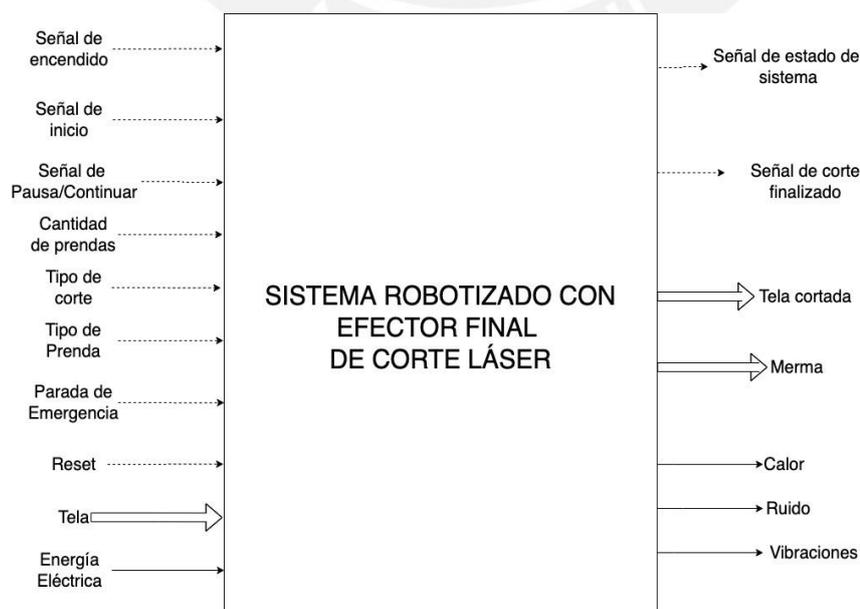
la baja competitividad del sector textil peruano.

- Diseñar los mecanismos para un brazo manipulador con tres grados de libertad como mínimo.
- Seleccionar el sistema de corte láser, indicando el tipo de láser a utilizar y la potencia necesaria
- Diseñar un algoritmo de control que permita reducir lo máximo posible el error de posición del cabezal que contiene el láser.
- Elaborar un presupuesto detallado para revisar la viabilidad del proyecto.

### 1.3. Diseño Conceptual

#### 1.3.1. Caja Negra

El sistema de robot manipulador con aplicación de corte láser recibirá entradas al inicio del proceso, que se dividen en señales, materia y energía; para poder operar y obtener resultados, que son conocidas como salidas. En esta sección se plantea de manera general la abstracción del sistema. En la *Figura 1.4*, se observa la caja negra del proyecto indicando las entradas y salidas.



*Figura 1.4.* Caja Negra del Sistema. *Fuente:* Elaboración Propia.

## **Entradas**

Las entradas del sistema son:

### **Señales:**

- Señal de encendido: indica si el sistema está disponible para su uso
- Señal de inicio: indica el inicio del proceso de corte
- Señal de Pausa/Continuar: ante cualquier eventualidad, se puede pausar el proceso de corte y luego continuar si es que las condiciones son dadas.
- Cantidad de prendas: señal que especifica la cantidad de prendas que cortan en el proceso.
- Tipo de Corte: detalla los tipos de corte que existe en el sistema: corte de capas para confección o corte de prototipos donde la precisión es clave.
- Tipo de Prenda: indica si se corta un polo, pantalón, falda, entre otros; para poder obtener las dimensiones del área de corte
- Parada de Emergencia: señal que desenergiza el sistema si se encuentra un eventual riesgo o daño hacia el proceso u operarios.
- Reset: señal que indica el regreso a la posición HOME del sistema.

### **Materia:**

- Tela: capa de algodón, sintético o material textil que va a ser cortado.

### **Energía:**

- Energía eléctrica: se encarga de energizar el sistema con flujo de corriente de 220V/60Hz.

## Salidas

Las salidas de la caja negra son:

### Señales:

- Señal de estado del sistema: indica si el sistema se encuentra en proceso de corte, está detenido o en parada de emergencia.
- Señal de corte finalizado: indica que el proceso de corte ha sido completado.

### Materia:

- Tela cortada: material cortado y adecuado para el próximo proceso de confección.
- Merma: retazos de tela sobrantes propios del corte.

### Energía:

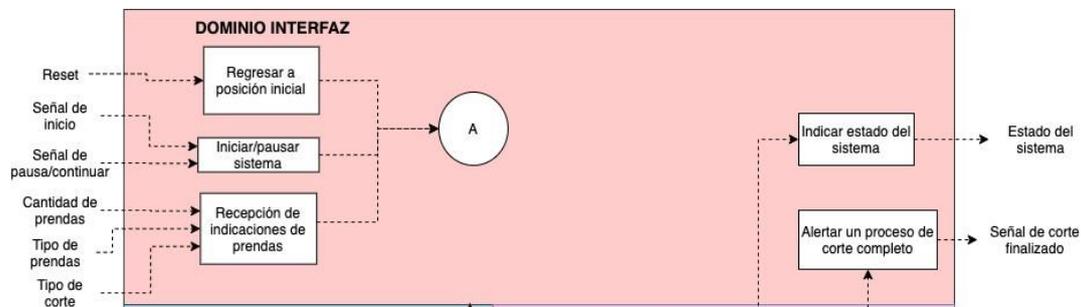
- Calor: energía expulsada debido al trabajo mecánico de los motores y componentes electrónicos.
- Ruido: energía sonora expulsada por el giro de los ejes de los motores y de los componentes mecánicos.
- Vibración: energía que disminuye la eficiencia mecánica de los motores, ejes y sistemas de transmisión de potencia.

### 1.3.2. Estructura de Funciones

La función principal del sistema de corte láser es el corte de tela para su posterior confección, realizando el proceso en menor tiempo que tomaría la forma convencional. A través del diagrama de estructura de funciones, se puede identificar los subprocesos que cada dominio ejecuta y tiene a cargo. Los dominios establecidos para este sistema de corte láser son los siguientes:

## Dominio Interfaz

En la *Figura 1.5* muestra el dominio interfaz, sus entradas y salidas, así como las siguientes funciones:



*Figura 1.5.* Dominio Interfaz. *Fuente:* Elaboración Propia.

- Regresar a posición inicial: después de presionar el dispositivo de emergencia, el sistema regresará a la posición inicial configurada de fábrica.
- Iniciar/pausar sistema: función de iniciar el sistema una vez estén todas las indicaciones de prendas definidas y pausar el sistema ante cualquier necesidad.
- Recepción de indicaciones de prendas: función que recoge las señales de cantidad de prendas, tipo de prendas y tipo de corte a efectuar en el proceso.
- Indicar estado del sistema: función que indica el estado del sistema, si está en pausa, en proceso de corte o ya finalizado
- Alertar un proceso de corte completo: indica la finalización del proceso de corte.

## Dominio Sensores

El dominio sensores atiende a obtener ciertos parámetros que van a ser controlados o monitoreados, como se observa en la *Figura 1.6*. Las funciones del dominio sensores son las siguientes:

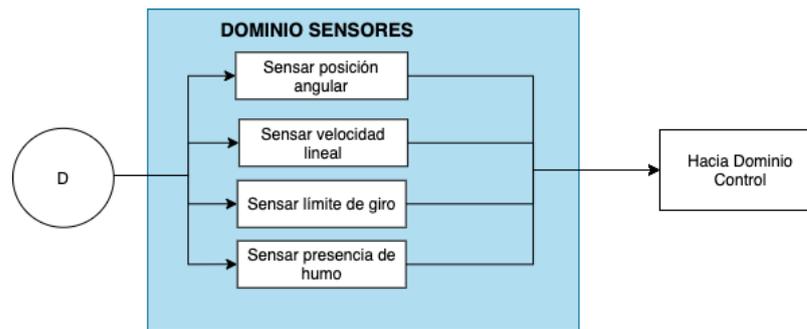


Figura 1.6. Dominio Sensores. Fuente: Elaboración Propia.

- Sensor posición angular: función encargada de recoger la posición angular de los motores para su procesamiento posterior.
- Sensor velocidad lineal: encargada de sensar la velocidad lineal de los elementos mecánicos.
- Sensor límite de giro: función que detecta el máximo punto de rotación del eje del motor para definir su rango de trabajo.
- Sensor presencia de humo: detecta la presencia de humo profuso en el ambiente de trabajo por algún sobrecalentamiento o quema indebida de algún material.

### **Dominio Control**

El dominio de control se encarga de procesar la información recogida por los sensores y procesar la información del sistema, introducida a través de la interfaz, para generar el movimiento y los diversos parámetros de corte necesario para cumplir la función principal, como se muestra en la *Figura 1.7*. Las funciones de este dominio son:

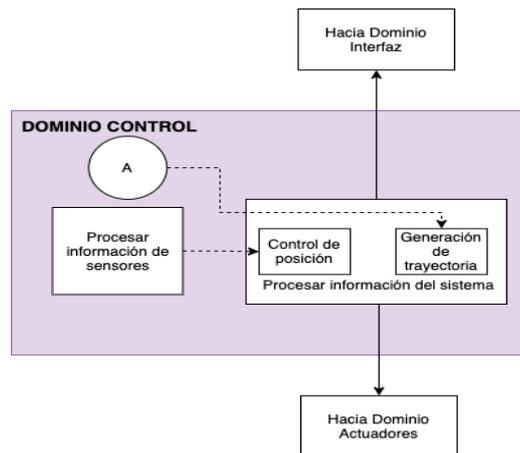


Figura 1.7. Dominio Control. Fuente: Elaboración Propia.

- Procesar información de sensores: recoge las señales e información de los sensores y los procesa para su uso y análisis.
- Procesar información del sistema: recoge las señales e información de la interfaz y genera el movimiento y señales de salida.

### Dominio Energía

El dominio de energía engloba el acondicionamiento y suministro de energía a los dominios de sensores, interfaz, control y actuadores, como se aprecia en la *Figura 1.8*. Las funciones comprendidas son las siguientes:

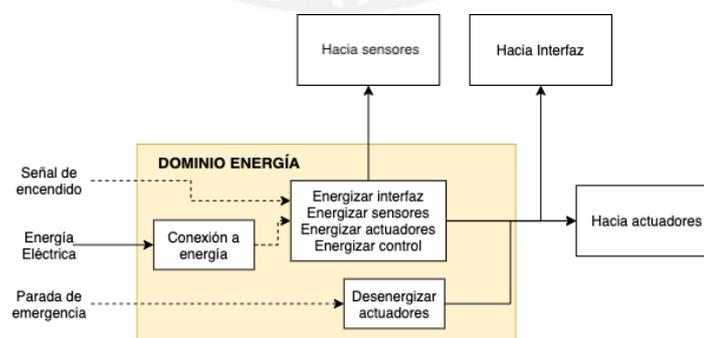


Figura 1.8. Dominio Energía. Fuente: Elaboración Propia.

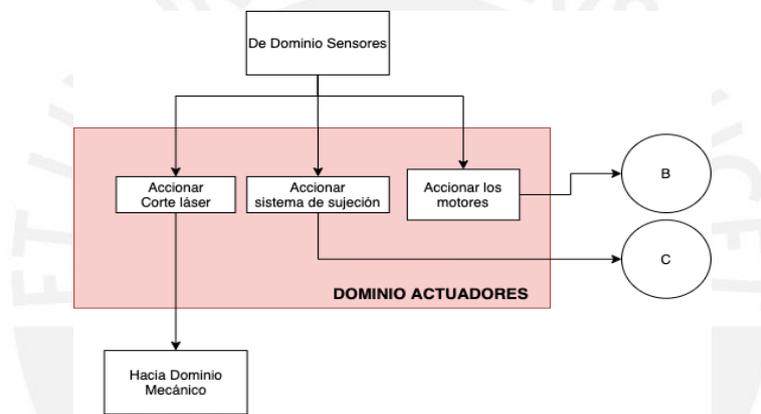
- Conexión a energía: función que trata de la conexión a la energía eléctrica que necesita el

sistema.

- Energizar interfaz, sensores, actuadores y control: energiza los dominios para su correcto funcionamiento
- Desenergizar actuadores: función que se encarga de desenergizar el dominio de actuadores una vez se active la parada de emergencia.

### Dominio Actuadores

Se enfoca en la acción de los componentes para cumplir la función principal: el corte de tela. Para el sistema desarrollado se necesitan tres actuadores, como lo muestra la *Figura 1.9*:



*Figura 1.9.* Dominio Actuadores. Fuente: Elaboración Propia.

- Accionar corte láser: accionar el láser para cortar las telas
- Accionar sistema de sujeción: accionar la sujeción para mantener extendida la tela.
- Accionar motores: accionar los motores para el movimiento necesario del sistema.

### Dominio Mecánico

Por último, el dominio mecánico se encarga del desplazamiento y sostén de los componentes materiales dentro del sistema. La *Figura 1.10*. muestra como única entrada la tela y como salida tanto vibración, ruido, calor; como la tela cortada y su merma. A continuación, se definen las funciones del dominio mecánica:

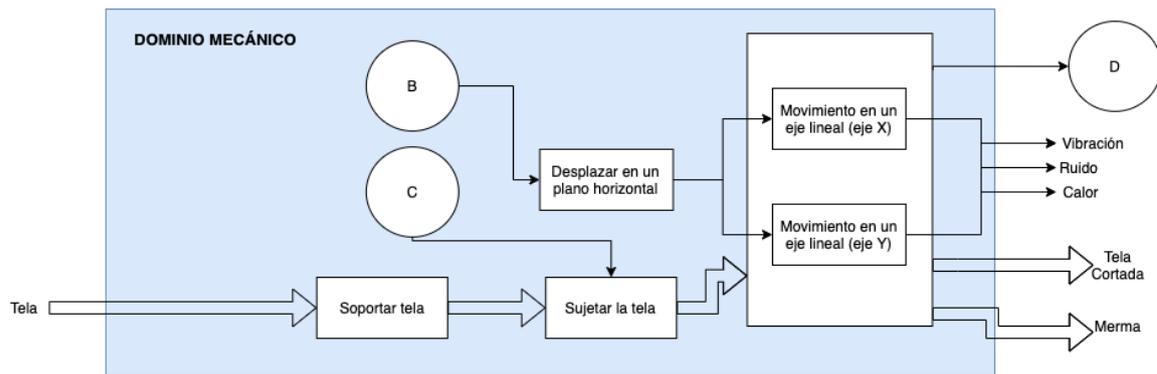


Figura 1.10. Dominio Mecánico. Fuente: Elaboración Propia.

- Desplazar en un plano horizontal: función encargada del desplazamiento del sistema en un plano horizontal. Define el tipo de configuración mecánica del sistema.
- Movimiento en un eje lineal (eje X): función encargada de mover el sistema en un eje lineal, en este caso el eje cartesiano X.
- Movimiento en un eje lineal (eje Y): función encargada de mover el sistema en un eje lineal, en este caso el eje cartesiano Y.
- Sostener tela: función encargada de sostener la tela para el proceso de corte.
- Sujetar tela: encargada de mantener extendida la tela durante el proceso de corte.

En la *Figura 1.11* se muestra la estructura de funciones completa, indicando las entradas y salidas correspondientes, así como la relación entre dominios y funciones.

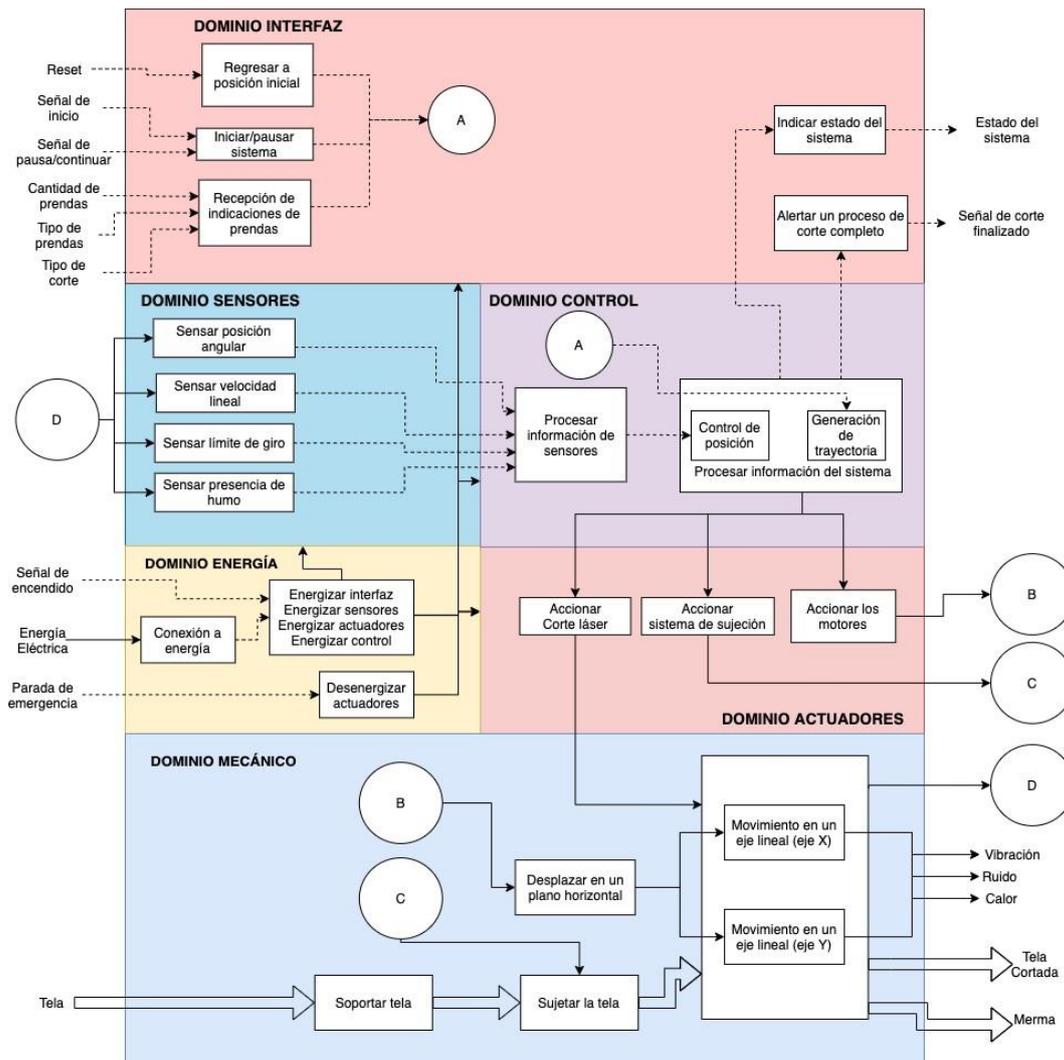


Figura 1.11. Estructura de Funciones. Fuente: Elaboración Propia.

### 1.3.3. Matriz Morfológica

La matriz morfológica presenta las opciones para las distintas funciones especificadas en la sección anterior dividiendo por dominios para tener una mejor distribución de las opciones que permitan luego relacionar para obtener los conceptos de solución. En el Anexo B5, se presenta la matriz morfológica indicando la selección de las opciones para cada solución.

### 1.3.4. Conceptos de solución

#### Concepto A

En la *Figura 1.12* y *Figura 1.13* se presenta el primer concepto de solución. El concepto A consiste en un sistema robótico de configuración tipo RRP con el láser implementado en el efector final.

En primer lugar, se observa que para el dominio interfaz se escoge la opción HMI para ingresar parámetros de corte como tipo de prenda, tipo de corte y cantidad de prendas; además cuenta con el botón digital de inicio y posición inicial, el cual permite posicionar el brazo robótico en una posición predeterminada. Por otro lado, se usan leds como indicadores del estado del sistema y el proceso de corte finalizado.

En segundo lugar, para el dominio de sensores se escoge el encoder inductivo para recoger la información de posición angular según el giro de los ejes de los servomotores que permiten el desplazamiento en un plano del robot. Adicionalmente, el acelerómetro lineal recoge la velocidad lineal del elemento en movimiento; el sensor de límite de giro de palanca fija permite reconocer el giro máximo que puede realizar el robot, representado en el detalle A; y el detector de humo térmico emite una señal de emergencia para que el brazo robótico se detenga siempre y cuando ocurra algún incidente que provoque un incendio mientras se ejecuta el proceso de corte.

Con respecto al dominio de control, para este concepto de solución se elige el microprocesador para ser el encargado de procesar la información de los sensores, a través del filtro de Kalman; y el procesamiento de la información del sistema, que tiene como tareas la recepción de los datos introducidos para luego generar la trayectoria que se realiza por medio de cinemática inversa; y posteriormente realizar el control por posición por control PID.

Por último, se escoge servomotores para el movimiento en los ejes XY de plano cartesiano y un actuador lineal que se acopla al sistema de láser de dióxido de carbono, así como las cadenas como medio de transmisión de potencia en el eslabón superior. Los ganchos serán encargados de sujetar la tela a través de la acción manual y la mesa de vacío funciona como soporte de tela. La energía será transmitida por conexión directa desde el tomacorriente y se transmite a los componentes electrónicos luego de pasar por reguladores switching. Ante el caso de cualquier eventualidad, se agrega en botón de parada de emergencia de tipo seta que desenergiza los actuadores del sistema.

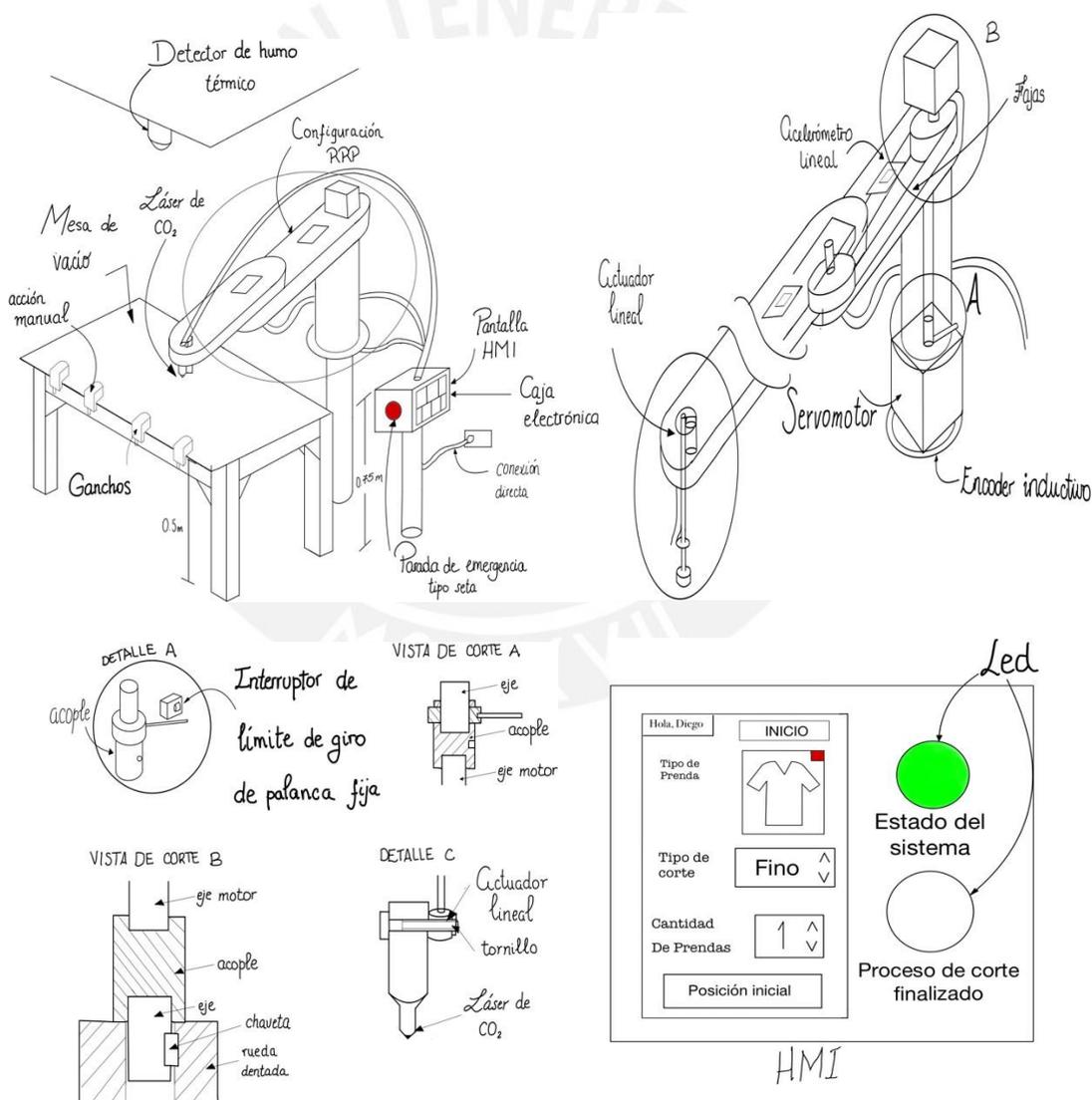


Figura 1.12. Concepto de Solución A. Fuente: Elaboración Propia.

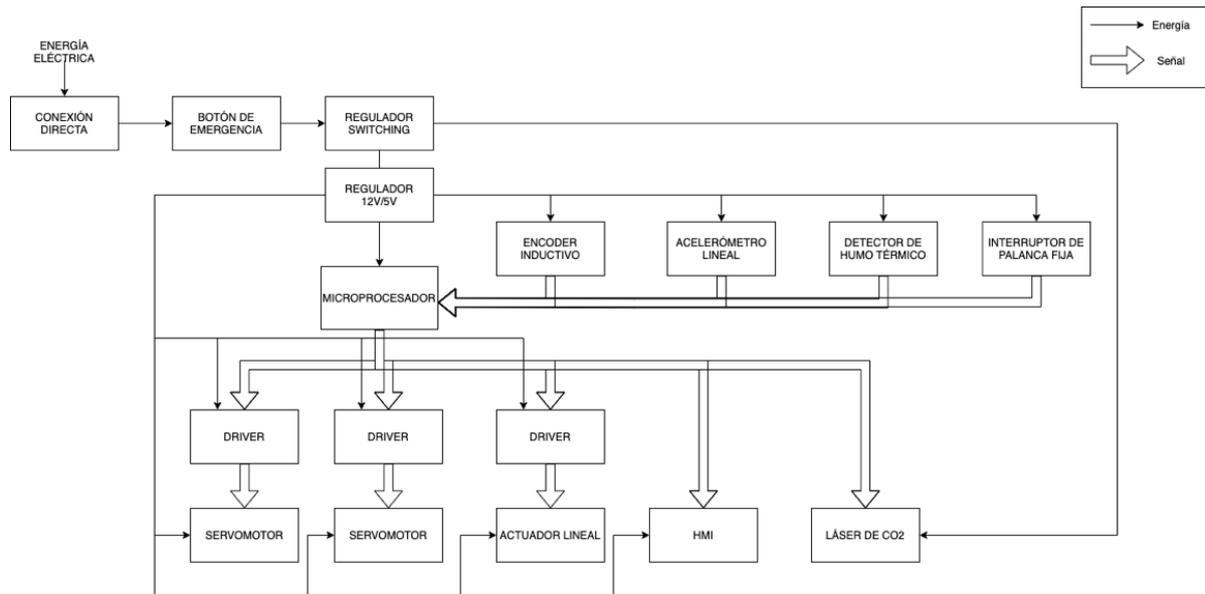


Figura 1.13. Esquema eléctrico de Concepto de Solución A. Fuente: Elaboración Propia.

## Concepto B

El concepto de solución B se presenta en la *Figura 1.14* y *Figura 1.15*. En este concepto de solución se escoge la configuración RRR o antropomórfica. En el dominio de interfaz, la aplicación móvil es el elemento que permite el ingreso de parámetros de corte y de obtener información sobre el estado del sistema y si el proceso de corte ha finalizado.

En dominio de sensores, los resolvers obtienen la posición angular de los motores DC, encargados del movimiento en los ejes XY de plano cartesiano, y acelerómetro lineal que permiten el control adaptativo del sistema. El sensor de límite de giro magnético, mostrado en el detalle A, envía una señal de máximo rango permitido de movilidad en el eje principal del robot y el detector de humo iónico detiene el sistema si existe indicio de incendio. La mini PC filtra la información de los sensores haciendo uso de filtros adaptativos para poder generar la trayectoria mediante la técnica S-curve y controla la posición del efector final mediante el control adaptativo.

Para la energización del sistema se escoge un estabilizador de corriente que luego de pasar por un rectificador de corriente, se conduce hacia los componentes electrónicos. Ante

cualquier eventual fallo o perjuicio, se añade el pulsador de habilitación como parada de emergencia. Por último, el tipo de láser elegido para este modelo es el de fibra; además, se usa un sistema de succión para la sujeción de la tela. Esto es posible gracias a la morfología de la mesa de panal de abeja.

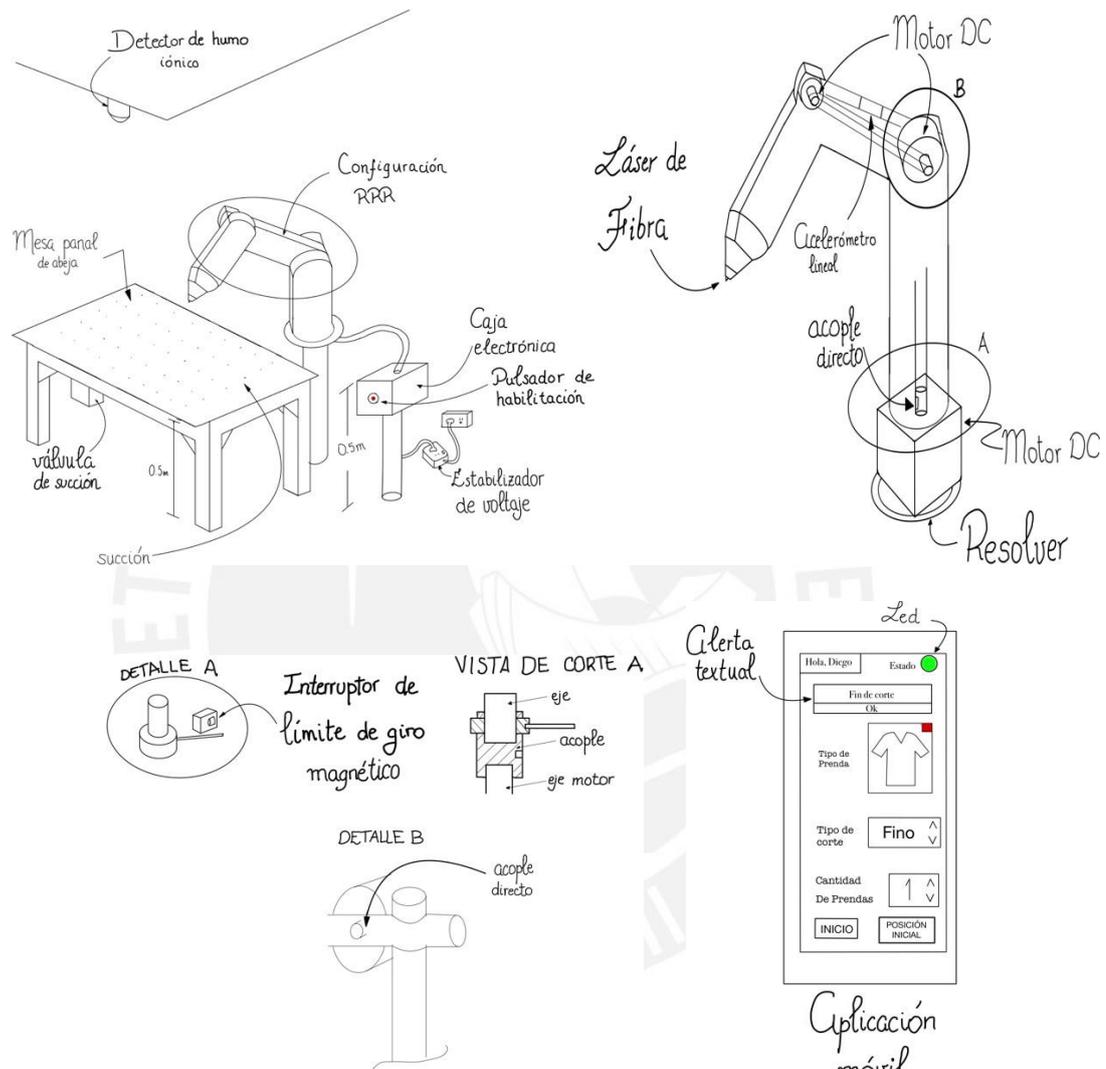


Figura 1.14. Concepto de Solución B. Fuente: Elaboración Propia.

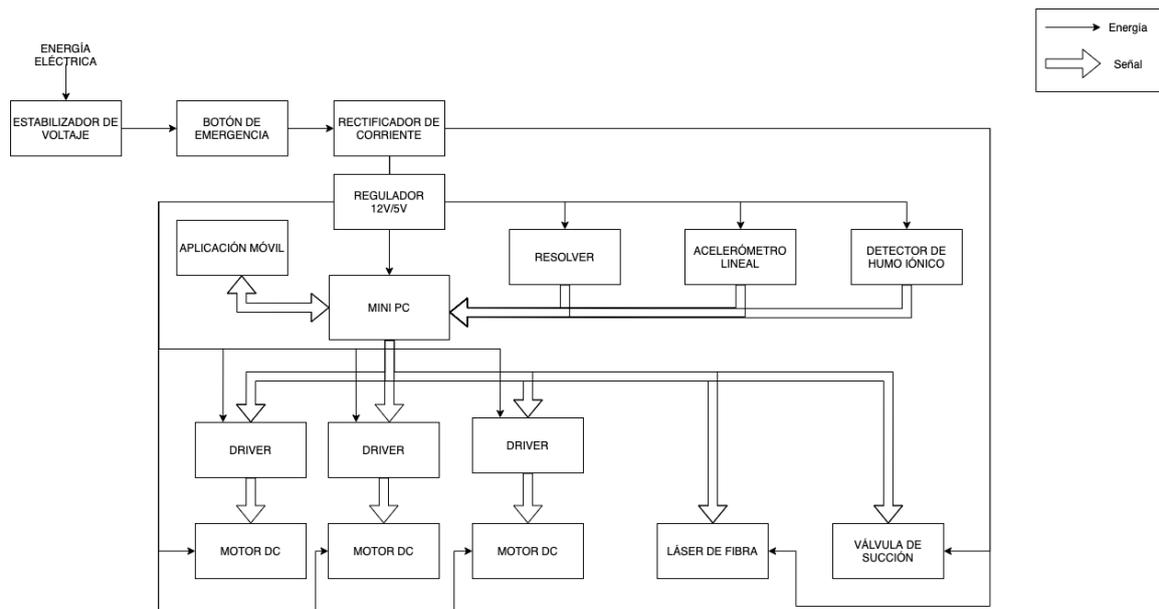


Figura 1.15. Esquema eléctrico de Concepto de Solución B. Fuente: Elaboración Propia.

### Concepto C

En la *Figura 1.16* y *Figura 1.17* se muestra el concepto de solución C. Este diseño consiste en un sistema robótico con configuración PPP o cartesiana, accionados por actuadores lineales. En el dominio de interfaz, la mayoría se reduce a botones mecánicos para el inicio del sistema y el regreso a la posición inicial. Por otro lado, el ingreso de los parámetros de corte será a través de una aplicación móvil y para obtener la información del estado del sistema y la señal de proceso de corte finalizado se usa un led y una alarma sonora, respectivamente.

En el dominio energético se escoge la opción de supresor de picos para acondicionar la energía y reguladores lineales para energizar los componentes electrónicos y controlador; y una parada de emergencia tipo seta para prevenir cualquier daño al equipo, operario o alrededores. Para el dominio de sensores se escogen encoders ópticos para determinar el giro de los motores que utilizan los actuadores lineales; y potenciómetros lineales que permite determinar la velocidad lineal de cada eje, calculando la razón de cambio de posición. Además, se incluye un interruptor capacitivo de límite de fin de carrera para determinar cuando el cabezal móvil se encuentran en su máximo desplazamiento; y un

detector de humo óptico para sensar cualquier indicio que propicie un incendio.

Para el dominio mecánico se escoge la opción de mesa de lamelas de acrílico para soportar la tela, mientras que las mordazas servirán para sujetar la tela, estas accionadas a través de servomotores. Cabe resaltar que los actuadores lineales consisten en un motor acoplado directamente a un tornillo sin fin.

Por último, para el dominio control se elige un microcontrolador para procesar la información de los sensores y del sistema, a través del filtro de Kalman y la interpolación cuadrática con control PD, respectivamente.

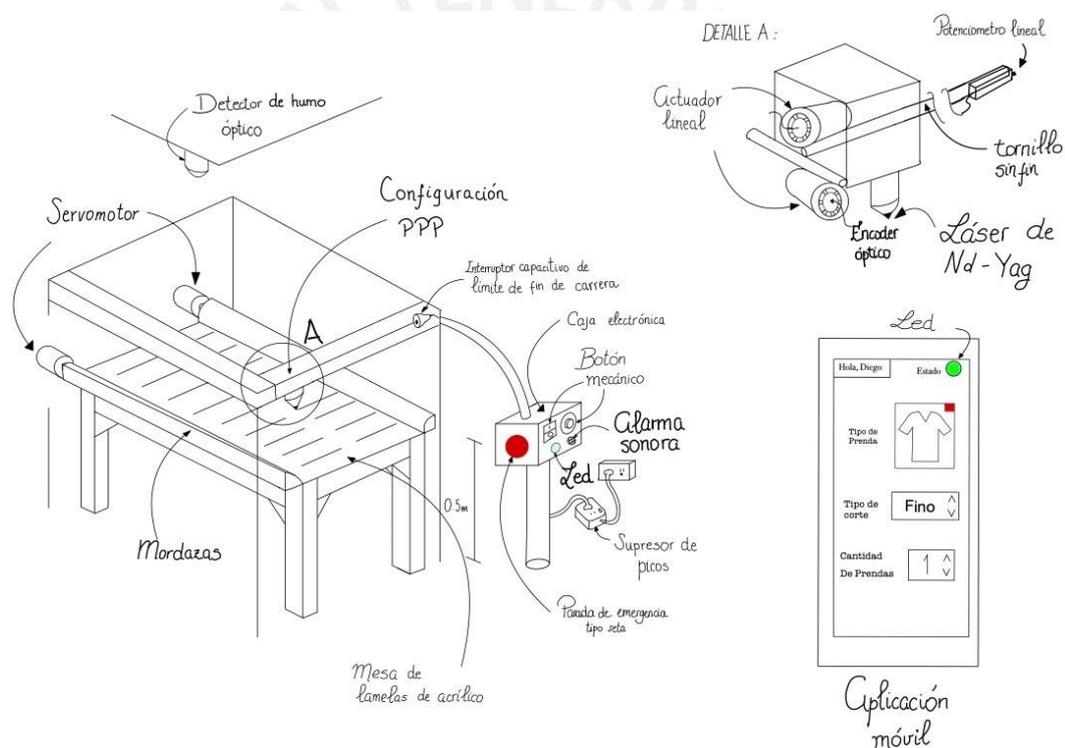


Figura 1.16. Concepto de Solución C. Fuente: Elaboración Propia.

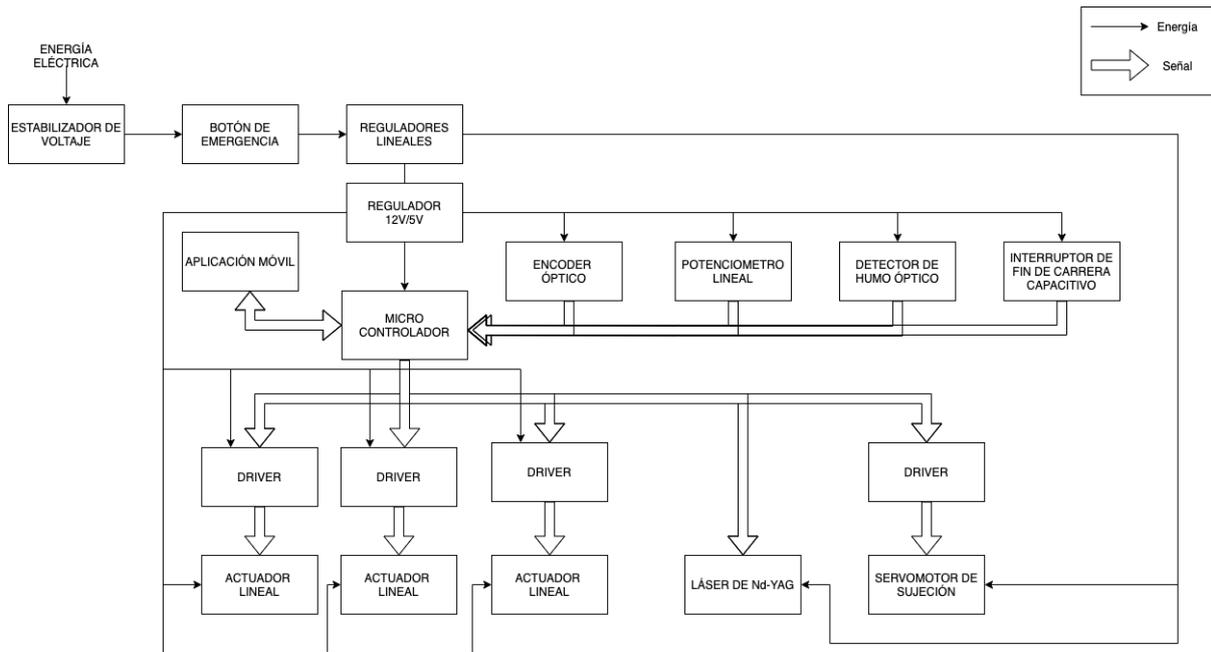


Figura 1.17. Esquema eléctrico de Concepto de Solución C. Fuente: Elaboración Propia.

### 1.3.5. Evaluación técnica-económica

En esta sección se realiza la evaluación técnica y económica de los tres conceptos de solución. Según la metodología VDI 2221, a cada criterio de evaluación se le añade un peso según la importancia, y este valor se multiplica con el puntaje asignado, que varía entre 1 y 3, a cada solución.

En la Tabla 1.1, se presenta la evaluación técnica según los criterios determinados por el diseñador y siguiendo los requerimientos de la lista de exigencia. En este caso, el criterio que tiene mayor peso es precisión, ya que, el error de posición de seguimiento de trayectoria debe ser máximo de 2mm. Se aprecia que, por el método de generación de trayectorias y control de posición, el concepto de solución B obtendrá mejores resultados, teniendo así una calificación de 3, seguido del concepto de solución A y al final el concepto de solución C. Además, la velocidad de corte y la seguridad del sistema son los siguientes en orden de importancia. Los tres conceptos de solución contarán con una velocidad de corte y un sistema de seguridad adecuados al requerimiento presentada en la lista de exigencias y por

lo cual se califica con el puntaje máximo.

Por último, la complejidad del mantenimiento y la flexibilidad de uso como la facilidad de uso están el siguiente orden de prioridad. Para el concepto de solución A no será muy complejo el mantenimiento debido a su morfología y desmonte de piezas, por lo que obtiene un puntaje de 3, mientras que el concepto B cuenta con mayor número de elementos lo cual dificulta su mantenimiento y en el concepto de solución C se requiere desmontar el cabezal móvil lo cual complica el mantenimiento, obteniendo ambos conceptos un puntaje de 2. En temas de complejidad de uso, se aprecia que la solución B tiene mayores aplicaciones que los otros conceptos planteados, por lo que recibe una calificación de 3; mientras que la configuración RRP es más dinámica en flexibilidad de procesos que la configuración PPP, recibiendo así el concepto A un puntaje de 2 y el concepto C un puntaje de 1.

Tabla 1.1. Evaluación técnica de los conceptos de solución. *Fuente:* Elaboración Propia.

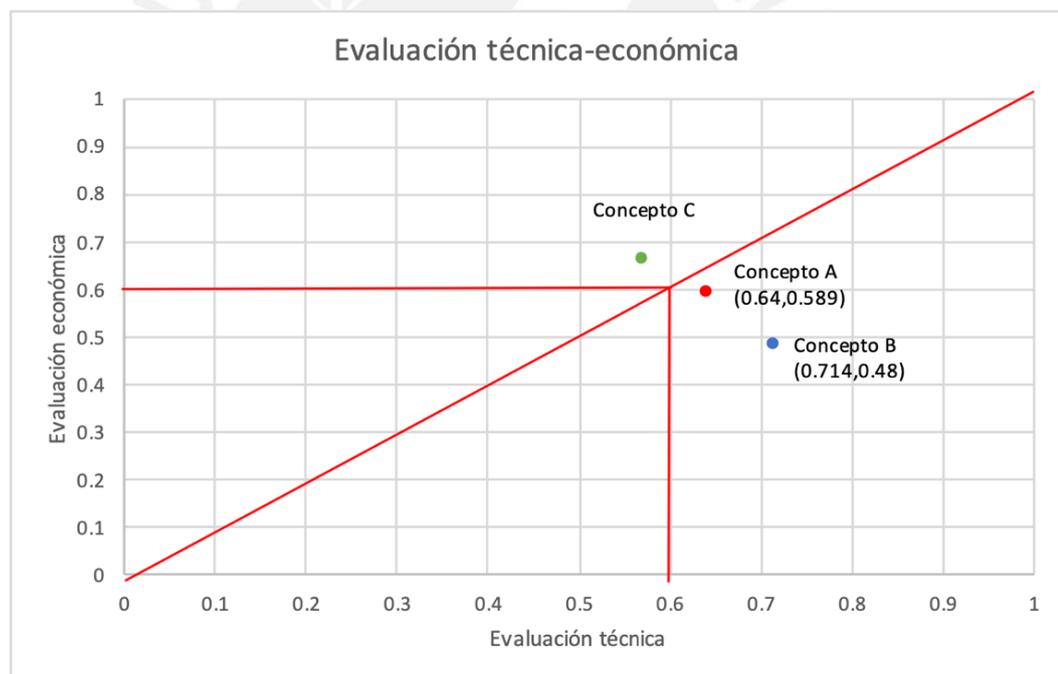
	Concepto A			Concepto B		Concepto C		Solución ideal	
	g	p	gp	p	gp	p	gp	p	gp
1. Precisión	4	2	8	3	12	2	8	4	16
2. Mantenimiento	2	3	6	2	4	2	4	4	8
3. Velocidad de corte	3	3	9	3	9	3	9	4	12
4. Flexibilidad de uso / Facilidad de uso	2	2	4	3	6	1	2	4	8
5. Seguridad	3	3	9	3	9	3	9	4	12
<b>Sumatoria</b>			36		40		32		56
<b>xi</b>			0.64		0.71		0.57		

En la Tabla 1.2 se presenta la evaluación económica de los conceptos de solución atendiendo a los criterios de cantidad de componentes y costo de tecnología como criterio con mayor peso para la evaluación. El mayor puntaje significa que su costo no es elevado. Por otro lado, el costo de fabricación de partes o elementos y el diseño de la interfaz ocupan el siguiente orden de prioridad. Por último, el consumo energético y el tiempo de mantenimiento es el último en orden de peso de evaluación.

Tabla 1.2. Evaluación económica de los conceptos de solución. *Fuente:* Elaboración Propia.

	Concepto A			Concepto B		Concepto C		Solución ideal	
	g	p	gp	p	gp	p	gp	p	gp
1. Cantidad de componentes/costo de tecnología	4	2	8	1	8	3	12	4	16
2. Costo de fabricación	3	2	6	2	6	3	9	4	12
3. Consumo energético	2	2	4	3	6	3	6	4	8
4. Diseño de interfaz: complejidad de implementación	3	3	9	1	3	2	6	4	12
5. Tiempo de mantenimiento	2	3	6	2	4	2	4	4	8
<b>Sumatoria</b>			33		27		37		56
<b>xi</b>			0.59		0.48		0.66		

En la *Figura 1.18* se puede observar la dispersión de puntos según la evaluación técnico-económica.



*Figura 1.18.* Evaluación técnica-económica. *Fuente:* Elaboración Propia.

El gráfico muestra que los tres conceptos de solución superan el mínimo requerido, mayor promedio en ambos criterios de 0.6, para ser tomado en cuenta como una posible solución. Las tres soluciones cuentan con distintos puntajes, pero son dos conceptos de solución los que se encuentran cerca de la línea diagonal ideal para poder escoger el concepto solución óptimo. Por lo tanto, el concepto de solución B queda descartado.

Analizando los dos conceptos de solución restantes, se resuelve que el concepto A es el más cercano al valor ideal para ser considerado el concepto de solución óptimo, por lo que este será considerado como base para el diseño, los cálculos y selección de componentes; y luego podrá ser mejorado si se requiere.

### **1.3.6. Concepto de Solución Óptima.**

El concepto de solución óptimo es un brazo robótico con configuración SCARA o RRP, con efector final de corte láser para el uso de telas. El diseño se compone de dos elementos principales, el brazo robótico y la mesa de corte. El brazo robótico se desplaza en un plano horizontal y siguiendo una trayectoria predefinida según el tipo de prenda que debe cortar y su medida. Para este diseño se plantea el uso de láser de dióxido de carbono, por ser más económico que el de láser de fibra. Por otro lado, la mesa de corte cuenta con unas mordazas para el estirado de la tela. Debido a las investigaciones realizadas, se escoge una mesa de vacío como la opción más recomendada para el corte de la tela. Además, se agrega una pantalla HMI para que el operario ingrese los parámetros de corte y defina el tipo de prenda. El número de capas a cortar es definido por el número de prendas que se requiera confeccionar. El tope máximo de capas a cortar es de 5. Por último, se agrega un detector de humo para detener el sistema ante cualquier eventual emisión de gases que puedan desencadenar en un incendio. El diseño conceptual de solución óptima se presenta en la *Figura 1.19*.

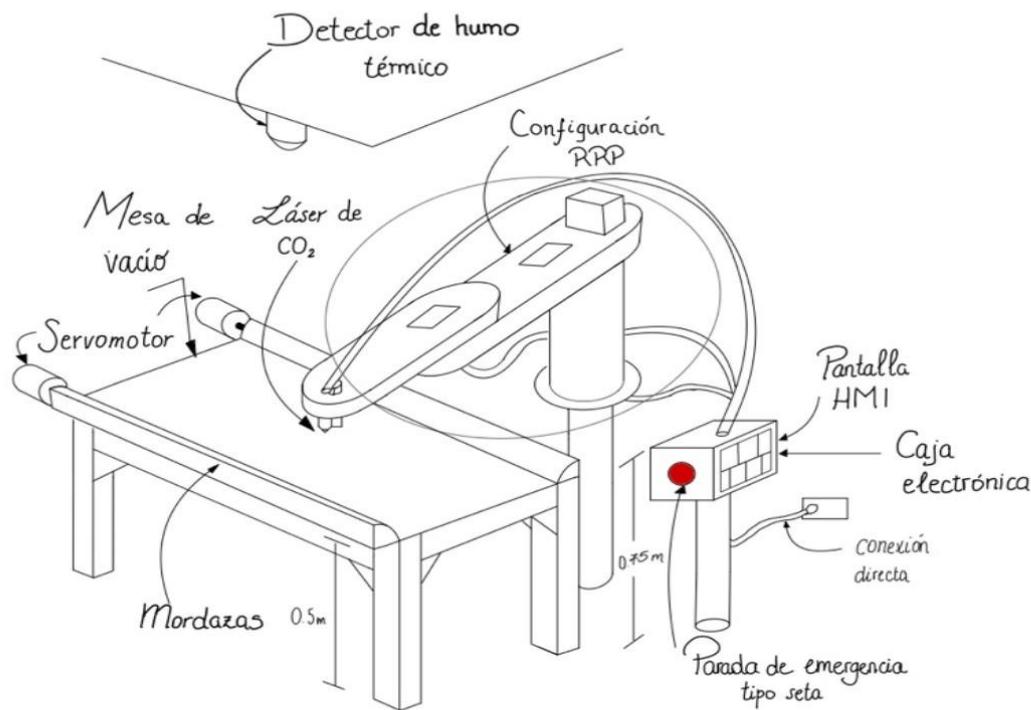


Figura 1.19. Concepto de Solución Óptimo. Fuente: Elaboración Propia.

#### 1.4. Alcance

La presente tesis expone el diseño de un sistema robótico con aplicación de corte láser que reduzca el tiempo de operaciones manuales como el corte, así como, la posibilidad de aumentar la variedad de diseños con esta tecnología para generar un valor agregado a los textiles peruanos.

El diseño robótico comprende de un brazo robot cuyo movimiento es en un plano horizontal, paralelo al piso; y una mesa de corte que sirve como soporte y estirado para el corte. Adicionalmente, se detalla la obtención de las señales de los sensores y el filtrado, a través de un filtro de Kalman, para que el error de posición sea mínimo, dando así una gran precisión y mejor resultado al producto final.

## 1.5. Metodología

A partir de la lista de exigencias que requiere el sistema mecatrónico, se procede a realizar el diseño de un robot SCARA. Se plantea la división de cada subensamble para realizar los cálculos mecánicos. Además, a partir de estos cálculos, se puede obtener las características mínimas que los actuadores deben satisfacer. Por otro lado, la selección de sensores es a partir de los requerimientos del sistema y de la calidad-precio que estos ofrecen. Se realiza los planos eléctricos entre los componentes electrónicos antes elegidos y, posteriormente, el control adecuado para el seguimiento de trayectoria que ha sido especificado. Por último, se presenta los planos y cálculos mecánicos realizados.

Los requisitos mínimos para el proyecto mecatrónico son los siguientes:

Forma:

- Área de trabajo: 110 centímetros por 100 centímetros.
- Altura máxima: 60 centímetros como máximo.

Cinemática:

- Tiempo máximo de corte: 30 segundos.

Peso:

- Peso máximo: 40 kilogramos.

Energía:

- Energía eléctrica: 220V/60Hz.
- Rango de temperatura: 25°C a 28°C.

Materiales:

- Materiales a cortar: algodón, sintéticos y lana de alpaca.

Señales:

- Señal para cantidad de prendas a cortar.

- Señal que indique el estado del sistema.
- Señal de reinicio de operaciones.
- Señal de parada de emergencia.

Control:

- Error de seguimiento: 2 milímetros por capa.

Uso:

- Uso de 4 horas por dos turnos.

Costo:

- Costo máximo: 15000 soles.

### **1.6. Antecedentes**

A través de los años, muchas empresas han desarrollado nuevas tecnologías para mejorar los procesos de corte en diversos materiales, como acero, metales y textiles; a partir de la reducción de tiempos de operación y/o para eliminar procesos que no eran eficientes, como el marcado y troceado. En la *Tabla 1.3*, se presenta una comparación entre los cuatro modelos de corte láser utilizados hoy en día. Sin embargo, las debilidades de estos modelos es principalmente la relación de volumen de trabajo con el volumen del robot, que en algunos casos llega a ser 25 a más. Por ejemplo, en el KUKA KR70LP, la relación llega a ser 50. Por otro lado, el costo de estos robots es elevado, que adicionalmente se deben adquirir sus accesorios para su uso apropiado e implementación.

Tabla 1.3.. Comparación entre modelos comerciales de corte láser. Elaboración: Propia

	<b>Morgan Fusion</b>	<b>OR-FM</b>	<b>RKL2616</b>	<b>KUKA KR70LP</b>
<b>Imagen</b>				
<b>Área de Trabajo</b>	1800mm x 1800mm	3000mm x 1500mm	1600 mm x 2600mm	1000mm x 1000mm
<b>Velocidad máxima de corte</b>	120m/min	80m/min	5m/min	120m/min
<b>Potencia del láser</b>	-	1000w/1500w 2000w/3000w	80w/100w/130w / 150w	Hasta 4000w
<b>Repetibilidad</b>	-	0.03mm	0.01mm	0.02mm

Fuente: Información recogida de las páginas web: Morgan Fusion publicada en 2019, OR-FM publicada en 2020, RKL2616 publicada e2020, KUKA publicada en 2020

El corte láser de textiles de fibras de carbono tiene muchas ventajas sobre procesos convencionales como el corte ultrasónico: no quedan fibras sin cortar, bordes sellados, puede cortar contornos complejos. El problema es que no toda la energía del láser es absorbida por las fibras más son reflejadas y transmitidas dentro del espacio entre las fibras. Para poder corregir este problema, se posicionan bloques de polimetil metacrilato (PMMA) por debajo de las muestras y la masa del material, para poder medir la energía recibida (Fuchs, Zaeh, 2016).

Además, el uso de sistemas láser para el procesamiento de materiales, en particular, polímeros textiles, incrementa debido a la rapidez, prolijidad y flexibilidad de su tecnología innovativa. Se han encontrado ciertas conexiones y aleaciones entre ellos y afectan, en gran o poca medida, la calidad del procesamiento láser. Los factores que influyen el proceso de tratamiento láser son presentados en cuatro grupos referidos a: Material, Fuente del Láser, Proceso tecnológico e influencia en la complejidad (Angelova, 2020).

## CAPÍTULO 2

### SISTEMA MECATRÓNICO INTEGRAL

En este capítulo, se detalla el sistema mecatrónico integral, abarcando tanto el brazo robótico como la mesa de vacío. Además, se describe el diagrama de operaciones, la arquitectura de hardware y los diagramas de flujo, tanto general como específicos.

#### 2.1. Sistema Mecatrónico

El sistema mecatrónico consta de un brazo robótico de tipo SCARA, acoplado junto a un cabezal láser, el cual realizará el corte las prendas correspondientes; y de una mesa de corte que permite reposar la tela a cortar y estirla para que el proceso de corte sea óptimo. Además, se agrega un detector de humo ante cualquier eventual incendio debido a que uno de los materiales a cortar es de material sintético. En los capítulos 3 y 4, se detalla a profundidad el modelo mecánico, eléctrico y de control tanto del brazo robótico como de la mesa de corte. En la *Figura 2.1*, se presenta el modelo 3D del sistema mecatrónico.

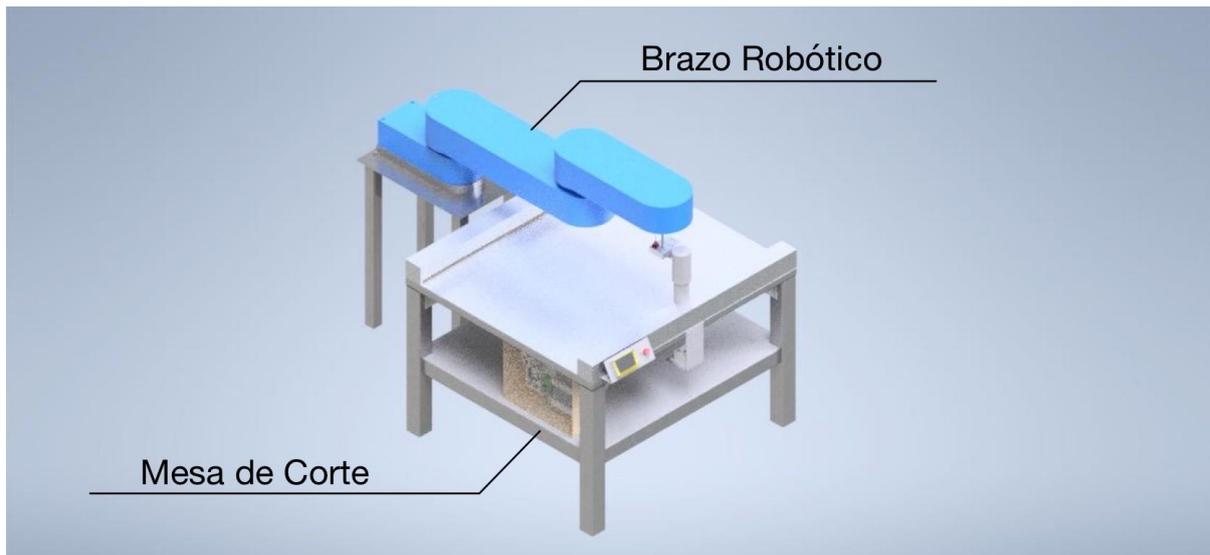


Figura 2.1. Sistema Mecatrónico. Fuente: Elaboración Propia.

## 2.2. Diagrama de Operaciones

El sistema robótico tiene una serie de operaciones que el operario debe seguir para que el resultado del corte sea el óptimo. En la *Figura 2.2*, se presenta el diagrama de operaciones.

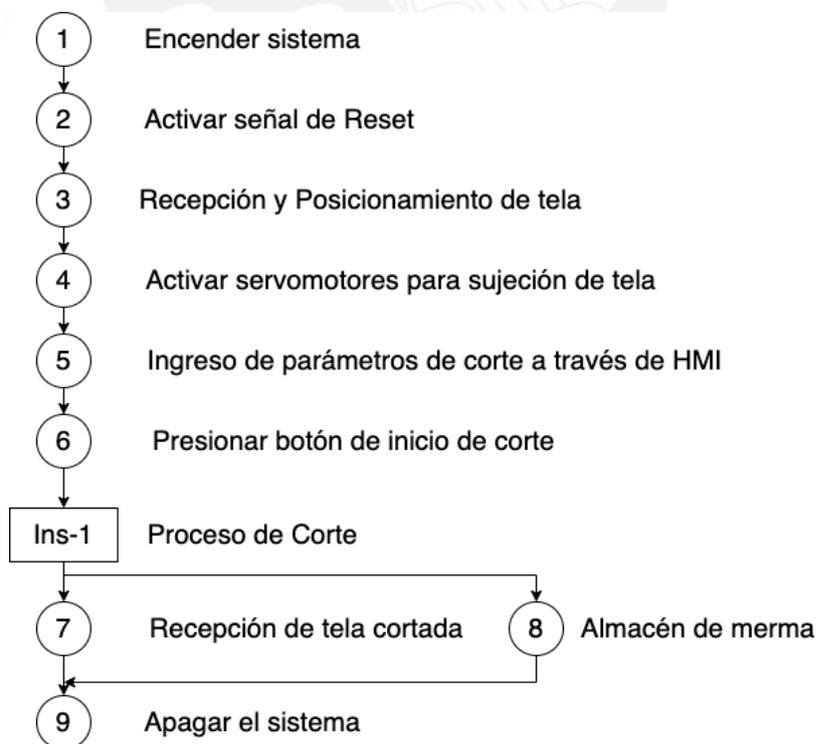


Figura 2.2. Diagrama de Operaciones. Fuente: Elaboración Propia.

### 2.3. Arquitectura de hardware

En la *Figura 2.3* se presenta la arquitectura de hardware de todos los componentes seleccionados para el brazo robótico, incluyendo sensores y actuadores. Dicha arquitectura se divide en tres módulos: Energía, Potencia, Control y Sensores. En el primer módulo, se detalla el uso de convertidores de voltaje para los diversos componentes. Además, se emplea un botón de emergencia al inicio del sistema electrónico en caso de existir algún desperfecto durante el funcionamiento del sistema robótico. En el segundo módulo, se aprecian los motores, sus respectivos drivers y el láser de dióxido de carbono, todos estos componentes corresponden a los dos elementos principales del diseño: el cuadro de color verde representa al brazo robótico y el cuadro de color morado representa a la mesa de corte. Por último, en el módulo de Control y Sensores, se detallan los sensores y microcontroladores que interactúan a través de diversos tipos de comunicación como: SPI, I<sup>2</sup>C, UART y GPIO. De la misma forma que en el módulo de Potencia, están separados por cuadros para diferenciar los componentes que corresponden a cada elemento.

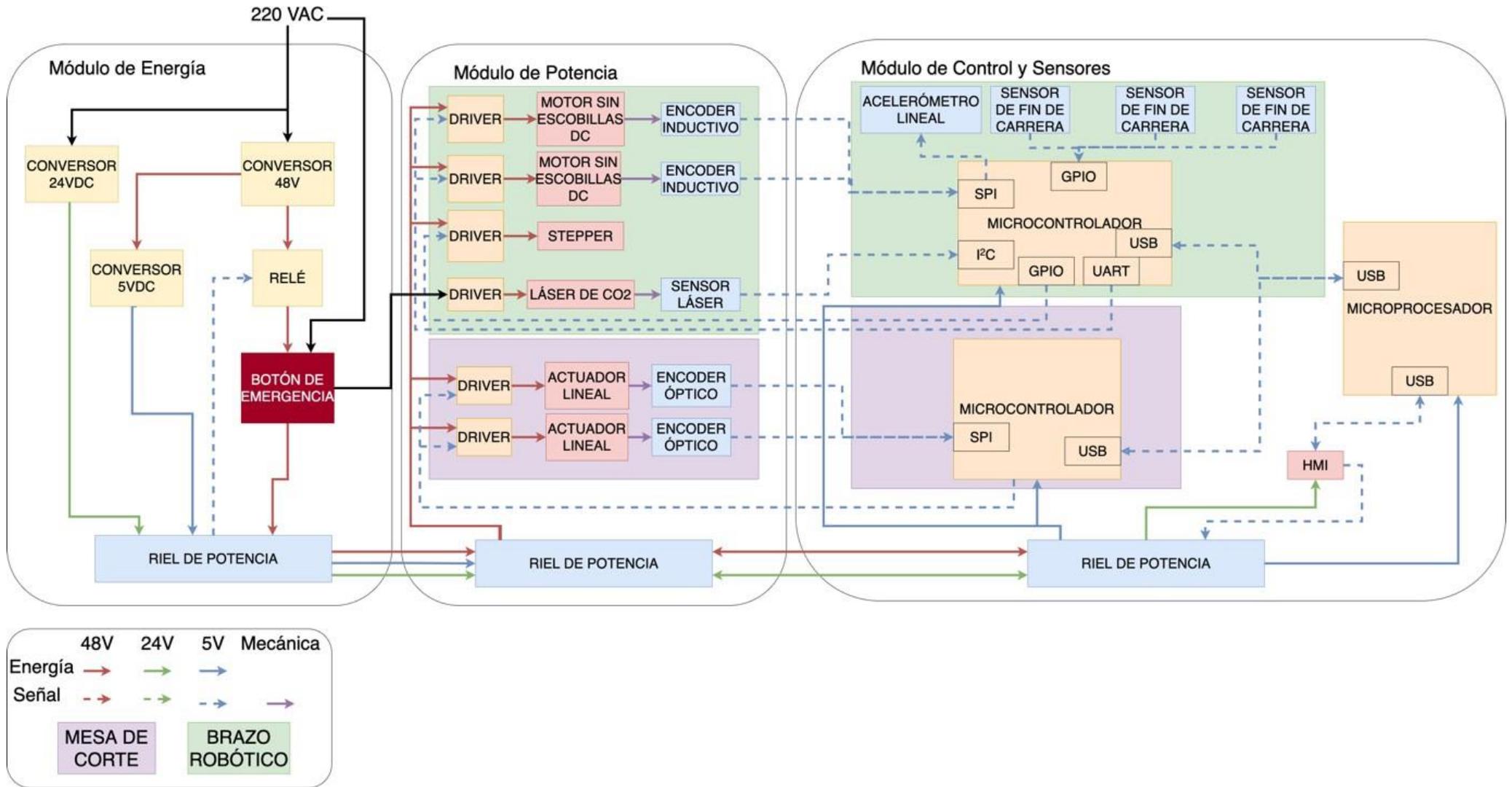
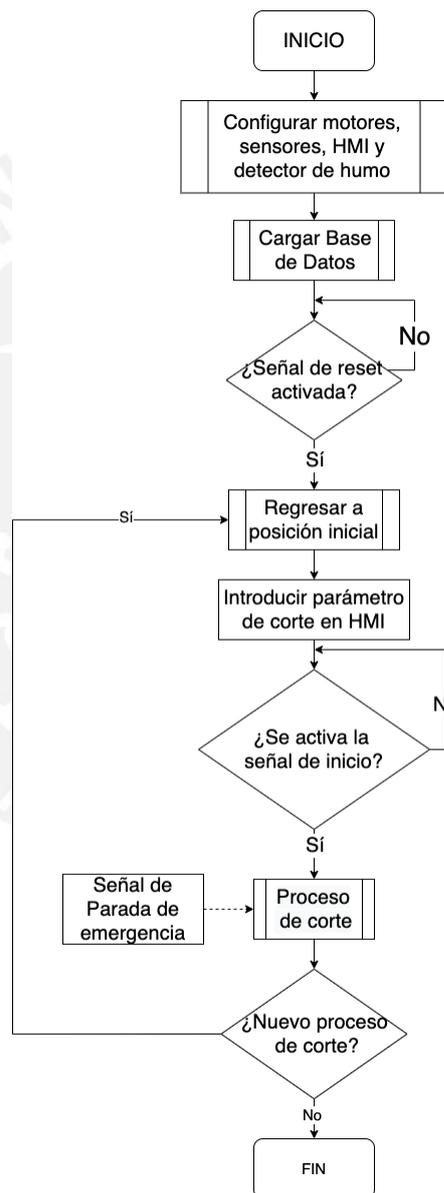


Figura 2.3. Arquitectura de Hardware del Sistema Robótico. Elaboración: Propia

## 2.4. Diagrama de Flujo

Para la codificación del sistema robótico se sigue el diagrama de flujo mostrado en la *Figura 2.4*. En este diagrama general se aprecia varias funciones donde destaca cargar base de datos, regresar a la posición inicial y el proceso de corte. Adicionalmente, se presentan las funciones que se utilizan para el buen funcionamiento del sistema robótico.



*Figura 2.4.* Diagrama de Flujo General. Elaboración: Propia

En la *Figura 2.5* se presenta la función Cargar Base de Datos que detalla cuáles son los tipos de datos que se usan para configurar el corte necesario. Estos

datos son: dimensiones de las prendas, rango de número de prendas a cortar y el tipo de corte: corte rápido o diseño específico.



*Figura 2.5.* Diagrama de Flujo de la Función: Cargar Base de Datos. Elaboración: Propia

En la *Figura 2.6* se aprecia el diagrama de flujo de la función Regresar a Posición Inicial. Antes de realizar cualquier proceso de corte, el brazo robótico debe regresar a una posición base. Para esto, se carga la posición HOME y se activa los motores de cada una de las articulaciones para mover el brazo robótico a la posición deseada.

### Función: Regresar a Posición Inicial

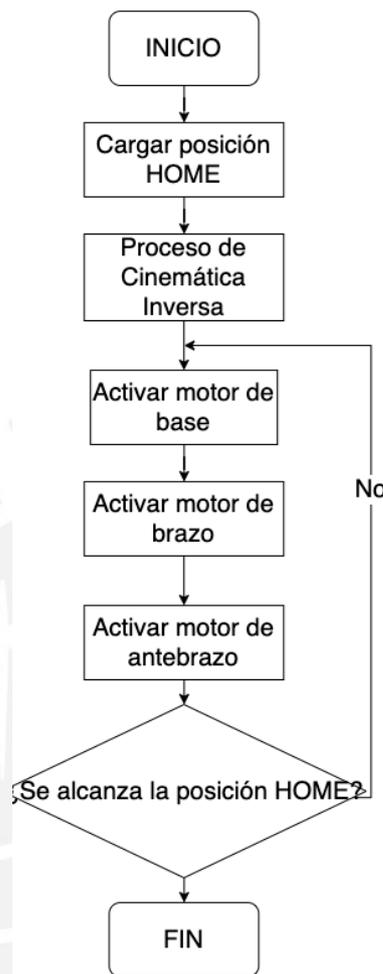


Figura 2.6. Diagrama de Flujo de la Función: Regresar a Posición Inicial. Elaboración: Propia

Por último, en la *Figura 2.7* se presenta el diagrama de flujo del Proceso de Corte, en el cual se detalla activar los motores del brazo robótico, de las mordazas y mostrar los mensajes en el HMI.

### Función: Proceso de Corte

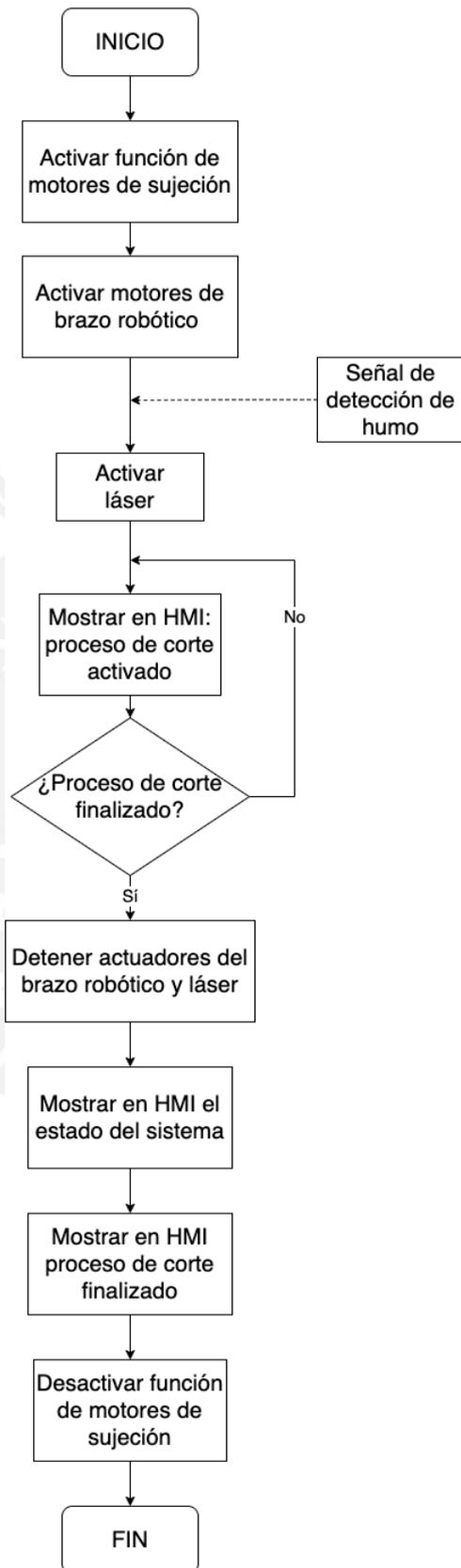


Figura 2.7. Diagrama de Flujo de la Función: Proceso de Corte. Elaboración: Propia

## CAPÍTULO 3

### DISEÑO DE BRAZO ROBÓTICO

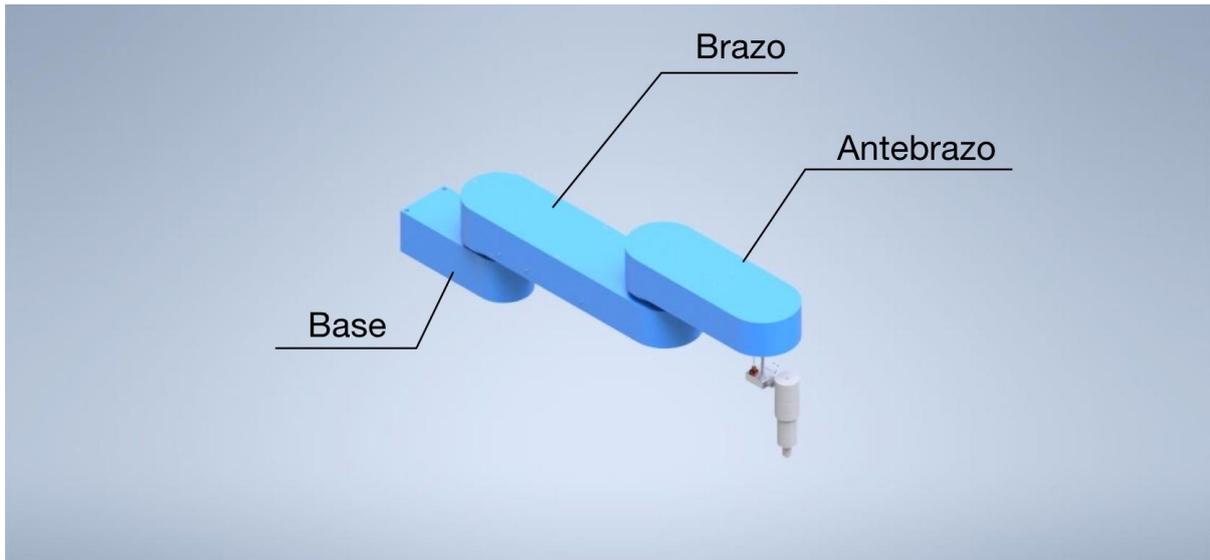
En este capítulo se detalla el diseño del brazo robótico encargado del movimiento del cabezal móvil, responsable directo del corte de la tela. Se explica el diseño mecánico, selección de componentes, como sensores y actuadores; materiales y estrategia de control.

#### 3.1. Diseño Mecánico

Después de analizar diversos conceptos de solución, especificados previamente en el capítulo 1, se define que el brazo robótico es de tipo SCARA es decir, dos movimientos rotativos y uno lineal. Acoplado al efector final se encuentra el cabezal móvil de láser de dióxido de carbono. Las dimensiones generales del brazo son 1.2m de largo<sup>1</sup>, 0.25m de ancho y 0.58 de alto. Este modelo consta de tres partes: la base, el brazo y el antebrazo. En la *Figura 3.1* se presenta el modelo 3D del brazo robótico.

---

<sup>1</sup> El cálculo para obtener las distancias se encuentra en el Anexo B.



*Figura 3.1.* Brazo Robótico. Fuente: Elaboración Propia.

### 3.1.1. Base

La base es el encargado de ser soporte y transmitir movimiento al brazo. En la *Figura 3.2* y en la *Figura 3.3* se muestran la base en vista isométrica y una vista explosionada, respectivamente.



*Figura 3.2* Vista Isométrica de la Base del Brazo Robotizado. Fuente: Elaboración Propia.

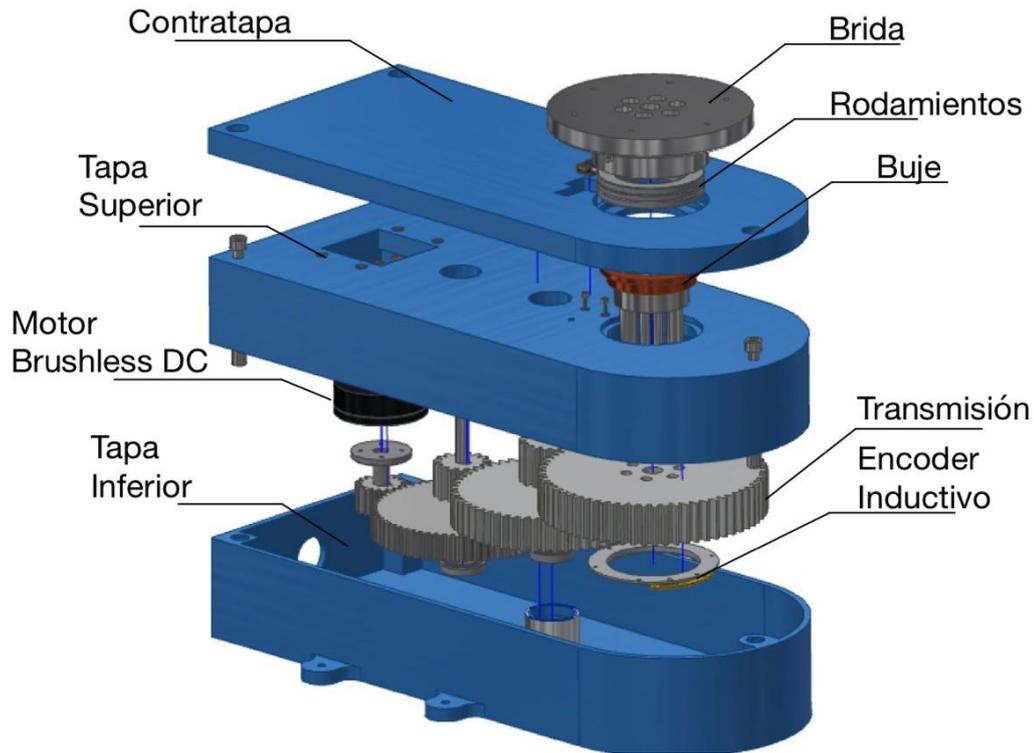


Figura 3.3. Vista Explosionada de la Base del Brazo Robotizado. Fuente: Elaboración Propia.

La base está conformada por una tapa inferior, tapa superior, contratapa, motor sin escobillas DC, la transmisión, una brida, encoder inductivo, sensor de límite de giro, así como, los tornillos que permiten la unión de todos los elementos y los rodamientos. Debido al momento torsor elevado de 30.7 N-m, se diseña una transmisión de tres etapas con relación de reducción 3.8 en cada etapa. Para evitar el juego entre dientes de los engranajes, se usan engranajes de tipo anti-backlash. Para poder calcular el torque de entrada al reductor, se emplea la siguiente fórmula:

$$\frac{\text{Torque de salida}}{\text{Torque de entrada}} = \frac{\text{número de dientes del engranaje mayor}}{\text{número de dientes del engranaje menor}} * \text{eficiencia}$$

Siguiendo el proceso realizado en el *Anexo B*, se concluye que el torque de entrada al reductor es 0.73N-m, lo cual será requisito para el motor a seleccionar. Adicionalmente, se diseñan ejes que sostienen y transmiten la potencia a los engranajes. En la *Figura 3.4* se presentan los diagramas de cuerpo libre de ambos ejes indicando las fuerzas que actúan y su posición.

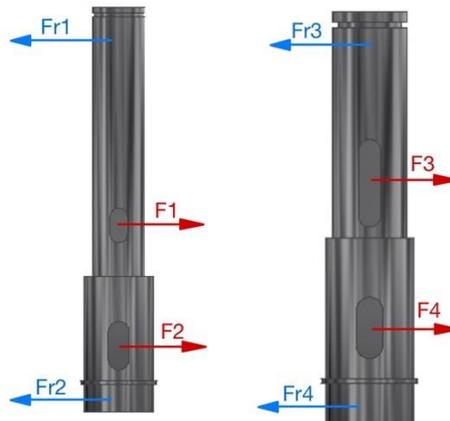


Figura 3.4. Ejes de transmisión. Izquierda: Eje 1. Derecha: Eje 2. Fuente: Elaboración Propia. Las fuerzas  $F_i$  ( $i=1,4$ ) son obtenidas con la ecuación de momento torsor:

$$\sum M_t = F * r \quad [2]$$

A continuación, se presenta en la *Tabla 3.1*, el resultado de las fuerzas calculadas.

Tabla 3.1. Resultado de Fuerzas en los ejes de reducción por momento torsor. Elaboración: Propia

	F1	F2	F3	F4
Resultado (en N)	263.4	175.6	990.7	660.5

Luego de realizar este análisis se procede a realizar el cálculo de las fuerzas de los apoyos

$Fr_i$  ( $i=1,4$ ), a partir de la ecuación:

$$\sum M_f = \sum F * d \quad [3]$$

Las fuerzas de reacción de los extremos sirven para seleccionar los rodamientos que se necesitan en cada extremo, que son escogidos por la variación en el módulo de las fuerzas y los cambios de sección. En la *Tabla 3.2*, se presenta los resultados de las fuerzas que los ejes deben soportar.

Tabla 3.2. Resultado de Fuerzas en los ejes de reducción por momento flector. Elaboración: Propia

	Fr1	Fr2	Fr3	Fr4
Resultados (en N)	147.7	291.3	732.09	919.1

Para el primer eje, se utilizan dos rodamientos radiales de bolas, el código de cada elemento: W 61902 R-2Z (superior) y W 61804 R-2Z (inferior). De la misma forma, para el segundo eje se utilizan rodamientos axiales de bolas con código: 61903 -

2RS1 (superior) y 61804 (inferior). Para el posicionamiento de los rodamientos, se dispone unos soportes que son parte de la tapa inferior y superior, que serán de la misma medida que el diámetro exterior de los rodamientos y para asegurar los rodamientos de la parte superior se añaden anillos de retención, de modo que se mantienen fijos en esa posición.

Por otro lado, el motor irá acoplado a la tapa superior, a través de un soporte realizado por una impresora 3D. Este motor<sup>2</sup> irá acoplado al primer engranaje del reductor y es el responsable del movimiento del brazo 1 y el brazo 2.

Para transmitir el movimiento se utiliza una brida que está conectada al último engranaje por medio de tornillos. En la *Figura 3.5* se detalla el diagrama de cuerpo libre de la parte superior de la base, indicando los momentos flectores y fuerzas cortantes, debido al peso y fuerzas centrípetas. Se puede observar que los rodamientos axiales soportan la mitad de la carga efectuada por el peso, 242.5 N; y el buje soporta la carga efectuada por el momento flector, por lo que la fuerza de reacción que esta realiza para contrarrestar este efecto es de 8960N.

Por último, la tapa inferior, tapa superior y contratapa serán unidas a través de un tornillo M8 y una tuerca posicionada en la tapa inferior, simulando así una caja de presión.

---

<sup>2</sup> Se selecciona el motor en la sección 3.3.

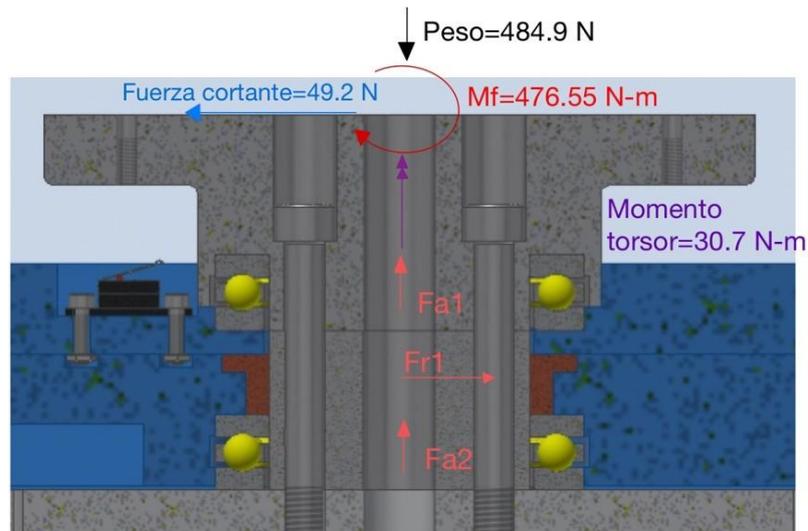
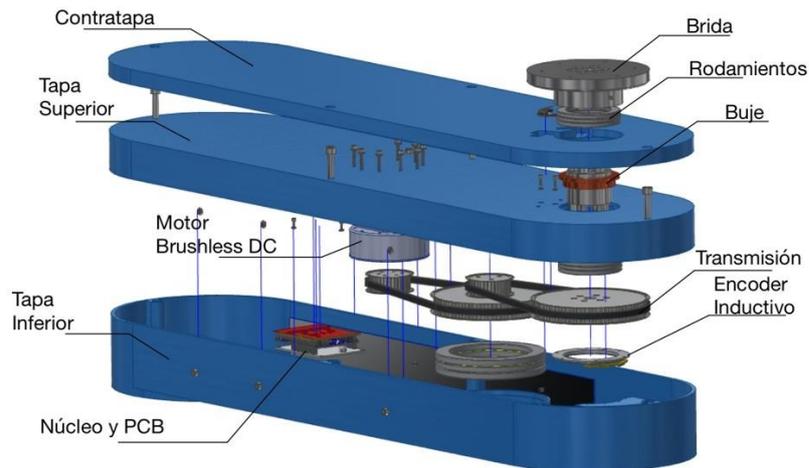


Figura 3.5. Diagrama de Cuerpo Libre de la Brida (Base). Fuente: Elaboración Propia.

### 3.1.2. Brazo

El brazo es el encargado de transmitir el movimiento hacia el antebrazo y de albergar el sistema electrónico de todo el brazo robótico. Tiene como dimensiones 0.75 metros entre cada punto de giro. En la *Figura 3.6*, se muestra una vista isométrica y una vista de explosión, en donde se pueden apreciar los elementos internos del brazo.





*Figura 3.6.* Brazo. Arriba: Vista Isométrica. Abajo: Vista de Explosión. Fuente: Elaboración Propia.

La articulación debe transmitir 3.1 N-m para el movimiento del antebrazo, para ello se emplean fajas lineales para que el requerimiento de torque al momento de seleccionar el motor no sea elevado. Empleando el software *CAP 6.0* brindado por la empresa *Optibelt*. Los parámetros utilizados son: una relación de reducción 2.5 y una distancia entre ejes máximo 0.2m. Para este caso, se utiliza dos etapas teniendo así una reducción en total de 6.25, la rueda conductora tiene 36 dientes mientras que la rueda conducida tiene 90 dientes y se encuentran a una distancia de 198mm, obteniendo un torque de entrada de 0.5 N-m. Análogamente que, en la base, se calcula las fuerzas de reacción que se producen en el eje de rotación de salida, como se muestra en la *Figura 3.7*.

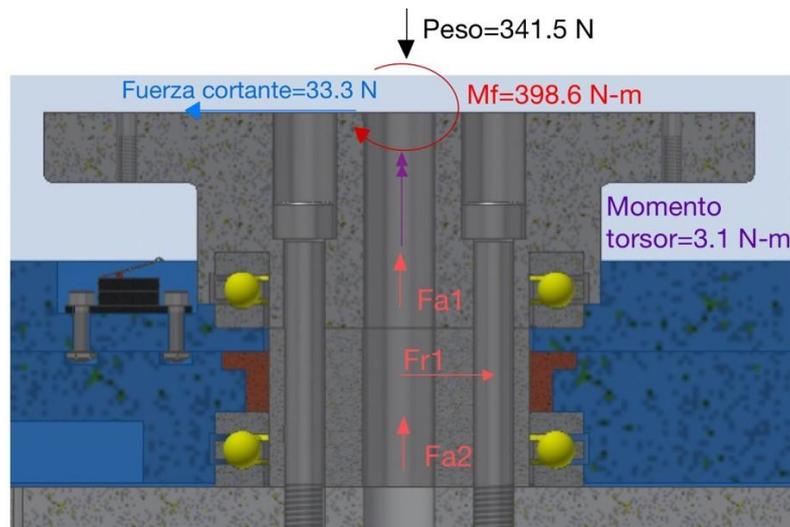


Figura 3.7. Diagrama de Cuerpo Libre de la Brida (Brazo). Fuente: Elaboración Propia.

A partir de la ecuación:

$$\sum M_f = \sum F * d \quad [4]$$

Se determina las fuerzas que los rodamientos deben soportar para poder mantener el sistema en equilibrio, resultando  $F_{a1}$  y  $F_{a2}$  igual a 170.75N y la reacción del buje  $F_{r1}$  igual a 7972N. La simulación mecánica del buje determina si es capaz de soportar las cargas. Los rodamientos axiales son los mismos escogidos para la base: el modelo 51111. Por último, la tapa inferior, la tapa superior y la tapa inferior se unen a través de un tornillo M8, de manera similar a una caja de presión.

### 3.1.3. Antebrazo

El antebrazo tiene como principal función soporte donde se encuentra el cabezal móvil y realizar el movimiento lineal del mismo. Para esto se utiliza un tornillo sin fin accionado por una transmisión de fajas lineales acopladas a un motor. La transmisión por fajas lineales son las escogidas por el mismo criterio que en el brazo, pero en este caso solo una etapa. En la *Figura 3.8* se presenta una vista isométrica y explosionada del antebrazo.

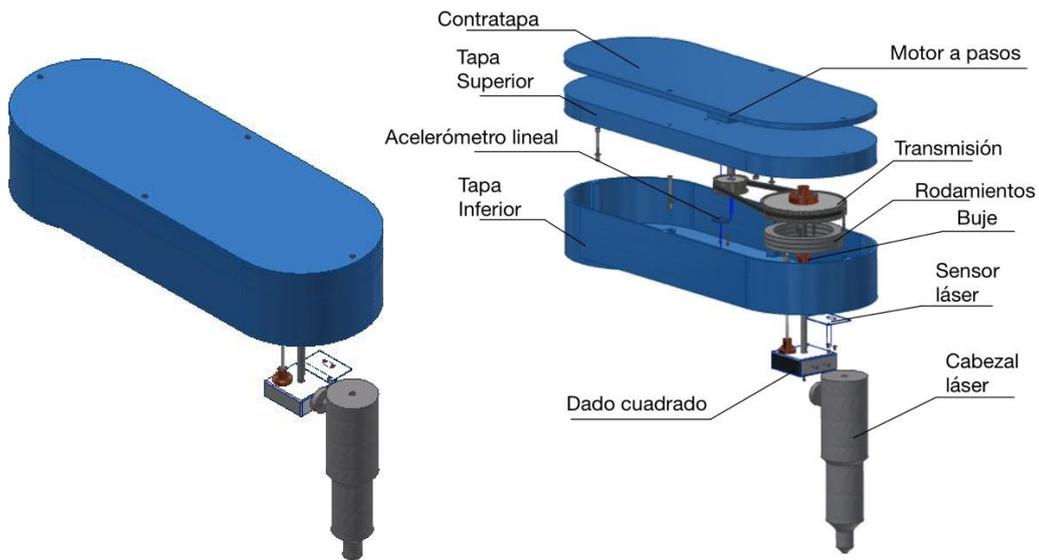


Figura 3.8. Antebrazo. Arriba: Vista Isométrica. Abajo: Vista Explosionada. Fuente: Elaboración Propia.

El brazo 2 consta de la tapa inferior, tapa superior, contratapa, dado cuadrado, tornillo de traslación, motor a pasos y el cabezal móvil. Al igual que en la base y el brazo 1, las tapas y útil y la eficiencia del tornillo:

$$M_t = F_t * \frac{d_2}{2} \quad [5]$$

$$F_t = F * \tan(\rho' + \varphi) \quad [6]$$

$$W_{\text{útil}} = F * P \quad [7]$$

$$\eta = \frac{\tan(\varphi)}{\tan(\rho' + \varphi)} \quad [8]$$

De lo cual, el tornillo de traslación M12 x 3, cumple con todos los requisitos y siendo escogido por obtener una mejor eficiencia comparada con las demás opciones: 0.5. El cabezal móvil es el responsable directo del corte de la tela y es accionado por dióxido de carbono.

### 3.2. Selección de materiales

Como se explica en el anterior inciso, las tapas inferior, superior y contratapas son impresas en impresora 3D. Sin embargo, existen diversos materiales que pueden cumplir la función de soportar las cargas resultantes por el movimiento del brazo y cubrir los elementos internos. En la *Tabla 3.1*, se presenta los materiales disponibles para impresión 3D y los requerimientos necesarios.

*Tabla 3.1.* Propiedades de materiales para impresión 3D

	<b>ABS</b>	<b>PLA</b>	<b>Polieterimida</b>
Módulo de Elasticidad (GPa)	<b>1.5 – 3.1</b>	2.8 - 3.5	3.4
Resistencia a la flexión (MPa)	<b>86.2</b>	110.3	143
Resistencia a la tracción (MPa)	<b>57</b>	71.7	102.9
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	<b>1.08</b>	1.25	1.27
Precio (USD)	<b>17 - 25</b>	20 – 30	25 - 32

*Fuente:* Información recogida de PROSPECTOR (ABS, PLA), Elaplas (Polieterimida).

Los criterios de selección se dividen en mecánicos y económicos. El material debe soportar esfuerzos de hasta 8.7 MPa, lo cual cumplen todas las opciones. Adicionalmente, debe ser ligero ya que el sistema robótico no debe pesar más de 40kg y debe tener un precio competitivo. Por estas tres razones, se escoge el ABS como material para la mayoría de los elementos a imprimir en 3D. Sin embargo, las tapas superiores de la base y del brazo 1 están sometidas a un esfuerzo mayor, aproximadamente 20MPa. Sugiriendo un factor de seguridad de 5, se obtendría un esfuerzo de 100 MPa, que el ABS no podría soportar, es por eso por lo que, se escoge la polieterimida para estos elementos por tener la mayor resistencia a la flexión y a la tracción; y los precios fluctúan con el PLA.

### 3.3. Selección de motores

Los motores son los componentes que permiten el movimiento rotativo de los elementos. Para el diseño actual, se contempla el uso de tres motores de diferente potencia según los cálculos realizados en el *Anexo B*. Los requisitos para el primer motor es contar con una potencia aproximada de 40W y un torque nominal de 30.7N-m<sup>3</sup>. Sin embargo, se plantea el diseño de una caja reductora para poder reducir el requerimiento de torque nominal. Según lo visto en la sección 3.1.1, el nuevo requerimiento de torque nominal para el primer motor es de 0.73 N-m.

En la *Tabla 3.2*, se presenta una comparativa entre diversos modelos de motores Brushless DC que cumplen con los requerimientos mecánicos propuestos. Además, se analizan como criterios de selección adicionales, el que posea menor consumo y costo entre los modelos. Se escoge el motor R60 KV115 de la marca T-Motor, ya que cumple con el torque nominal solicitado, presenta el precio más económico entre los motores comparados y consume menor potencia.

Adicionalmente, se controla el motor a través del controlador O-Drive, el cual se comunica con el microcontrolador por medio de UART y posee un control por posición, lo que se requiere para esta aplicación. El controlador requiere un voltaje de 5 voltios para poder operar, el cual será provisto por el microcontrolador<sup>4</sup>.

---

<sup>3</sup> Información obtenida de Anexo B, Tabla B2.

<sup>4</sup> Revisar Sección D: Planos Electrónicos.

Tabla 3.2. Comparativa de motores para el movimiento del brazo.

	Requisitos	R60 KV115	BLY6534	ATO-BLDC-200R3
				
<b>Torque Nominal (N-m)</b>	0.73	<b>0.75</b>	2.6	0.83
<b>Potencia (W)</b>	40	<b>50.6</b>	240.9	56.1
<b>Velocidad nominal (RPM)</b>	885	<b>885</b>	885	885
<b>Corriente nominal (A)</b>	-	<b>9</b>	13	5.21
<b>Voltaje nominal (V)</b>	-	<b>48</b>	24	48
<b>Precio</b>	-	<b>\$117</b>	\$437	\$245.39

Fuente: Información recogida de T-Motor (R60 KV115), Anaheim Automation (BLY6534), ATO (ATO-BLDC-200R3).

De la misma forma, para el movimiento del segundo elemento se requiere un motor de 0.62N-m y con una potencia mínima de 3.76W. Similarmente, los criterios de selección del motor serán menor consumo y costo. En la Tabla 3.3, se presenta los modelos comerciales que cumplen con los requisitos mínimos. Se escoge el modelo RMD-X8, ya que cumple con todos los requerimientos mecánicos, de consumo y económicos. Además de ser el modelo que resultase más económico, incorpora un controlador propio que puede transmitir la información a través del protocolo de comunicación UART y posee la opción de control por posición; lo cual ahorra en recursos al no tener que adquirir otro controlador.

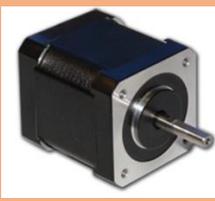
Tabla 3.3. Comparativa de motores para el movimiento del antebrazo.

	Requisitos	LRPX22	AK80-9	RMD-X8
				
<b>Torque Nominal (N-m)</b>	0.62	1.6	9	<b>13</b>
<b>Potencia (W)</b>	3.76	16	90	<b>130</b>
<b>Velocidad nominal (RPM)</b>	95	95	95	<b>95</b>
<b>Corriente nominal (A)</b>	-	0.86	12	<b>6.5</b>
<b>Voltaje nominal (V)</b>	-	48	24	<b>48</b>
<b>Precio</b>	-	\$418.9	\$579.9	<b>\$350</b>

Fuente: Información recogida de Electrocraft (BLK243S-36V-3000), T Motor (AK80-9), GYEMS (RMD-X8).

Para el movimiento del cabezal láser a través del tornillo de traslación, se requiere un actuador con requerimiento de torque mínimo de 0.08 N-m y una velocidad de 10 revoluciones por segundo (RPS). En la *Tabla 3.4*, se presenta algunos modelos comerciales de motores a pasos. Los criterios adicionales para la selección es que su consumo sea el menor y el costo sea el más económico entre las opciones disponibles. Para este último actuador se elige la opción 17Y302S-LW4 que cumple con el torque nominal requerido (0.14 N-m). Además, su consumo de corriente es menor que las opciones comparadas (0.85 A) y su precio es más económico (\$56). El driver a usar para controlar el stepper es Pololu A4988.

*Tabla 3.4.* Comparativa de motores para el movimiento del cabezal láser.

	Requisitos	17Y302S-LW4	TPP11M-13A05	ST3518M1004-A
				
<b>Torque Nominal (N-m)</b>	0.1	<b>0.14</b>	0.081	0.9
<b>Velocidad nominal (RPS)</b>	12.5	<b>12.5</b>	12.5	12.5
<b>Corriente nominal (A)</b>	-	<b>0.85</b>	5	2
<b>Voltaje nominal (V)</b>	-	<b>24</b>	24	24
<b>Precio</b>	-	<b>\$56</b>	\$97	\$122

*Fuente: Información recogida de Anaheim Automation (17Y302S-LW4), ElectroCraft (TPP11M-31A05), Nanotec (ST3518M1004-A)*

### 3.4. Selección de componentes

#### 3.4.1. Sensores

Para el diseño del robot SCARA se plantea utilizar sensores tales como encoder inductivos, acelerómetro lineal y sensor LED. Estos dispositivos sirven como retroalimentación para el sistema de control, ya que se realizará un control por posición. En el siguiente apartado se detallan algunas opciones comerciales de los tres

tipos de sensores ya descritos. A continuación, se realiza un desglose de cada uno de los tipos de sensores.

#### 3.4.1.1. Encoder inductivo

En primer lugar, se requiere conocer la posición del eje de salida de la base y del primer brazo, ya que los motores están acoplados a reductores y es mucho más eficiente saber la posición de salida más que la posición del rotor del motor. Por lo cual, se opta por encoder inductivos debido a su alta precisión, alta resolución y capacidad de operar en ambientes con presencia de polvo.

En la Tabla 3.5, se presenta tres encoders inductivos comerciales. Los requisitos mínimos son los siguientes: encoder absoluto, de diámetro mínimo de 30mm, debido a las dimensiones de los elementos reductores calculados; y una resolución mínima de 20 bits, condición que permite no sobrepasar los límites de sensado de 2mm de error, las velocidades no serán muy elevadas (12 revoluciones por minuto) y una temperatura de operación de 25°C.

Debido a esos criterios se escoge el encoder inductivo AksIM-2, ya que cuenta con las dimensiones indicadas del engranaje y rueda dentada, respectivamente. Además, su resolución hasta 20 bits lo que cumple con el requerimiento indicado para el correcto sensado de la posición del sistema. Por último, su rango de temperatura de operación se encuentra dentro de la temperatura requerida (-40°C a 105°C).

Tabla 3.5. Comparativa entre encoder inductivos comerciales.

	Requisitos	IncOder	AksIM-2	RI360P-QR24
				
<b>Tipo</b>	Absoluto	Absoluto	<b>Absoluto</b>	Absoluto
<b>Medidas (Diámetro externo)</b>	Diámetro mínimo de 30 mm	38mm a 300mm	<b>26mm a 80mm</b>	24mm a 102mm
<b>Resolución</b>	10 bits	Hasta 24 bit	<b>Hasta 20bit</b>	Hasta 18 bits
<b>Temperatura de operación</b>	25°C	-45°C a 85°C	<b>-40°C a 105°C</b>	-25°C a 85°C
<b>Alimentación</b>	-	12VDC o 24VDC	<b>4.5V a 5.5V</b>	-
<b>Precio</b>	-	\$297.36	<b>\$87.5</b>	-

Fuente: Información obtenida de CeleraMotion (incOder), RLS (AksIM-2), TURCK (RI360P.QR24).

#### 3.4.1.2. Acelerómetro lineal

En segundo lugar, se requiere un sensor de acelerómetro lineal para sensar la posición del segundo brazo, que contiene el cabezal. En la Tabla 3.6, se detallan tres acelerómetros lineales comerciales como el MPU 6050, MMA7361L y ADLX345. Para este sistema se necesitan dosejes de medición, ya que el robot solo se desplaza en un plano horizontal; con un rango de 0 a  $\pm 6g$ . Para la comparación se detalla el tipo de comunicación, el voltaje de alimentación y el precio de cada sensor.

A partir de estos requisitos se escoge el dispositivo ADLX345, ya que cuenta con medición en tres ejes y cumple con el rango del acelerómetro. Además, su consumo energético es menor que los componentes comparados, lo que significa mayor eficiencia energética y menor gasto general; y su precio no es muy alejado al del componente más económico. Adicionalmente, su temperatura de trabajo (-40°C a 85°C) se encuentra en el requerido por la lista de exigencias (25°C). Por último, la resolución de la salida digital entregada por el sensor ADLX345 es de 16 bits, dentro del rango de exigencias para poder obtener sensar que el error no exceda los 2 mm propuestos.

Tabla 3.6. Comparativa entre acelerómetros lineales comerciales.

	Requisitos	MPU 6050	MMA7361L	ADLX345
				
<b>Ejes de medición</b>	2 ejes	6 ejes	3 ejes	3 ejes
<b>Módulos</b>	Acelerómetro: 0 a 6g	Acelerómetro: rango de $\pm 2g$ - $\pm 16g$	Acelerómetro: rango de $\pm 1.5g$ y $\pm 6g$	Acelerómetro: rango de $\pm 16g$
<b>Comunicación</b>	-	I2C	Serial	SPI, I2C
<b>Consumo energético</b>	-	500uA	400uA	23uA
<b>Alimentación</b>	-	2.375V-3.46V	2.2V-3.6V	2.0V-3.6V
<b>Costos</b>	-	\$4.9	\$20.9	\$2.69

Fuente: Información recogida de Naylor (MPU 6050), NXP (MMA7361L), Analog (ADLX345).

Adicionalmente, para el límite de giro se emplea sensores de fin de carrera

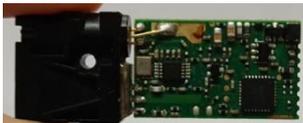
LSLKW10-RL.

#### 3.4.1.3. Sensor láser

En tercer lugar, se incluye un sensor láser en el efector final para poder determinar la distancia a la cual el dispositivo láser se encuentra de la plataforma de corte. Para este propósito, se detallan tres sensores láser comerciales, adjuntados en la Tabla 3.7. La altura de trabajo máxima es de un metro, por lo que no se requerirá un rango de medición mayor, la temperatura de trabajo es de 25°C; y de Class 1 para no dañar la visión de ningún operario.

Debido a los criterios antes explicados, se escoge el sensor láser VL530X, por tener el mejor precio y tener el rango de medición adecuado (hasta dos metros). Además, su rango de temperatura de trabajo (-20°C a 70°C) cumple con el requisito. Por último, la característica eyesafe es Class 1, lo que concuerda con lo pedido para la protección de los operarios.

Tabla 3.7. Comparativa entre sensores láser comerciales.

	Requisitos	VL53L0X	VL53L1X	U81-9181
				
<b>Rango de medición</b>	Altura de trabajo 1m	Hasta 2m	Hasta 4m	Hasta 20m
<b>Temperatura de operación</b>	Temperatura: 25°C	-20°C a 70°C	-20°C a 85°C	-10°C a 50°C
<b>Alimentación</b>	-	2.6V-3.5V	2.6VDC-3.5VDC	2.0V-3.3V
<b>Transmisión</b>	-	I2C	I2C	RS422 Serial Port
<b>Eye Safe</b>	Class1	Class1	Class1	Class2
<b>Precio</b>	-	\$9.08	\$11.51	\$40

Fuente: Información recogida de Naylamp Mechatronics (VL53L0X), Pololu (45LMS), JTR (U81- 9181)

### 3.4.2. Microcontrolador

Para el control del movimiento y sensado del brazo robótico, se requiere un microcontrolador que se comunique con los drivers y sensores antes descritos; también con el microprocesador encargado del control del sistema robótico. Los requerimientos necesarios para la elección del microcontrolador son: dos puertos de comunicación de protocolo UART, dos puertos de comunicación con protocolo SPI, un puerto de comunicación de protocolo I<sup>2</sup>C. En la *Tabla 3.8*, se presenta una comparativa entre tres modelos de microcontroladores que se encuentran en el mercado.

Tabla 3.8. Comparativa entre microcontroladores comerciales.

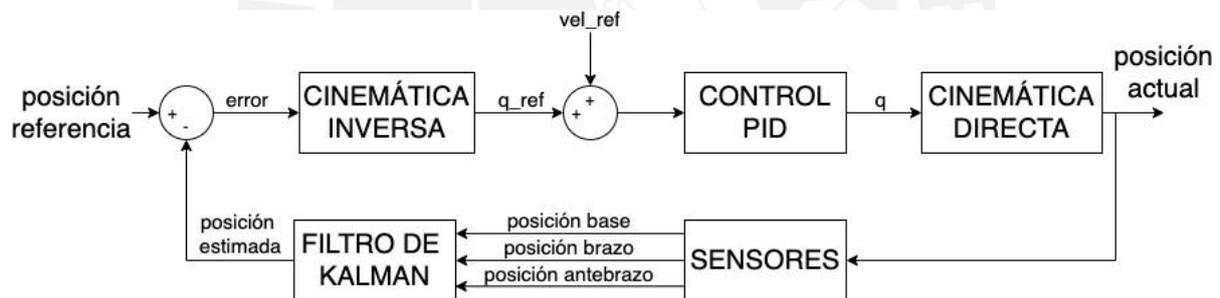
	Requisitos	NUCLEO F410RB	TIVA	ARDUINO UNO
				
<b>Microcontrolador (Frecuencia)</b>	-	ARM 32-bit Cortex (100MHz)	ARM Cortex (80 MHz)	ATmega328P (16MHz)
<b>Comunicación UART</b>	2	3	8	1
<b>Comunicación SPI/SSI</b>	2	3	4 módulos SSI	1
<b>Comunicación I<sup>2</sup>C</b>	1	3	4	1
<b>Temperatura de trabajo</b>	-	-40°C-85°C	-40°C-85°C	-40°C-85°C
<b>Precio</b>	-	\$13	\$30	\$23

Fuente: Información recogida de STM Boards (NUCLEO F410RRB), Texas Instrument (TIVA), Arduino (Arduino UNO)

Se escoge el microcontrolador Núcleo F410RB, por contar con mayor número de protocolos de comunicación, una mayor frecuencia de muestreo comparado con los otros modelos; y por tener el precio más competitivo.

### 3.5. Estrategia de control

En la *Figura 3.9* se presenta la estrategia de control que consta de un controlador PID para regular la posición del brazo robótico. El controlador envía el voltaje necesario para accionar los motores y así desplazar el cabezal láser a través del cada uno de los elementos del brazo. La señal de cada sensor instalados en cada elemento del brazo será filtrada por un filtro de Kalman que determinará la posición estimada y brindará mayor precisión de la posición. Por último, la posición de referencia y la posición estimada se restan para obtener la señal del error, con la cual el controlador trabaja.



*Figura 3.9.* Estrategia de control. Fuente: Elaboración Propia.

Dentro del bloque del sistema robótico, se encuentra el algoritmo de cinemática inversa y cinemática directa.

#### 3.5.1. Cinemática Inversa

La cinemática inversa es un proceso que brinda como resultado los ángulos de las articulaciones dadas como entradas la posición cartesiana del efector final. En este caso, las articulaciones a calcular son del brazo y el antebrazo, como se muestra en la *Figura 3.10*; y se utiliza el método geométrico.

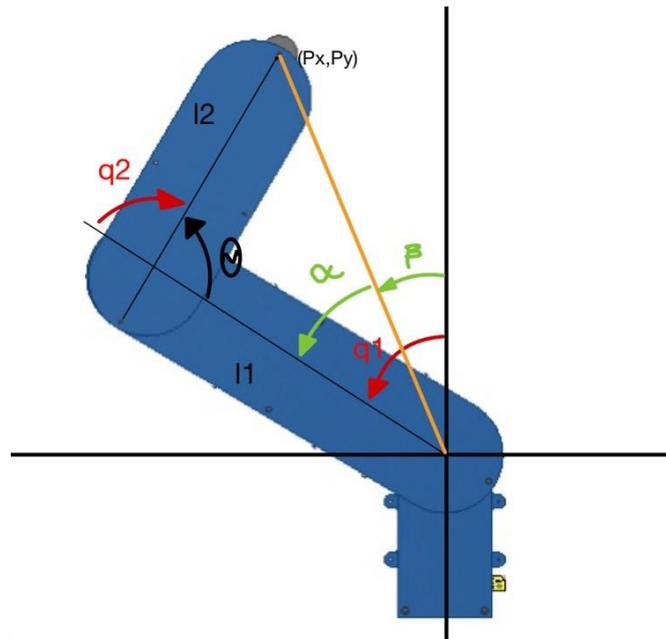


Figura 3.10. Cinemática Inversa en Brazo Robótico. Fuente: Elaboración Propia.

Como se observa, las variables  $q_1$  y  $q_2$  representan a los ángulos de las articulaciones, y se calculan a partir de las siguientes ecuaciones:

$$\beta = \text{arctg}(Px / Py) \quad [9]$$

$$l_f = \sqrt{P_x^2 + P_y^2} \quad [10]$$

$$l_2^2 = l_1^2 + l_f^2 + 2l_1l_f \cos(\alpha) \quad [11]$$

$$\alpha = \text{arccos}(l_2^2 - l_1^2 - l_f^2 / 2l_1l_f) \quad [12]$$

$$q_1 = \alpha + \beta \quad [13]$$

$$l_f^2 = l_1^2 + l_2^2 + 2l_1l_2 \cos(\theta) \quad [14]$$

$$\theta = \text{arccos}(l_f^2 - l_1^2 - l_2^2 / 2l_1l_2) \quad [15]$$

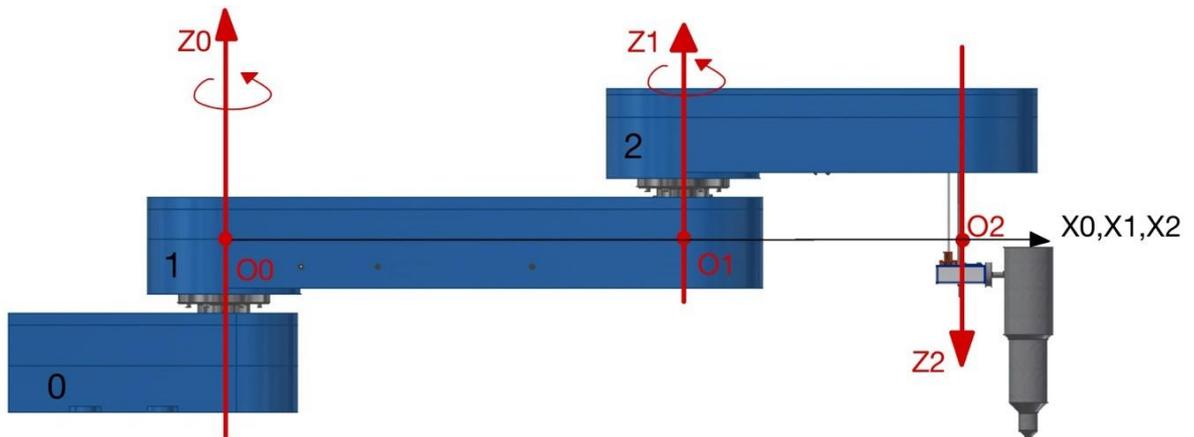
$$q_2 = 180^\circ - \theta \quad [16]$$

El tiempo de muestreo y la velocidad en la que los motores son accionados son las condiciones para obtener una fluidez de resultados más rápida y dinámica.

### 3.5.2. Cinemática Directa

El siguiente paso es recoger estos ángulos para tener como resultado la posición

cartesiana, que es lo que al final se necesita. Este proceso se realiza a través de cinemática directa. En primer lugar, se obtendrá la tabla de Denavit-Hatenberg, necesaria para la formulación de las matrices correspondientes para cada elemento. En la *Figura 3.11*, se muestra los ejes de rotación, donde el eje Z representa el movimiento giratorio o lineal.



*Figura 3.11.* Diagrama de ejes del Brazo Robótico. Fuente: Elaboración Propia.

El brazo robótico presenta dos movimientos giratorios y un movimiento lineal. En la *Tabla 3.9*, se presenta los cuatro parámetros que permiten formar las matrices homogéneas:  $d$  es la distancia entre los orígenes a través del eje Z,  $a$  es la distancia entre los orígenes a través del eje X,  $H$  representa el ángulo entre dos ejes X consecuentes tomando como eje de rotación al eje Z y  $\alpha$  representa el ángulo entre dos ejes Z consecuentes tomando como eje de rotación al eje X.

*Tabla 3.9.* Denavit-Hatenberg del Brazo robótico. Elaboración Propia

	H	$\alpha$	d	a
1	$q_A$	0	0	750
2	$q_2$	0	0	450
3	0	0	$q_c$	0

La matriz de transformación, llamada A, se compone de la siguiente manera:

$$A = \begin{bmatrix} C\theta_i & -C\alpha_i S\theta_i & S\alpha_i S\theta_i & a_i C\theta_i \\ S\theta_i & C\alpha_i C\theta_i & -S\alpha_i C\theta_i & a_i S\theta_i \\ 0 & S\alpha_i & C\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad [17]$$

Realizando la multiplicación de cada una de las matrices con sus respectivas variables dependiendo del elemento estudiado, se obtiene la matriz homogénea del elemento final.

### 3.5.3. Control PID

El bloque del control PID está dividido para cada uno de los elementos y está compuesto de la siguiente manera. Se obtienen los valores de las constantes  $K_v$ ,  $K_i$  y  $K_p$ ; a partir de las pruebas realizadas en la implementación. Luego la variable de control es multiplicada por una constante propia del motor ( $K_M$ ). Este resultado es el torque que es entrada a la función de transferencia del motor, donde  $J$  representa a la inercia del rotor y  $b$  al amortiguamiento, datos obtenidos por el fabricante. Como salida se obtiene una señal de velocidad angular que luego de ser integrada, se resuelve la posición actual de la articulación. La señal de control es expresada de la siguiente manera:

$$u = K_p O q_{ref} - qP + K_v O s * q_{ref} - s * qP + K_0 \int O q_{ref} - qP dt \quad [17]$$

El diagrama de bloques se presenta en la *Figura 3.12*.

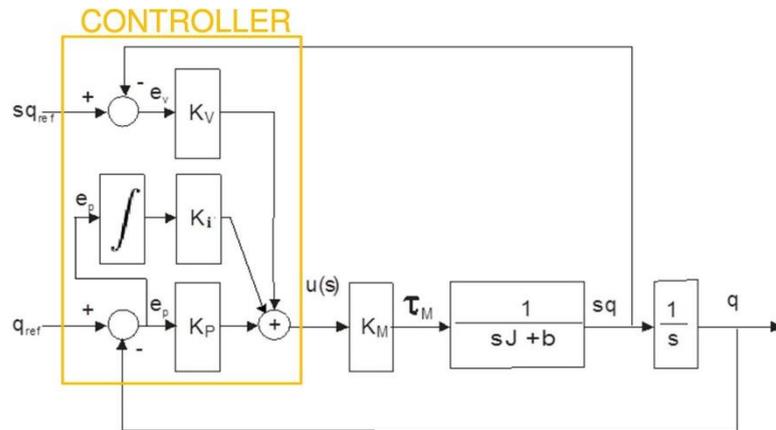


Figura 3.12. Diagrama de bloques de Control PID. Fuente: Elaboración Propia.

#### 3.5.4. Filtro de Kalman

El filtro de Kalman es un algoritmo de estimación de estado óptimo en presencia de medidas ruidosas. Debido a que los sensores puedan recibir señales ruidosas, se plantea el uso de este filtro para mejorar la resolución de los datos obtenidos, de manera que la varianza de las rotaciones de los motores y desplazamiento del antebrazo sea la mínima para obtener mayor precisión en la posición final. El filtro de Kalman calcula una estimación óptima no correlacionada de una variable de estado con una varianza mínima. La estimación de la variable de estado es obtenida multiplicando la función de probabilidad de la predicción y de la medida, escalando el resultado y calculando la media de la función de densidad de probabilidad resultante. (FUENTE). La ecuación del filtro de Kalman es la siguiente:

$$\hat{x}_k = G\hat{x}_{k-1} + Hu_k + K_k(y_k - C(G\hat{x}_{k-1} + Hu_k)) \quad [18]$$

#### 3.6. Diseño de PCB

Para mantener el orden entre las conexiones de los componentes y actuadores con el microcontrolador, se diseña un PCB con las borneras que cada elemento requiere según su hoja de datos. El protocolo de comunicación se describe en la Arquitectura de Hardware, expuesto en el capítulo 2 del presente trabajo. En la *Figura 3.13*, se presenta

el PCB considerando la capa superior y la capa inferior.

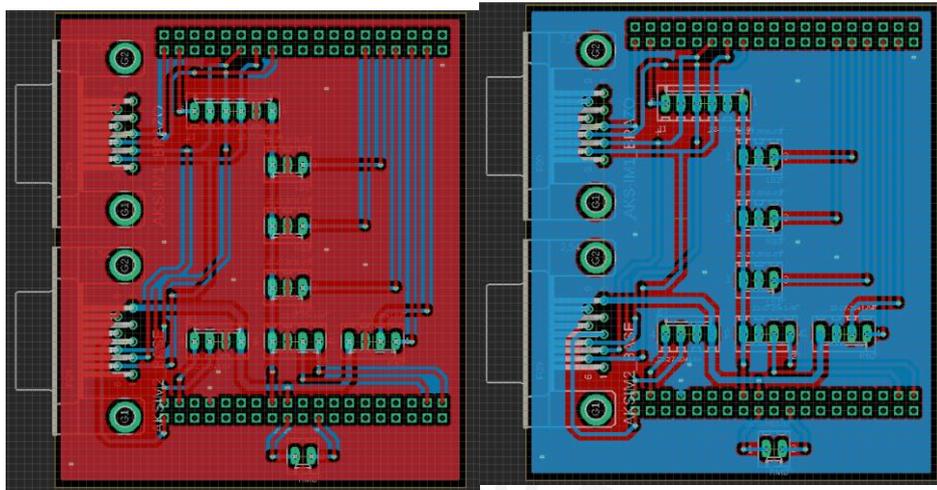


Figura 3.13. Diseño del PCB. Izq: Capa Superior. Der: Capa Inferior. Fuente: Elaboración Propia.

El plano electrónico que se usa de referencia para las conexiones del PCB expuesto se presenta en los Anexos D.

### 3.7. Lista de Planos Mecánicos

En la *Tabla 3.10* se muestra la relación de planos mecánicos, especificando si son planos de despiece o de subensamble. Además, se agregan códigos para un mejor etiquetado de estas.

Tabla 3.10. Lista de Planos Mecánicos del Brazo Robótico. Fuente: Elaboración Propia.

Descripción	Tipo	Código
1. Base-Tapa Inferior	Despiece	D1
2. Base-Tapa Superior	Despiece	D2
3. Base-Contratapa	Despiece	D3
4. Base-Eje 1	Despiece	D4
5. Base-Eje 2	Despiece	D5
6. Base-Eje de Brida	Despiece	D6
7. Base-Brida	Despiece	D7
8. Base-Case de Motor	Despiece	D8
9. Base-Tubo de Recubrimiento	Despiece	D9
10. Base-Buje	Despiece	D10
11. Base-Eje de Motor	Despiece	D11
12. Base-Engranaje 17 Dientes (Primera etapa)	Despiece	D12
13. Base-Engranaje 65 Dientes (Primera etapa)	Despiece	D13
14. Base-Engranaje 15 Dientes	Despiece	D14
15. Base-Engranaje 57 Dientes	Despiece	D15
16. Base-Engranaje 17 Dientes (Tercera etapa)	Despiece	D16
17. Base-Engranaje 65 Dientes (Tercera etapa)	Despiece	D17
18. Brazo-Tapa Inferior	Despiece	D18
19. Brazo-Tapa Superior	Despiece	D19
20. Brazo-Contratapa	Despiece	D20
21. Brazo-Eje de Brida	Despiece	D21
22. Brazo-Rueda Dentada 36 dientes (Primera Etapa)	Despiece	D22
23. Brazo-Rueda Dentada 90 dientes (Primera Etapa)	Despiece	D23
24. Brazo-Rueda Dentada 90 dientes (Segunda Etapa)	Despiece	D24
25. Antebrazo-Tapa Inferior	Despiece	D25
26. Antebrazo-Tapa Superior	Despiece	D26
27. Antebrazo-Contratapa	Despiece	D27
28. Antebrazo-Eje de Motor a Pasos	Despiece	D28
29. Antebrazo-Husillo Trapezoidal	Despiece	D29
30. Antebrazo-Rueda Dentada 36 dientes	Despiece	D30
31. Antebrazo-Rueda Dentada 90 dientes	Despiece	D31
32. Antebrazo-Buje	Despiece	D32
33. Antebrazo-Tornillo Trapezoidal	Despiece	D33
34. Antebrazo-Dado Cuadrado	Despiece	D34
35. Antebrazo-Placa de Aluminio	Despiece	D35
36. Antebrazo-Case de Motor a Pasos	Despiece	D36
37. Base-Subensamble	Subensamble	E1
38. Brazo-Subensamble	Subensamble	E2
39. Antebrazo-Subensamble	Subensamble	E3
40. Brazo Robótico	Ensamble	E4



## **CAPÍTULO 4**

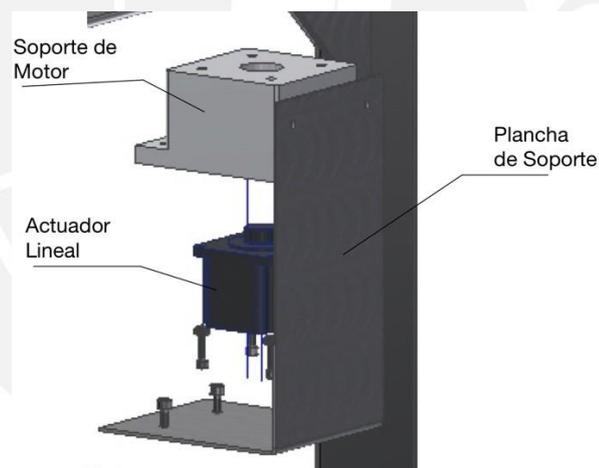
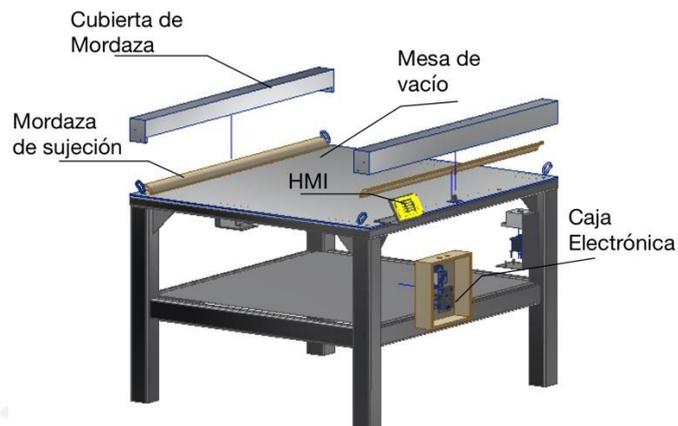
### **DISEÑO DE MESA DE CORTE**

En este capítulo se detalla el diseño de la mesa de corte encargada del soporte y sujeción de la tela. Se explica el diseño mecánico, selección de componentes y actuadores. Además, la electrónica que se requiere para conectar los elementos dentro del diseño y para la energización del brazo robótico

#### **4.1. Diseño Mecánico**

La mesa de corte es el área de trabajo donde el brazo robótico trabaja. Además, es la encargada de ser soporte para el posicionamiento de la tela y cuenta con un sistema mecánico de mordazas para la sujeción de la misma. El área de trabajo dispuesto para

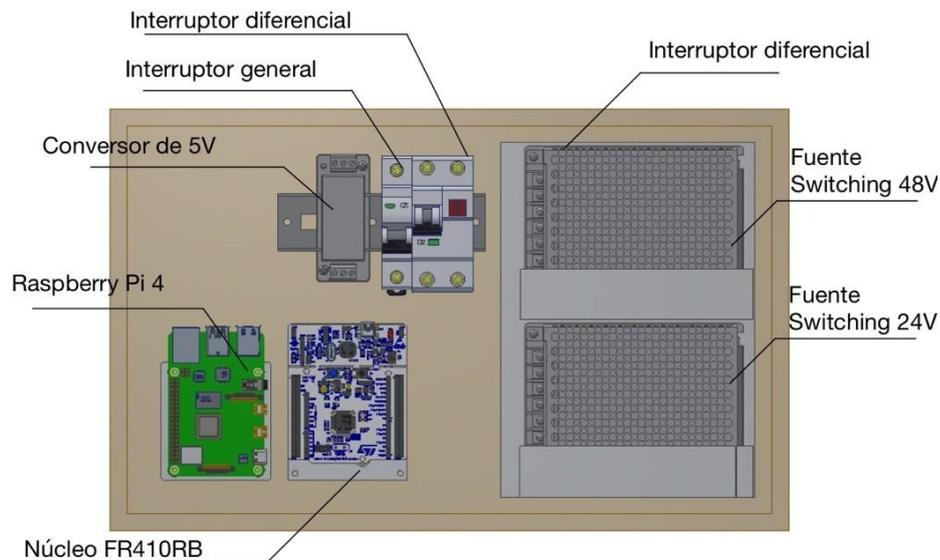
este proyecto es de 1.1 metro de largo por 1 metro de ancho. Adicionando las dimensiones del sistema mecánico, la mesa de corte cuenta con una medida de 1.18 metros de largo por 1.08 metros de ancho por una altura de 0.75 metros, como se muestra en la *Figura 4.1*



*Figura 4.1.* Diseño mecánico de Mesa de Corte. Fuente: Elaboración Propia.

Por otro lado, se incluye la caja eléctrica en la cual se ubican el interruptor térmico generalmonofásico de 32 amperios, que sirve para energizar el sistema. Además, un interruptor diferencial monofásico de 40 amperios, que sirve como protección ante alguna fuga de corriente y evitar algún accidente a los operarios. Se agrega dos fuentes switching, la primera convierte la corriente alterna 220V a corriente continua 48V a 20A y con una potencia de 1000W. Esta fuente energiza a los drivers de los motores de 48V; la segunda convierte la corriente alterna 220V a corriente continua

24V a 10A y con una potencia de 250W. Por otro lado, se añade un convertor de 5V (PYBE30-Q48-S5-DIN), para energizar el microprocesador, respectivamente. Por último, se posiciona el microprocesador y el microcontrolador, que controla los motores de las mordazas. En la *Figura 4.2* se muestra la disposición de todos elementos descritos.



*Figura 4.2.* Caja Eléctrica. Fuente: Elaboración Propia.

## 4.2. Selección de componentes.

### 4.2.1. Microprocesador

El microprocesador es el encargado de enviar las señales de control y energizar a los microcontroladores que se encuentran en la mesa y el brazo robótico. Para ello, es necesario que cuente con 3 puertos USB y la capacidad computacional suficiente para poder realizar el trabajo sin ningún desperfecto. Para este proyecto se sugiere emplear el microprocesador Raspberry Pi 4, ya que cuenta 2 puertos USB2, uno de ellos es conectado al HMI; 2 puertos UB3, debido a que su transferencia de data es mayor, es conectado a los microcontroladores; y un CPU Quad core de 64 bit ARM Cortex. (Raspberry, 2019). En la *Figura 4.3* se muestra el microprocesador Raspberry 4.



Figura 4.3. Raspberry Pi 4. Fuente: Xataka

#### 4.2.2. Microcontrolador

De la misma forma que en el brazo robótico, el microcontrolador es el encargado de enviar la señal de control para que los actuadores lineales puedan funcionar. Para este propósito, solo se necesitan 4 salidas digitales. El microcontrolador debe ser energizado a 5V y el precio debe ser el menor en comparación a los otros modelos. En la *Tabla 3.8* se presentan tres modelos de microcontroladores comerciales. Debido a todos los requerimientos cumplidos por el microcontrolador STM Núcleo FR410RB, se selecciona para el envío de señales de los actuadores de la mesa.

#### 4.2.3. HMI

El Human Machine Interface es el encargado de mostrar las opciones de los distintos tipos de corte y prendas a cortar. Además, permite mostrar el estado en el que el sistema robótico se encuentra. En la *Tabla 4.1* se presentan tres modelos comerciales de HMI. Los requerimientos para la selección es ser energizado a 24V, el menor consumo de corriente y el precio más competitivo.

Tabla 4.1. Comparativa entre HMI comerciales.

	Requisitos	TX500	CGHMI730	mjkl
				
Procesador	-	ARM Cortex A8, 1 GHz	ARM Cortex-A8	32Bit RISC CPU 1GHz
Voltaje de energización (V)	24	24	11-36	24
Pantalla	-	7"	7"	7"
Interfaz	USB	2 puertos USB	1 puerto USB	2 puertos USB
Protocolo de comunicación	-	RS232 / RS485 / RS422	RS232 / RS485 / RS422	RS232 / RS485
Temperatura de trabajo	-	0°C-50°C	0°C-50°C	-20°C-50°C
Precio	-	\$249.99	\$299.99	\$310

Se escoge el modelo TX500 ya que cumple con los requerimientos especificados. El voltaje de energización es de 24V con un consumo de 1 amperios como corriente pico. Además, cuenta con dos puertos USB para una comunicación RS232/RS485/RS422. La temperatura de trabajo es de 0 a 50°C, lo cual cumple ya que el sistema robótico trabaja a condiciones ambientales estándares (25°C). Por último, el precio es el más asequible con respecto a los otros modelos comparados.

#### 4.3. Selección de motores

Las mordazas son las encargadas de la sujeción de la tela para que posteriormente el brazo robótico realice el corte de la misma. Para este propósito, se diseña una mordaza con forma de cuña como se muestra en la *Figura 4.2*, con lo cual el movimiento a realizar por el motor debe ser lineal.

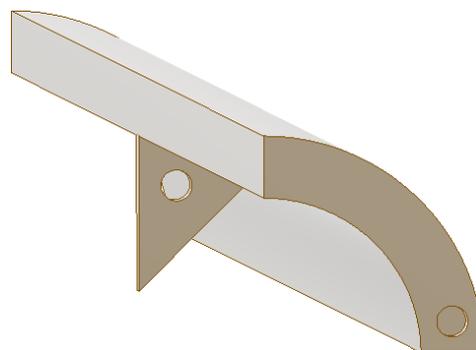


Figura 4.4. Mordazas de sujeción. Fuente: Elaboración Propia.

Es por esto por lo que se seleccionan actuadores lineales. Los requerimientos mecánicos son: fuerza mínima de 20 N y fuerza máxima de 110 N para el apriete de la tela y el requerimiento eléctrico es ser energizado a 24V. En la *Tabla 4.3* se presenta una comparación entre actuadores lineales.

*Tabla 4.2.* Comparativa de actuadores lineales.

	Requisitos	APPS11M	Size 14	Lead Screw Size 14
				
<b>Rango de Fuerza (N)</b>	20-110	20-110	<b>10-220</b>	20-230
<b>Velocidad nominal (mm/s)</b>	-	5-75	<b>5-25</b>	5-50
<b>Corriente nominal (A)</b>	-	0.5	<b>1.25</b>	1
<b>Voltaje nominal (V)</b>	24	24	<b>24</b>	24
<b>Precio</b>	-	\$139.9	<b>\$125.57</b>	\$140

Fuente: Información recogida de ElectroCraft (APPS11M), Haydon Kerk (Size 14), DINGS (Lead Screw Size 14).

Las opciones presentadas cumplen con los requerimientos mecánicos definidos. Sin embargo, el precio es el factor determinante para escoger la opción de Haydon Kerk Size 14 como el actuador lineal a utilizar para el accionamiento de las mordazas.

#### 4.4. Lista de Planos Mecánicos

En la *Tabla 4.3* se muestra la relación de planos mecánicos, especificando si son planos de despiece o de subensamble de la mesa de corte.

*Tabla 4.3.* Lista de Planos Mecánicos de la Mesa de Corte. Elaboración Propia.

Descripción	Tipo	Código
1. Mesa de Corte-Marco	Despiece	D37
2. Mordazas	Despiece	D38
3. Cubierta de Mordaza	Despiece	D39
4. Guía lineal	Despiece	D40
5. Pin	Despiece	D41
6. Soporte de Motor 3D	Despiece	D42
7. Plancha de soporte de Motor	Despiece	D43
8. Soporte en Y	Despiece	D44
9. Soporte de HMI	Despiece	D45
10. Mesa de Vacío	Despiece	D46
11. Plancha Inferior	Despiece	D47
12. Acople de Botón de Emergencia	Despiece	D48
13. Mesa de Corte Ensamble	Subensamble	E5

## CAPÍTULO 5

### SIMULACIONES MECÁNICAS Y COSTOS

En este capítulo se presenta las simulaciones mecánicas de distintos elementos del brazorobótico y de la mesa de corte, que no se han calculado en los Anexos. Se realiza estas simulaciones a través del programa *Autodesk Inventor*, que utiliza el método de elementos finitos para el análisis de esfuerzos.

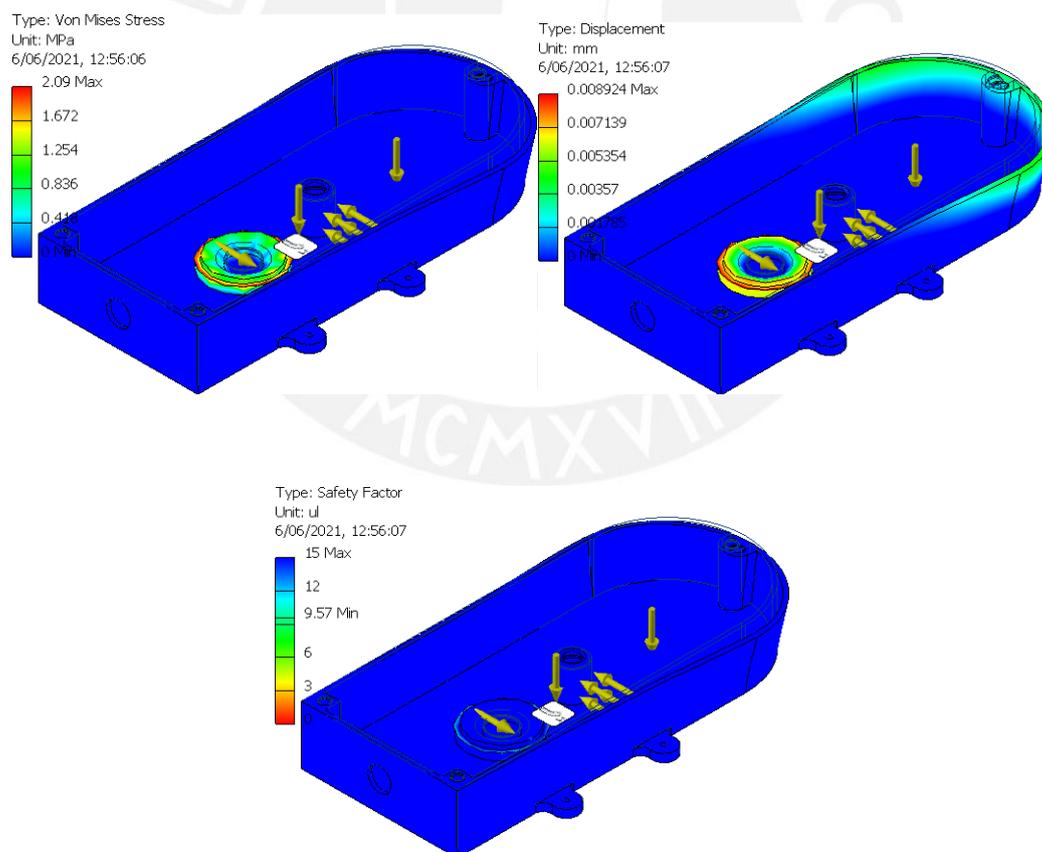
#### 5.1. Simulaciones Mecánicas del Brazo Robótico

En esta sección, se presenta las simulaciones mecánicas de todos los elementos que su método de fabricación es la impresión 3D. Se especifica las fuerzas que actúan en estos elementos, la acción de estas y el factor de seguridad. En primer lugar, la base cuenta con tres elementos impresos en 3D: la tapa inferior, tapa superior y la contratapa.

### 5.1.1. Base

#### *Tapa inferior*

La tapa inferior de la base soporta las cargas transmitidas por el peso del brazo y antebrazo; y los rodamientos que sirven como apoyo de los ejes. La fuerza del peso es igual a 410 N, mientras que la fuerza radial del rodamiento del primer eje es 504.56 N. Para el segundorodamiento se considera agregar un tubo de aluminio, por lo que se modelo como una fuerza de presión de 0.03 MPa. En la *Figura 5.1*, se aprecia las fuerzas actúan sobre el elemento, los esfuerzos resultantes (Von Mises), el desplazamiento y el factor de seguridad. Cabe resaltar, que el material usado es plástico ABS.

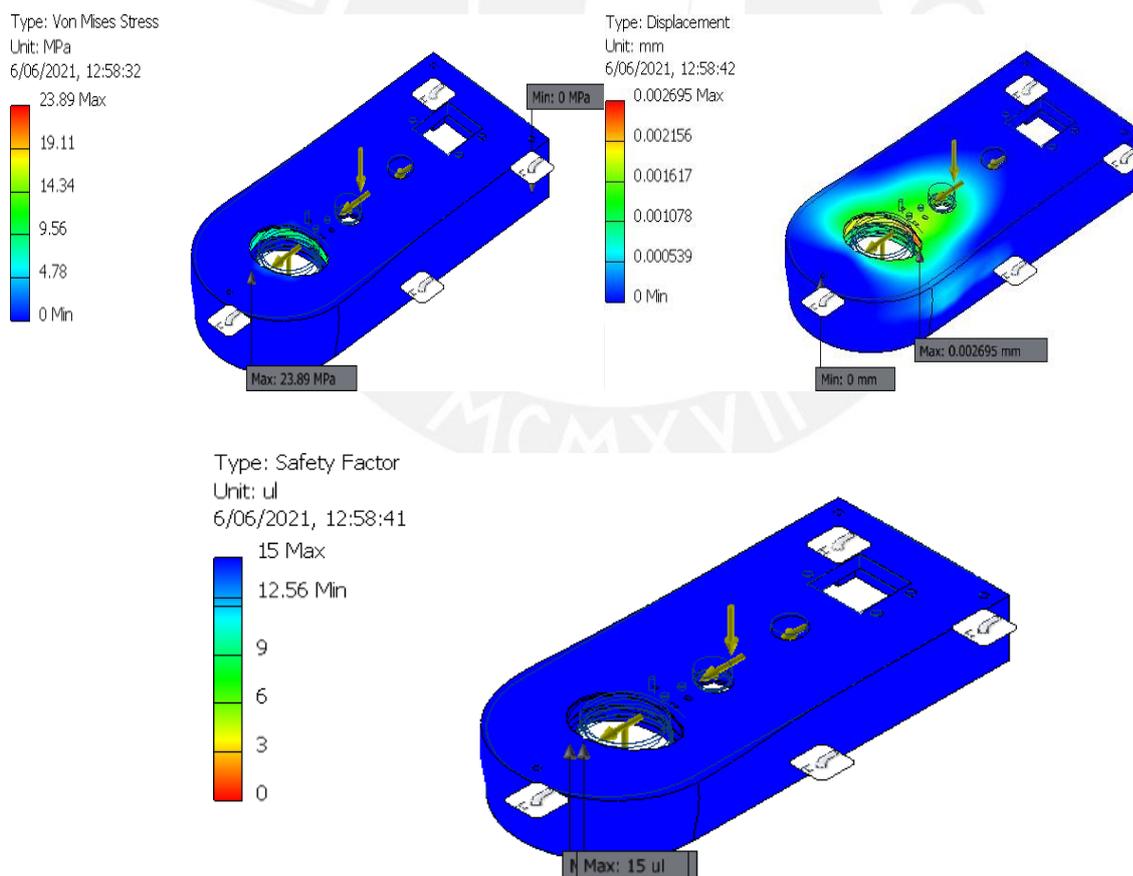


*Figura 5.1.* Simulación Mecánica Base Tapa Inferior. Arriba: Esfuerzo de Von Mises (izq), Desplazamiento(der), Abajo: Factor de seguridad. Fuente: Elaboración Propia.

El valor máximo de esfuerzo de Von Mises que actúa sobre la tapa inferior de la base es de 2.09 MPa, mientras que el desplazamiento es de 0.008 mm, lo cual es un desplazamiento casi imperceptible. Por último, el factor de seguridad que se obtiene es de 9.57, mucho mayor al valor mínimo requerido para validar este modelo (3-4). Por lo tanto, se concluye que el modelo es válido para esta aplicación.

### *Tapa Superior*

De la misma forma que la tapa inferior, el peso actúa sobre este elemento, así como la fuerza radial del buje. La fuerza radial que actúa en este elemento es de 1571.2 N. En la *Figura 5.2*, se presenta las fuerzas que actúan sobre el elemento, los esfuerzos de Von Mises, el desplazamiento y el factor de seguridad. Para este elemento, el material es polieterimida.

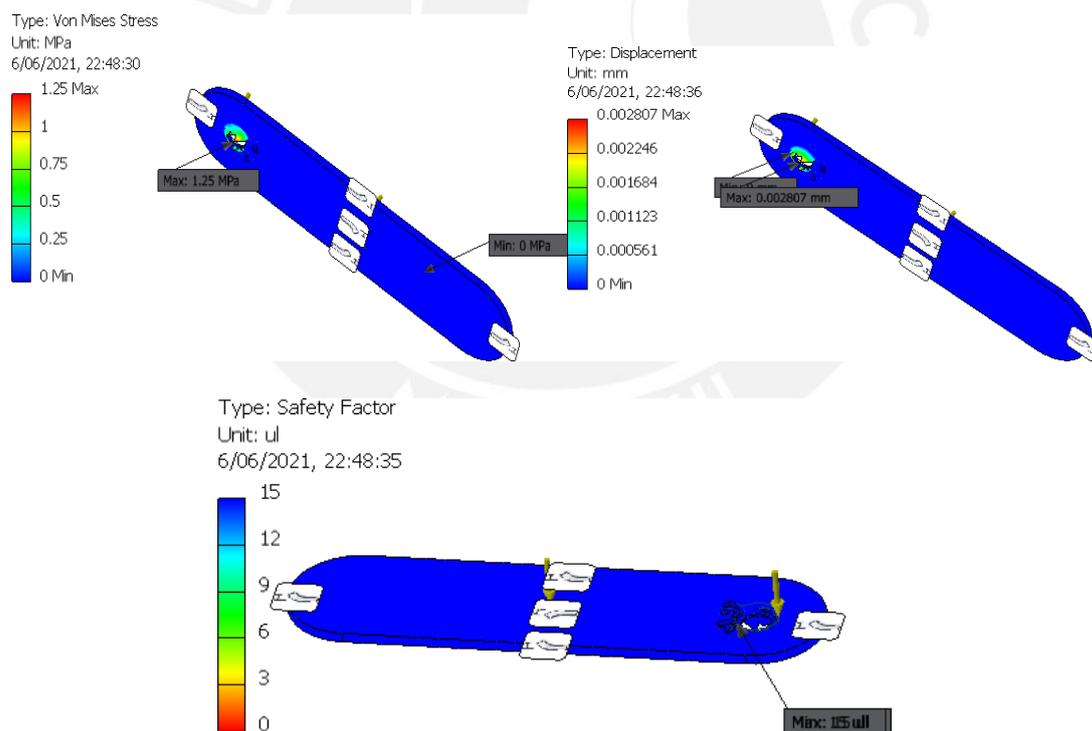


*Figura 5.2.* Simulación Mecánica Base Tapa Superior. Arriba: Esfuerzo de Von Mises (izq), Desplazamiento(der), Abajo: Factor de seguridad. Fuente: Elaboración Propia.

El esfuerzo máximo que soporta este elemento es 23.89 MPa. Por otro lado, el desplazamiento es de 0.0026 mm, lo cual no es perceptible en el modelo final. Por último, el factor de seguridad es de 12.56, muy superior al mínimo requerido para un elemento impreso en 3D. Por estas razones, se da por válido el modelo de este elemento.

### *Contratapa*

Este elemento se encarga de brindar soporte a la brida y cubre los agujeros de la tapa superior, por lo que la única fuerza que actúa sobre este elemento es el peso. El material utilizado para este modelo es plástico ABS. En la *Figura 5.3*, se presenta las fuerzas que actúan sobre el elemento, los esfuerzos de Von Mises, el desplazamiento y el factor de seguridad.



*Figura 5.3.* Simulación Mecánica Base Contratapa. Arriba: Esfuerzo de Von Mises (izq), Desplazamiento (der), Abajo: Factor de seguridad. Fuente: Elaboración Propia.

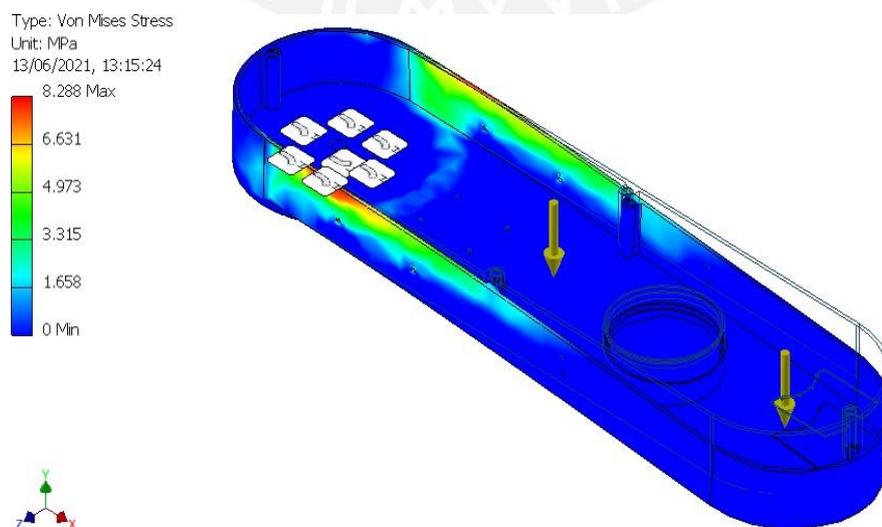
El esfuerzo máximo que soporta la contratapa es 1.25 MPa. Por otro lado, el desplazamiento es de 0.0029 mm, lo cual no afecta al ensamblaje. Por último, el factor de seguridad es de 15, resultando que el diseño de esta pieza no sufrirá ningún desperfecto. Por estas razones, se da por válido el modelo de este elemento.

### 5.1.2. Brazo

De la misma forma que el análisis de la base, se detalla las simulaciones mecánicas de los componentes impresos en 3D: la tapa inferior, tapa superior y contratapa.

#### *Tapa inferior*

Al igual que la tapa inferior de la base, este componente soporta el peso del antebrazo y el peso de los componentes internos, como lo son las ruedas dentadas. Sin embargo, la gran diferencia es que sus restricciones físicas son distintas. Mientras que, en la base, toda la cara inferior está apoyada sobre una mesa, en este caso, la cara conectada con la brida es la que soporta todas las fuerzas. La fuerza del peso del antebrazo es de 196.2 N. El modelo está diseñado a base de plástico ABS. En la *Figura 5.4* y *Figura 5.5*, se presenta las fuerzas que actúan sobre el elemento, los esfuerzos de Von Mises, el desplazamiento y el factor de seguridad.



*Figura 5.4.* Simulación Mecánica Brazo Tapa Inferior: Esfuerzo de Von Mises. Fuente: Elaboración Propia.

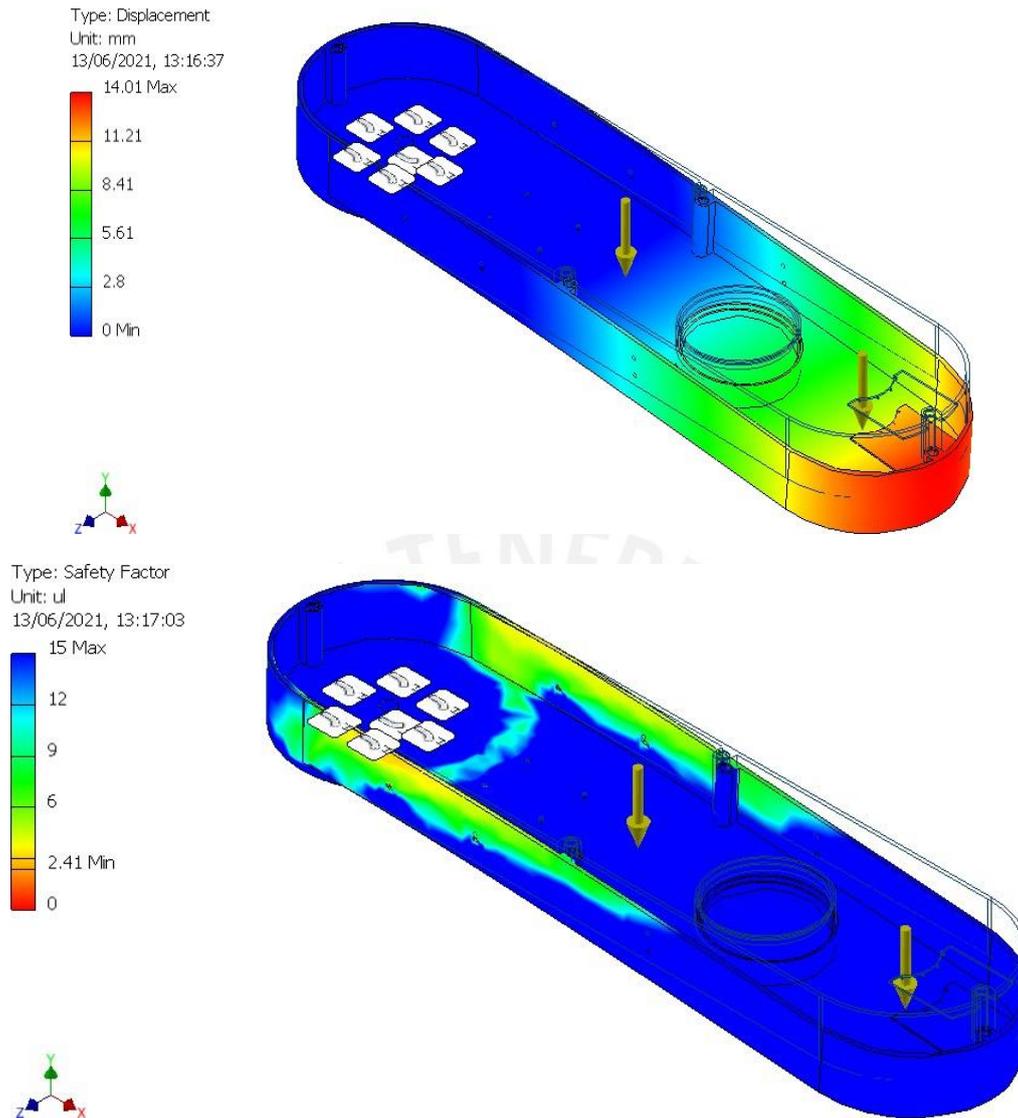


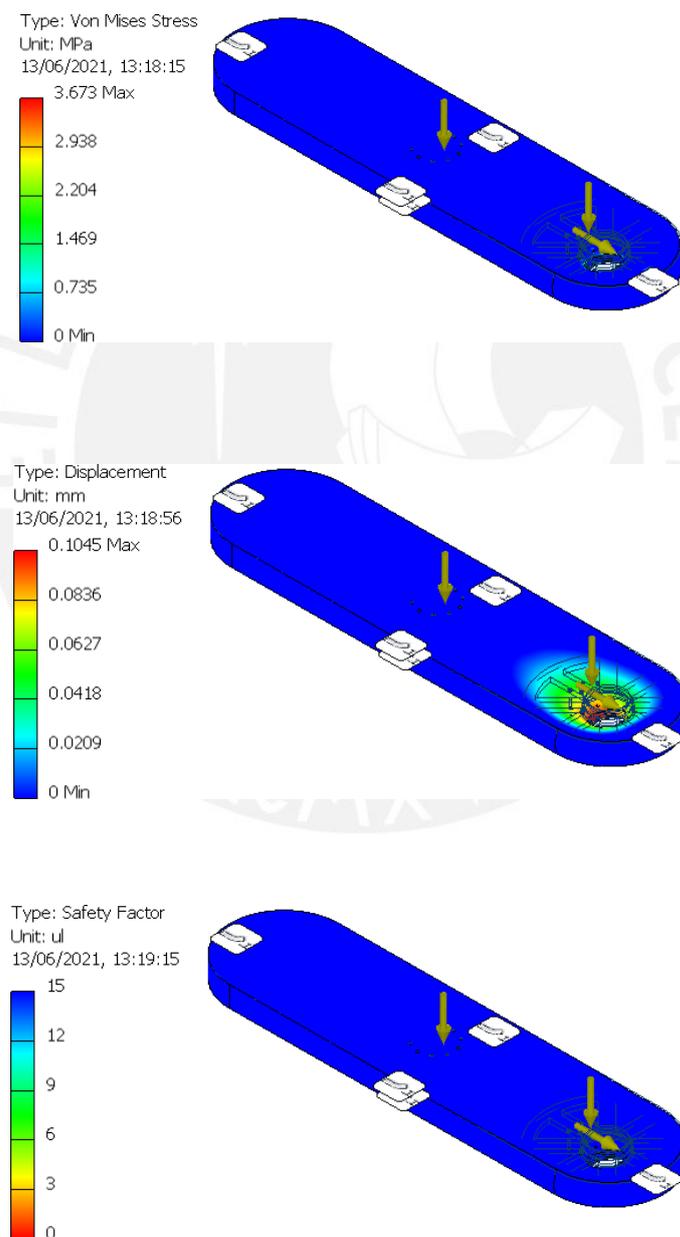
Figura 5.5. Simulación Mecánica Brazo Tapa Inferior. Arriba: Desplazamiento. Abajo: Factor de seguridad.

Fuente: Elaboración Propia.

El esfuerzo máximo que soporta la tapa inferior es 8.21 MPa. Por otro lado, el desplazamiento es de 13.74 mm, lo cual, si afecta al modelo final, es por esto por lo que se incluye dos perfiles en L de aluminio para aumentar la inercia y así que el desplazamiento disminuya a 4.85mm, lo cual es un valor más aceptable. Por último, el factor de seguridad es de 2.44, lo cual no es un valor adecuado. Sin embargo, con la inclusión de los perfiles de aluminio, el factor de seguridad resulta ser. 5.8 Por estas razones, se da por válido el modelo de este elemento.

### Tapa Superior

La tapa superior sigue el mismo comportamiento que en la base, soporta el peso del antebrazo, la carga radial del buje por el movimiento y el peso del motor de 30 N. En este caso, el material propuesto es de polieterimida. En la *Figura 5.6*, se muestra las fuerzas que actúan sobre el elemento, los esfuerzos de Von Mises, el desplazamiento y el factor de seguridad.

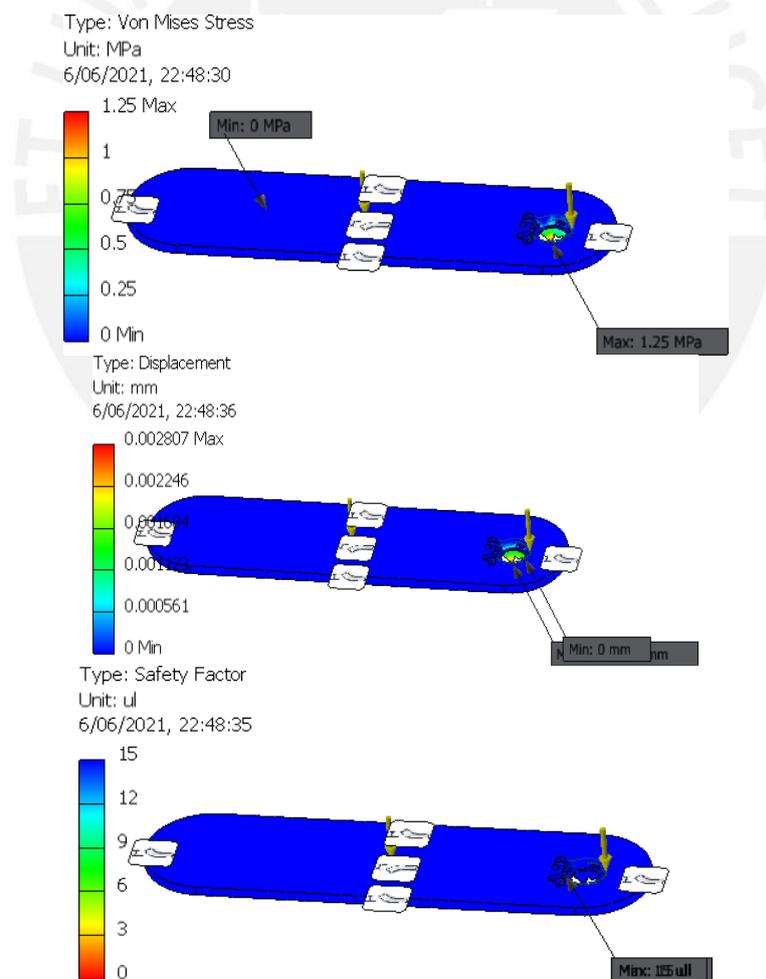


*Figura 5.6.* Simulación Mecánica Brazo Tapa Superior. Arriba: Esfuerzo de Von Mises. Medio: Desplazamiento Abajo: Factor de seguridad. Fuente: Elaboración Propia.

El esfuerzo máximo que soporta este elemento es 8.292 MPa. Por otro lado, el desplazamiento es de 0.10 mm, lo cual no es perceptible en el modelo final. Por último, el factor de seguridad es de 15. Por estas razones, se da por válido el modelo de este elemento.

### Contratapa

Análogamente a la contratapa de la base, este elemento se encarga de dar soporte a la brida y cubrir los agujeros de la tapa superior. La fuerza que actúa sobre la contratapa es el peso del antebrazo. El material que se emplea es el plástico ABS. En la *Figura 5.7*, se presenta las fuerzas que actúan sobre el elemento, los esfuerzos de Von Mises, el desplazamiento y el factor de seguridad.



*Figura 5.7.* Simulación Mecánica Brazo Contratapa. Arriba: Esfuerzo de Von Mises. Medio: Desplazamiento Abajo: Factor de seguridad. Fuente: Elaboración Propia.

## 5.2. Costos Generales

A continuación, se presenta la lista de costos de los distintos elementos utilizados en el diseño del sistema robótico.

Tabla 5.1. Lista de Costos Generales. Elaboración Propia

Elemento	Costo Unitario (\$)	Cantidad	Costo Final
<b>MATERIALES:</b>			
1. Impresión 3D (ABS)	\$20	18	\$360
2. Impresión 3D (Polietirimida)	\$30	5	\$150
3. Mesa de Corte	\$200	1	\$200
4. Marco de acero para mesa	\$350	1	\$350
<b>COMPONENTES:</b>			
1. O-Drive Robotics	\$208.5	1	\$208.5
2. Pololu A4988	\$10	1	\$10
3. AxsIM-2	\$87.5	2	\$175
4. ADLX345	\$5	1	\$5
5. VL53L0X	\$15	1	\$15
<b>MOTORES:</b>			
1. R60 KV115	\$175.5	1	\$175.5
2. RMD-X8	\$672	1	\$672
3. 17Y302S-LW4	\$84	1	\$84
4. Motor Size 14	\$188.4	2	\$376.8
<b>ELECTRÓNICA:</b>			
1. Raspberry Pi 4	\$52	1	\$52
2. Núcleo F410RB	\$20	2	\$40
3. PCB	\$2	2	\$4
4. Caja Electrónica	\$20	1	\$20
5. Interruptores (General y Diferencial)	\$52	1	\$52
6. Conversor de voltaje a 5V	\$116.7	1	\$116.7
7. Cabezal Láser	\$200	1	\$200
8. HMI	\$374.99	1	\$374.99
Honorarios	\$500	1	\$500
<b>COSTO TOTAL</b>			<b>\$4081.4</b>

A cada uno de los componentes, motores y electrónica se agrega el 50% de su costo real por concepto de envíos y recibimiento del producto. Además, el tipo de cambio utilizado para el análisis final es de 3.8. El costo de honorarios es estipulado por la instalación del equipo en los puestos de trabajo. El costo total en soles es 15509.5 soles, lo que significa que sobrepasa el límite máximo establecido en las exigencias económicas. Sin embargo, este sobrecosto no es elevado, lo cual puede ser asumido para que el sistema robótico sea viable.

## RECOMENDACIONES

1. El modelo presentado puede ser adaptado para corte de metales, MDF y/o plástico. Se recomienda revisar la potencia efectiva necesaria y el tipo de cabezal láser necesario para la adaptación del brazo robótico para el tipo de corte.
2. El método de fabricación de las piezas impresas en 3D se realiza a través de una impresora 3D infinita debido a sus dimensiones. Sin embargo, al utilizar otro material para reemplazar la impresión 3D se recomienda el análisis de fuerzas de peso y de momento flectores. Además, la revisión del cálculo de los tornillos en las uniones entre subelementos, como lo son la base, el brazo y el antebrazo.
3. Para la energización y envío de datos del brazo robótico al microprocesador y viceversa, se recomienda un conector DB9. De esta forma, es accesible la movilidad del brazo robótico.
4. En el ámbito de control, se recomienda el uso de preview control para que mejore la precisión en el seguimiento de trayectoria. Debido a que una de las funcionalidades es prototipado rápido, este tipo de control ayuda a que el desempeño sea mejor.

## CONCLUSIONES

5. El diseño del sistema robótico se distribuye en dos subsistemas: el brazo robótico y la mesada corte. En el documento, para cada uno presenta un análisis mecánico, electrónico, eléctrico, selección de componentes y materiales. El brazo robótico es un robot SCARA con tres grados de libertad que se encarga del movimiento del cabezal móvil para el corte de la tela. Por otro lado, la mesa de corte consiste en una estructura de acero que sirve de soporte para la plancha de vacío y las mordazas que sujetan la tela.
6. El sistema láser empleado en este proyecto es láser de dióxido de carbono, utilizado por ser comercial; por ejemplo, utilizado en robots KUKA y cortadores láser de diversas empresas como OR-FM; y económico con respecto a otras opciones del mercado, como el láser de fibra.
7. El algoritmo de control se basa en cinemática inversa, cinemática directa, un control PID del torque del motor que luego brinda la posición según la rotación del motor. Los sensores como los encoders inductivos y actuador lineal brindan datos al microcontrolador para saber la posición exacta del brazo y el antebrazo. Sin embargo, debido a la resolución de cada uno y el ruido que se puede obtener debido a diversos factores, estos datos son procesados por el filtro de Kalman para que la varianza de los datos se reduzca, así dando confiabilidad a los resultados.
8. El presupuesto detallado permite concluir que la exigencia de no sobrepasar los 15000 soles de monto máximo es sobrepasada por 510 soles aproximadamente, el monto total es 15509.3 soles, lo que implica que es un proyecto realizable económicamente a pesar de sobrepasar el límite máximo económicamente. Además, es competitivo con las opciones del mercado que cuestan hasta 10 veces más del precio de este proyecto.

## BIBLIOGRAFÍA

1. Calderón, R. & Leyva, V. & Miranda, M. & Pais, C. (2017) *Planteamiento Estratégico para el Sector Textil* (Tesis de maestría). CENTRUM, Surco, Perú. Recuperado de: <http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/9002>
2. Ministerio de Economía y Finanzas. (2016) *Pauta Metodológica para la Elaboración de Planes de Negocio de Confecciones Textiles en el Marco de la Ley Procompite*. Recuperado de: [https://www.mef.gob.pe/contenidos/inv\\_publica/docs/procompite/2016/plan\\_negocio/Pauta\\_planes\\_de\\_negocio\\_confecciones\\_textiles.pdf](https://www.mef.gob.pe/contenidos/inv_publica/docs/procompite/2016/plan_negocio/Pauta_planes_de_negocio_confecciones_textiles.pdf)
3. Laguna Inocente, R. & Orozco Ávalos, A. & Piedra Habrahamshon, K. & Olarte Melchos, G. (2020) *Análisis de las Exportaciones del Sector Textil Peruano*. Análisis económico y financiero. Volumen II, p. 32-49. Consulta: 5 de agosto de 2020.
4. *Morgan Fusion*. (2017, 9 noviembre). Morgan Técnica. <https://www.morgantecnica.com/es/productos/maquinarias/linea/-morgan-fusion/>
5. *Máquina cortadora láser de fibra de hoja media OR-FM*. (2020). Oree Laser. <https://es.oreelaser.com/product/M%C3%A1quina-cortadora-l%C3%A1ser-de-fibra-de-hoja-media-OR-FM-37.html>
6. *RKL2616*. (2020). RYNK Machines Argentina. <https://rynk.com.ar/maquinas-laser-de-corte-y-grabado/rkl2616-cnc-laser/>
7. KUKA AG (2020). *Guía pórtico de corte por láser KR70 LP de KUKA*. <https://www.kuka.com/es-es/productos-servicios/sistemas-de-robot/gr%C3%B3rtico-de-corte-por-l%C3%A1ser>
8. Fuchs, A., & Zaeg, M. (2016). *Efficiency of laser cutting of carbon fiber textiles*. ScienceDirect.
9. Angelova, Y. (2020). *Factors influencing the laser treatment of textile materials: An overview*. SAGE Journals. <https://journals.sagepub.com/action/cookieAbsent>
10. PROSPECTOR (2020). *Acrilonitrilo butadieno estireno (ABS) Propiedades típicas*. Generic ABS. <https://plastics.ulprospector.com/es/generics/1/c/t/acrilonitrilo-butadieno-estireno-abs-properties-processing>
11. PROSPECTOR (2020). *Ácido poliláctico (PLA) Propiedades típicas*. <https://plastics.ulprospector.com/es/generics/34/c/t/acido-polilactico-pla-properties-processing>

12. Elaplas (2020). *Polieterimida PEI*.  
<http://www.elaplas.es/materiales/plasticos-tecnicos/polieterimida-pei/>
13. T-Motor (2021). *R60 KV115*. <https://store-en.tmotor.com/goods.php?id=943>
14. Anaheim Automation (2021).  
*BLY6534*.  
<https://www.anaheimautomation.com/products/brushless/brushless-motor-item.php?sID=217&pt=i&tID=144&cID=22>
15. ATO Motors (2021). *ATO-BLDC-200R3*. <https://www.ato.com/brushless-dc-motors>.
16. Electrocraft (2021). *LRPX22 Brushless DC Planetary Gear Motor*.  
<https://www.electrocraft.com/products/bldc/LRPX22/>
17. T-Motor (2021). *AK80-9*. <https://store-en.tmotor.com/goods.php?id=982>
18. GYEMS (2021). *RMD-X8*. <http://www.gyems.cn/866757.html>
19. Anaheim Automation (2021).  
*17Y302S-LW4*.  
<https://www.anaheimautomation.com/products/stepper/stepper-motor-item.php?sID=12&pt=i&tID=75&cID=19>
20. Electrocraft (2021).  
*TPP11M-31A05*. <https://www.electrocraft.com/products/stepper/TPP11M/>
21. Nanotec (2021). *ST3518M1004-A*.  
<https://en.nanotec.com/products/185-st3518-stepper-motor-nema-14>
22. CelerMotion (2021). *IncOder*. <https://www.celeramotion.com/zettlex/es/>
23. RLS (2021). *AksIM-2*. <https://www.rls.si/eng/aksim-2-off-axis-rotary-absolute-encoder>
24. TURCK (2020). *RI360P-QR24*. [https://www.turck.de/en/sensors-1272\\_qr24-contactless-encoders-portfolio-expanded-1814.php](https://www.turck.de/en/sensors-1272_qr24-contactless-encoders-portfolio-expanded-1814.php)
25. Naylamp Mechatronics (2021). *MPU 6050*.  
[https://naylampmechatronics.com/blog/45\\_tutorial-mpu6050-acelerometro-y-giroscopio.html](https://naylampmechatronics.com/blog/45_tutorial-mpu6050-acelerometro-y-giroscopio.html)
26. NXP (2020). *MMA7361L*.  
[https://www.nxp.com/files-static/sensors/doc/data\\_sheet/MMA7361L.pdf](https://www.nxp.com/files-static/sensors/doc/data_sheet/MMA7361L.pdf)
27. Analog Devices (2015). *ADXL345*.  
<https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADXL345.pdf>

28. Naylamp Mechatronics (2021). *VL53L0X*. <https://naylampmechatronics.com/sensores-proximidad/325-sensor-vl53l0x-de-tof.html>
29. Pololu (2020). *VL53L1X*. <https://www.pololu.com/product/3415>
30. Made in China (2020). *U81-9181*. <https://jrt-measure.en.made-in-china.com/product/MNvmwobCiFcr/China-Precision-Laser-Distance-Measurement-JRT-Range-Module-U81.html>
31. STMicroelectronics (2021). *STM Núcleo F410RB*. [https://www.st.com/content/st\\_com/en/products/evaluation-tools/product-evaluation-tools/mcu-mpu-eval-tools/stm32-mcu-mpu-eval-tools/stm32-nucleo-boards/nucleo-f410rb.html](https://www.st.com/content/st_com/en/products/evaluation-tools/product-evaluation-tools/mcu-mpu-eval-tools/stm32-mcu-mpu-eval-tools/stm32-nucleo-boards/nucleo-f410rb.html)
32. Texas Instruments. (2014). *Tiva™ TM4C123GH6PM Microcontroller DATASHEET*. [https://www.ti.com/lit/ds/spms376e/spms376e.pdf?ts=1601794816400&ref\\_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F](https://www.ti.com/lit/ds/spms376e/spms376e.pdf?ts=1601794816400&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F)
33. ARDUINO (2020). *ARDUINO UNO*. <https://store.arduino.cc/usa/arduino-uno-rev3>
- Raspberry pi. (2020). *Raspberry Pi 4*. <https://www.raspberrypi.org>

## ANEXOS A: LISTA DE EXIGENCIAS

<b>Lista de Exigencias</b>			Edición: 1
<b>Proyecto:</b>	Diseño de un sistema robotizado con efector final de corte láser aplicado para la mejora competitiva del sector textil peruano		Fecha: 15/12/20
			Revisado: <b>Diego Quiroz</b>
<b>Cliente:</b>	Pontificia Universidad Católica del Perú		Elaborado por: Diego Díaz
Fecha (Cambios)	Deseo o Exigencia	Descripción	Responsable
	E	<p><b>Función Principal:</b> Cortar textiles para la confección de prendas en menor tiempo, principalmente con material de algodón, sintéticos y lana de alpaca.</p>	Diego Díaz
	E	<p><b>Geometría:</b> Zona de trabajo amplio para confección de tallas pequeñas, medianas, largas de polos, camisetas y pantalones (área máxima de 110cm x 100 cm).</p> <p>Altura máxima del sistema robótico: 600mm. (Montado en una superficie).</p>	Diego Díaz
	E	<p><b>Cinemática:</b> Movimiento encima de una superficie plana (2 ejes cartesianos: XY).</p> <p>Tiempo por proceso de corte: 30 segundos por prenda.</p>	Diego Díaz
	E	<p><b>Fuerzas:</b> Peso máximo del equipo: 40kg para ser retirado o movilizado por dos personas dentro de las instalaciones.</p>	Diego Díaz
	E	<p><b>Energía:</b> Sistema robótico debe trabajar en un rango de temperatura de 25°C-28°C.</p> <p>Sistema robótico debe trabajar con energía eléctrica de 220V/60Hz.</p>	Diego Díaz

	E	<b>Materia:</b> Materiales de trabajo: algodón, sintéticos y lana de alpaca.	Diego Díaz
	E	<b>Señales:</b> Detallar la cantidad de prendas manufacturadas.	Diego Díaz
	E	Especificar el tipo de corte a efectuar.	
	E	Incluir una señal sonora al momento de inicio y fin de operación.	
	E	Agregar señal de estado del sistema.	
	E	Agregar señal de parada de emergencia.	
	E	Incluir señal de reinicio de operaciones.	
	E	Agregar un detector de humo, así como señal de detección de humo.	
	D		
	E	<b>Control:</b> Error máximo de 2mm en seguimiento de trayectoria.	Diego Díaz
	E	<b>Montaje:</b> Altura de trabajo: 0.5 m.	Diego Díaz
	E	<b>Uso:</b> El usuario ingresa la información necesaria para el corte Uso en ambiente cerrado, considerando condiciones de polvo y humedad.	Diego Díaz
	E	<b>Mantenimiento:</b> Sistema diseñado para garantizar la durabilidad y eficiencia de los componentes por 6 meses, así realizando el mantenimiento preventivo dos veces por año.	Diego Díaz
	E	<b>Costos:</b> El sistema debe costar como máximo 15000 soles.	Diego Díaz

## ANEXO B: CÁLCULOS MECÁNICOS

### B1. Cálculo de dimensiones generales

Según los requerimientos expuestos en la Lista de Exigencias, el área de trabajo debe tener un rango máximo de 110 cm por 100 cm, por lo que se define que el robot se posicionará en el punto medio del lado menor, es decir de los 100 cm. En la Figura B1, se detalla el esquema de posición del robot.

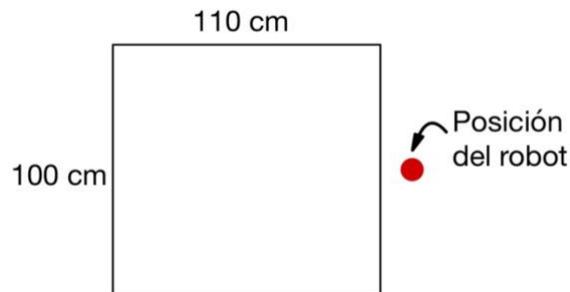


Figura B1. Esquema de posiciones de robot y mesa de trabajo.

A partir de este esquema se puede obtener la longitud máxima que puede llegar a medir el brazo aplicando el teorema de Pitágoras en un triángulo de catetos de 50 cm y 110 cm, lo cual resulta 120 cm aproximadamente. Como el brazo robótico tiene una configuración RPP se debe distribuir las longitudes de cada miembro. Siguiendo una relación de 5 a 3, se calcula que el primer brazo llega a medir 75cm y el segundo 45cm.

### B2. Cálculo de fuerzas y velocidades

Con estas dimensiones generales, se procede a realizar los cálculos de fuerzas y velocidades. En primer lugar, como cálculo previo de velocidades se plantea el movimiento en línea recta del efector final cuando el brazo se comporte como un solo cuerpo. Definiendo dos opciones de velocidades lineales, 1,5 m/s y 1 m/s; y sabiendo que la longitud del brazo es 1.2 m, se emplea la siguiente ecuación:

$$v = r * \omega \text{ , donde } \omega \text{ resulta ser } 1,25 \frac{\text{rad}}{\text{s}} \text{ y } 0,83 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

A partir de estas velocidades angulares se calculan las aceleraciones angulares que se empleará en posteriores análisis. Se utiliza la ecuación  $\alpha = \frac{\omega}{t}$ , siendo t igual a 1 segundo; donde  $\alpha$  resulta ser  $1,25 \frac{rad}{s^2}$  y  $0,83 \frac{rad}{s^2}$ .

Después de realizar este proceso, se establecen las posiciones de ciertos componentes que están dentro de los miembros comprendidos. El brazo 1 comprende la carcasa con una masa de 4.4 kg, el motor con una masa de 1.6 kg y las dos transmisiones de 2.81 kg cada una. Para representar estas masas como fuerzas se multiplica por el valor de la gravedad ( $9.81 \frac{m}{s^2}$ ). En la Figura B2, se presenta el brazo 1 con los elementos antes descritos y sus fuerzas.

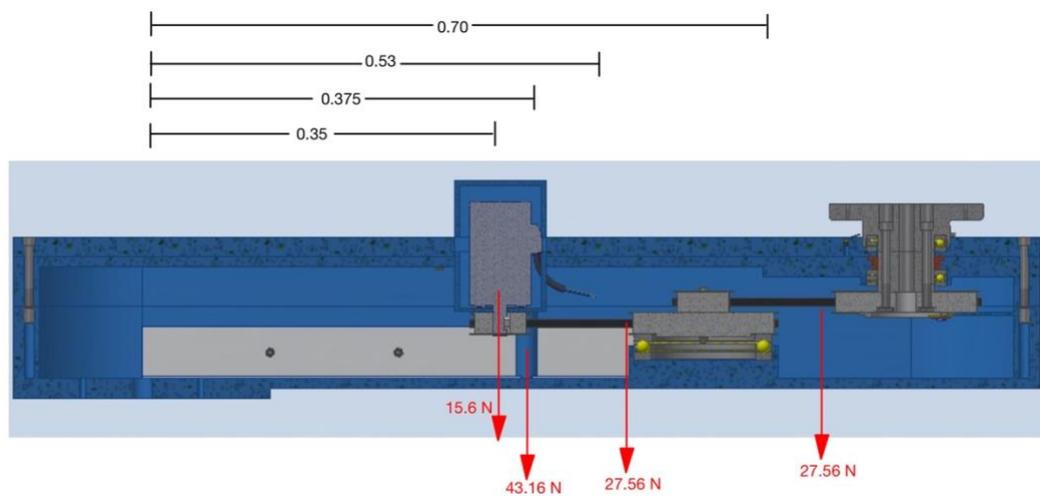


Figura B2. Diagrama de Cuerpo Libre de Brazo 1. Fuente: Elaboración Propia.

Para el movimiento de este primer elemento se diseña una brida que soportará el peso y el momento flector de los elementos del brazo 1 y del brazo 2. La fuerza de reacción y el momento flector que actúan sobre la brida en el extremo izquierdo del brazo 1, se calcula de la siguiente manera:

$$\Sigma Fy = 0 \Rightarrow 15.6N + 43.16N + 27.56N + 27.56N = Ry_{brazo\ 1} \Rightarrow Ry_{brazo\ 1} = 113.88N$$

$$\Sigma M = 0 \Rightarrow 15.6N * 0.35 + 43.16N * 0.375 + 27.56N * 0.53 + 27.56N * 0.707 = M_{brazo\ 1}$$

$$M_{brazo\ 1} = 55.736 Nm$$

En la Figura B3, se presenta el diagrama de cuerpo libre del brazo robótico desde una vista superior para determinar las fuerzas tangenciales que actúan durante el movimiento circular.

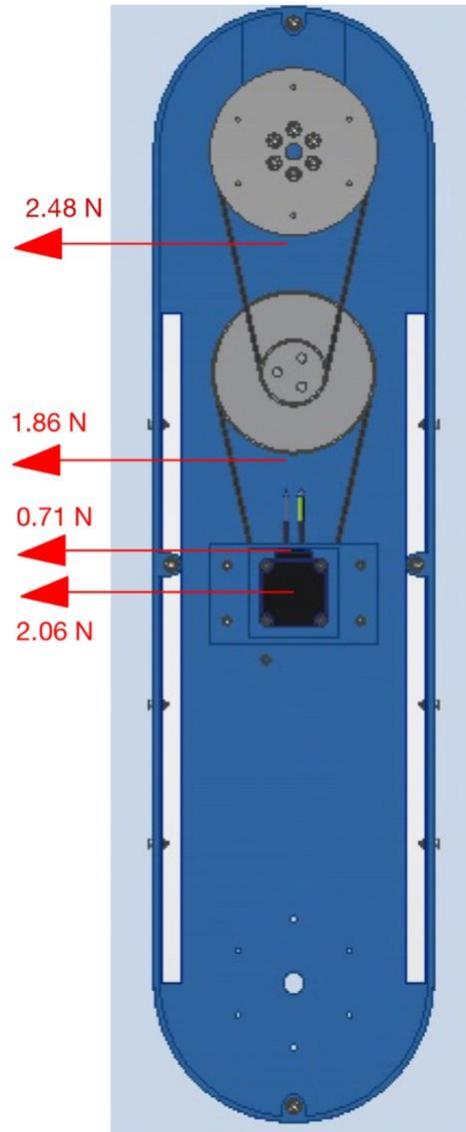


Figura B3. Diagrama de Cuerpo Libre (Vista Superior). Fuente: Elaboración Propia

Se calculan fuerzas centrípetas con la ecuación:

$$F_{centrípeta} = m * r * \omega^2$$

Donde:

m: masa (en kg)

r: radio del movimiento, en este caso es la distancia del extremo izquierdo al centroide del componente. (en m)

w= velocidad angular (en  $\frac{rad}{s}$ )

Para el primer brazo, tomando la velocidad angular como  $1,25 \frac{rad}{s}$  el proceso sería el siguiente:

$$F_{centrípeta\ brazo} = m * r * w^2 \Rightarrow 4.4 * 0.375 * 1,25^2 = 2.57 \frac{kg * m}{s}$$

$$F_{centrípeta\ motor} = m * r * w^2 \Rightarrow 1.6 * 0.35 * 1,25^2 = 0.88 \frac{kg * m}{s}$$

$$F_{centrípeta\ transmision\ 1} = m * r * w^2 \Rightarrow 2.81 * 0.53 * 1,25^2 = 2.32 \frac{kg * m}{s}$$

$$F_{centrípeta\ transmision\ 2} = m * r * w^2 \Rightarrow 2.81 * 0.707 * 1,25^2 = 3.104 \frac{kg * m}{s}$$

Luego de hallar la fuerza centrípeta de los elementos, se hallará la fuerza tangencial a la curva de movimiento con la siguiente ecuación:

$$F_{tangencial} = m * r * \alpha$$

Para este caso en particular, el valor de la aceleración angular es de  $1.25 \frac{rad}{s^2}$ .

$$F_{tangencial\ brazo} = m * r * \alpha \Rightarrow 4.4 * 0.375 * 1.25 = 2.06 \frac{kg * m}{s}$$

$$F_{tangencial\ motor} = m * r * \alpha \Rightarrow 1.6 * 0.35 * 1.25^2 = 0.71 \frac{kg * m}{s}$$

$$F_{tangencial\ transmision\ 1} = m * r * \alpha \Rightarrow 2.81 * 0.53 * 1.25^2 = 1.86 \frac{kg * m}{s}$$

$$F_{tangencial\ transmision\ 2} = m * r * \alpha \Rightarrow 2.81 * 0.707 * 1.25^2 = 2.48 \frac{kg * m}{s}$$

Al final se calculan las inercias de los elementos del brazo 1, siguiendo las siguientes ecuaciones. Si se trata de un elemento puntual, como lo son los motores, se utiliza:

$$I = m * r^2$$

Sin embargo, si no se trata de un elemento puntual se utiliza:

$$I = I_{total} + m * r^2$$

De esta forma se calcula las fuerzas y momentos flectores que actúan en cada elemento. Además, como medida de seguridad, se considera el 25% del peso de una persona promedio (80 kg) ante cualquier apoyo en el extremo del brazo robótico de parte de un operario. En la Tabla B1 se presentan los resultados de todos los componentes antes descritos, así como los del brazo 2, siguiente el mismo proceso antes descrito.

Tabla B1. Cálculos de componentes del brazo robótico. Fuente: Elaboración Propia.

Crterios	Brazo 1	Motor 1	T1	T2	Brida	Brazo 2	Motor	T3	Cabezal	Peso operario	Total	Total (2do brazo)	
Masa	4,4	1,6	2,81	2,81	3	3,4	1,6	2,81	7	20	49,43	34,81	
Fuerza (N)	43,16	15,6	27,5	27,5	29,4	33,35	15,69	27,56	68,67	196,2	484,9	351,5	
Posición	0,375	0,35	0,53	0,70	0,75	0,975	1,01	1,18	1,2	1,2	8,27	5,56	
Momento flector (N-m)	16,2	5,55	14,6	19,5	22,1	32,52	15,74	32,52	82,40	235,5	476,6	142,6	
Fuerza centripeta	2,57	0,88	2,32	3,11	3,52	5,18	2,51	5,18	13,13		38,40	25,99	
Fuerzas tangenciales	2,06	0,71	1,86	2,48	2,81	4,14	2,01	4,14	10,50		30,72	20,79	
Inercia global	1,45	0,20	0,79	1,41	1,69	3,43	1,61	3,92	10,08		24,56	19,03	
Inercia global según Inventor	0,83	0,00	0,00	0,00	0	0,197	0	0	0		1,03	0,2	
Inercia vista desde segundo link	0	0	0	0	0	0,369	0,10	0,52	1,41		-	2,41	
											Fuerzas cortantes (12 RPM) = $(F_c^2 + F_t^2)^{0.5}$	49,18	33,29

Para hallar el momento tursor necesario para mover el primer brazo, se emplea la ecuación de momento:  $\Sigma M = I * \alpha$ , resultado así 30,7 N-m. Análogamente para el segundo brazo, se obtiene un resultado de 3.01N-m. Estos valores son los torques nominales mínimos

que deberían cumplir los motores a elegir. Adicionalmente, para hallar la potencia que requiere el motor para poder mover estos elementos, se utiliza la ecuación:  $P = T * \omega$ . Haciendo uso de los datos ya obtenidos, se obtiene que la potencia del motor que moviliza el brazo 1 es de 38.38 W y el del brazo 2 es de 3.76 W.

En la Tabla B2, se presentan los requerimientos mecánicos para la selección de motores, detallada en el capítulo 3.

*Tabla B2.* Requerimientos mecánicos para los motores 1 y 2. *Fuente:* Elaboración Propia.

	Torque nominal (N-m)	Potencia (W)
Motor 1	30,7	38,38
Motor 2	3,01	3,76

### **B3. Cálculo de transmisiones.**

A partir de los resultados obtenidos en el inciso anterior se puede advertir que los torques nominales son elevados y se necesita una caja reductora para poder obtener el torque deseado. Para el movimiento del primer brazo se requiere un torque nominal de 30.7 N-m, esto quiere decir que su torque de salida será 30.7 N-m y el torque de entrada dependerá del torque nominal del motor escogido. No obstante, se debe diseñar una caja reductora que no consuma mucho espacio, ya que irá alojada en la base del robot SCARA, por lo cual se escogen engranajes. Los engranajes serán de tipo anti backlash, que permiten un menor juego entre sus dientes.

Se plantea una caja reductora de 3 etapas, de número de dientes distintos, para obtener el torque deseado, siguiendo la siguiente ecuación:

$$\frac{\text{Torque final}}{\text{Torque inicial}} = \frac{\text{número de dientes de engranaje mayor}}{\text{número de dientes de engranaje menor}} * \text{eficiencia}$$

Además, la eficiencia de una transmisión por engranajes es de 99%. Sin embargo, como se trata de una caja reductora de 3 etapas, la eficiencia se reduce. Además, agregando

un factor de seguridad, se define que la eficiencia de la caja reductora es de 75%. Se define que se dispondrá de 2 pares de engranajes de 17 dientes, 2 pares de engranajes de 65 dientes, un engranaje de 15 dientes y un engranaje de 57 dientes. Como se colocan en serie, la ecuación resulta de la siguiente forma:

$$\frac{30.7}{\text{Torque inicial}} = \frac{65 * 57 * 65}{17 * 15 * 17} * 0.75 \Rightarrow \text{Torque inicial} = 0.73N - m$$

De la misma forma, la ecuación que rige la relación de velocidades angulares a la entrada de la transmisión y a la salida de la transmisión:

$$\frac{\omega_{final}}{\omega_{inicial}} = \frac{\text{número de dientes de engranaje menor}}{\text{número de dientes de engranaje mayor}}$$

La velocidad angular final es de  $1.25 \frac{rad}{s}$ , por lo que la ecuación resultaría:

$$\frac{1.25}{\omega_{inicial}} = \frac{17 * 15 * 17}{65 * 57 * 65} * 0.75 \Rightarrow \omega_{inicial} = 92.6 \frac{rad}{s} \text{ (885 RPM)}$$

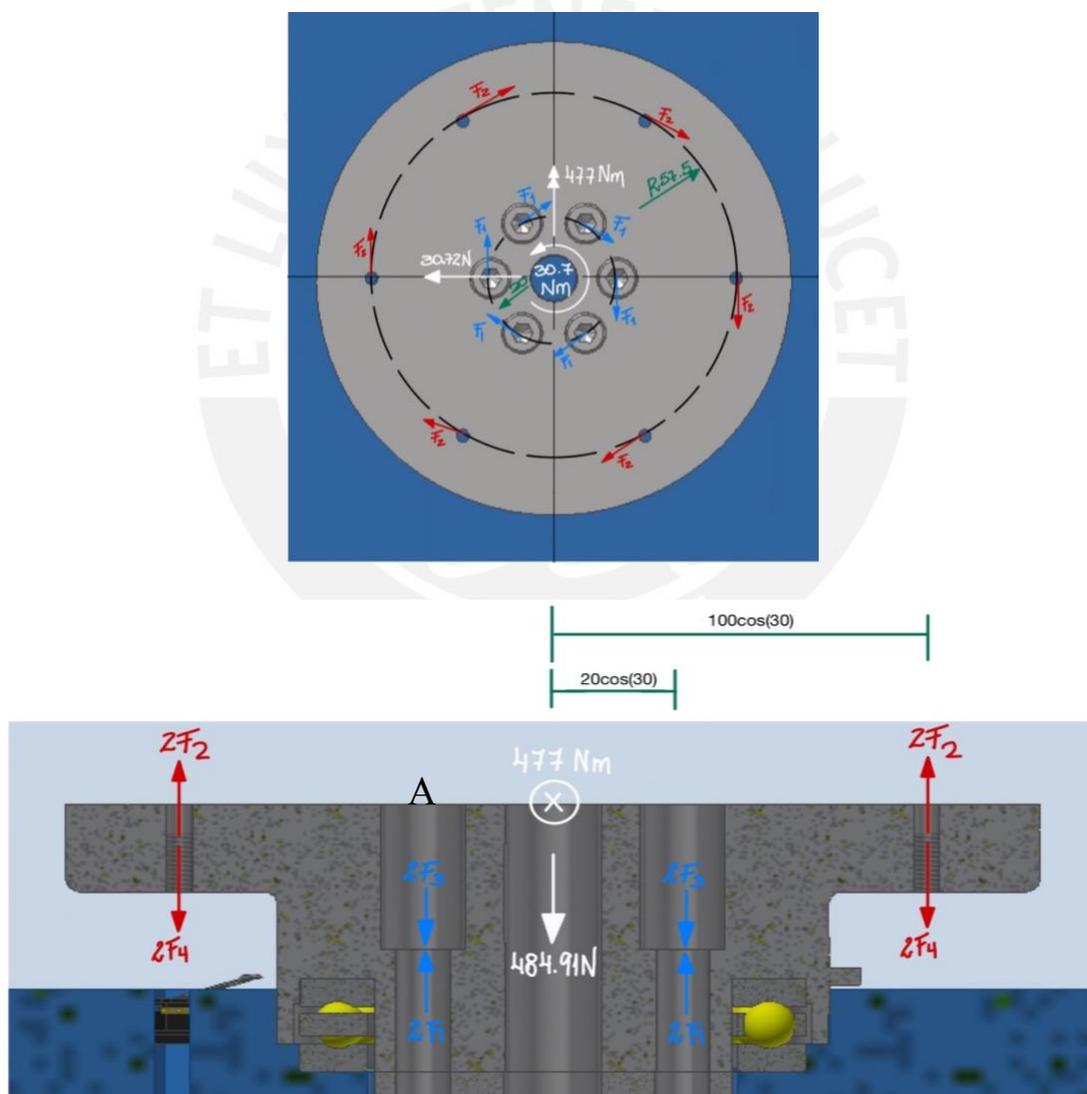
Estos resultados serán el torque nominal mínimo y la velocidad mínima que requiere el primer motor para satisfacer el requerimiento mecánico. Para el movimiento del segundo brazo y del cabezal móvil, se utilizan fajas lineales. Esta transmisión se rige por las mismas ecuaciones que los engranajes. Sin embargo, su eficiencia disminuye a 96%. En la Tabla B3, se presenta los resultados obtenidos.

Tabla B3. Transmisiones en el brazo robótico. Elaboración Propia.

	<b>Etapas de reducción</b>	<b>Radio de reducción</b>	<b>Eficiencia (%)</b>	<b>Torque inicial (N-m)</b>	<b>Velocidad inicial (RPM)</b>
Base	3	3.8	75	0.73	855
Brazo	2	2.5	80	0.62	100
Antebrazo	1	2.5	80	0.1	750

#### B4. Cálculo de tornillos.

Para la unión de los distintos elementos rotatorios y de junta rígida, se usan uniones atornilladas. A continuación, se explica el cálculo detallado de una unión atornillada entre el elemento base y el brazo 1 del sistema robótico. En la *Figura B4* se presenta la brida, elemento que alberga las uniones atornilladas. Además, se detallan los pasos necesarios para verificar que los elementos cumplen con los requisitos mecánicos descritos en cálculos anteriores.



*Figura B4.* Diagrama de Cuerpo Libre de Brida. Arriba: Vista Frontal. Abajo: Vista de Corte.

Elaboración: Propia.

El cálculo de las fuerzas se va a dividir en dos partes: las fuerzas que corresponden al momento torsor y al momento flector. Las fuerzas F1 y F2 corresponden a las reacciones de los tornillos de la periferia debido al momento torsor, mientras que las fuerzas F3 y F4 corresponden al momento flector.

Para el cálculo de la fuerza F1 y F2 se emplea la ecuación:

$$6 * F * d = 30.7N - m$$

Donde:

$d$ : radio de la circunferencia a la que se encuentran los tornillos del centro (en mm).

La distancia de los tornillos en la periferia de la brida es 57.5 mm por lo que la fuerza F2 resulta ser 178 N, mientras que los tornillos cercanos al centro de la brida tienen una distancia de 20 mm obteniendo así una fuerza F1 de 511.75 N. Para el cálculo de las fuerzas F3 y F4 se sigue las siguientes ecuaciones:

Fuerzas vistas desde el centro de la brida:

$$60 \cos(30) * 2 * F_3 + 200 \cos(30) * 2 * F_4 = 477 * 10^3$$

$$60 \cos(30) * 2 * F_3 + (80 \cos(30) + 140 \cos(30)) * 2 * F_4 = 477 * 10^3 + 484.91 * 20 \cos(30)$$

Fuerzas vistas desde el punto A:

$$40 \cos(30) * 2 * F_3 + 200 \cos(30) * 2 * F_4 = 477 * 10^3$$

$$40 \cos(30) * 2 * F_3 + 440 \cos(30) * 2 * F_4 = 477 * 10^3 + 484.91 * 20 \cos(30)$$

De esta forma la fuerza F3 resulta ser 4522.6 N y la fuerza F4 es 20.2 N. Teniendo estos resultados, se procede a hacer el cálculo de los tornillos para las uniones atornilladas. En primer lugar, los tornillos que se encuentran cercanos a la periferia de la brida soportan una fuerza cortante de 178 N y una fuerza de tracción de 20.2 N. La fuerza cortante se transformará en fuerza de tracción a través de la ecuación:

$$Fuerza\ cortante = Fuerza\ tracción * \mu$$

Para este caso se asume que el coeficiente de rozamiento es de 0.16. Por lo tanto, la fuerza de tracción que soporta el tornillo es de 1112.5 N, esto sumado a la fuerza de tracción por el régimen estático, resulta en una fuerza de tracción total de 1132.69N. Utilizando como referencia las tablas provistas por *Uniones Atornilladas* (Barriga, 94), la fuerza mínima que soporta el tornillo según las condiciones de la fuerza que actúa: dinámicas centradas, es de 2500 N; y la fuerza máxima necesaria es de 4000N, ya que será ajustado por atornilladores simples. Esto resuelve que el diámetro tentativo del tornillo es de 5mm (M5). Para calcular la longitud del tornillo se emplea la siguiente ecuación:

$$L_{tor} = L_p + \gamma_{min}$$

$$\gamma_{min} = m + 2P$$

Según DIN EN ISO 4032, el valor de  $m$  es 4 mm y el paso es 0.8, lo cual resulta en  $\gamma_{min}$  igual a 5.6mm. El valor de  $L_p$ , longitud de agujero, es igual a 35. Finalmente, la longitud del tornillo calculado será de 40.6 mm. Se usa arandelas de presión para que el tornillo mantenga su ajuste aún habiendo vibraciones por el movimiento o transporte. Por tal razón, se escoge la longitud inmediatamente superior provista por la norma DIN ISO 912 de cabeza cilíndrica: 45mm. Por lo tanto, los datos del tornillo son los siguientes, mostrados en la *Tabla B4*.

*Tabla B4.* Datos del tornillo analizado. Elaboración Propia

d	s	b	d agujero	ls/r	lr	As	A3	d2	d3
M5	9	22	5.5	23	12	14.18	12.68	4.48	4.018

El dato  $ls/r$  y  $lp$  son obtenidos a partir de las siguientes ecuaciones:

$$l_{s/r} = l_{tor} - b$$

$$l_r = l_p - l_{s/r}$$

Las dimensiones del área de núcleo ( $A_3$ ), el área resistente ( $A_s$ ), y los diámetros de francos ( $d_2$ ) y diámetro de núcleo ( $d_3$ ), se calculan a partir de las siguientes ecuaciones:

$$A_3 = \frac{\pi}{4} * d_3^2$$

$$A_s = \frac{\pi}{4} * \frac{(d_2 + d_3)^2}{2}$$

$$d_2 = 5 - 0.75 * H, \text{ en este caso el valor de H es } 0.6928 \text{ mm}$$

$$d_3 = D_1 - \frac{H}{6}, \text{ donde } D_1 \text{ es igual a } 4.1339 \text{ mm}$$

El siguiente paso de cálculo es obtener la rigidez del tornillo y la rigidez de la placa. Este procedimiento se realiza a partir de las siguientes ecuaciones:

$$\frac{1}{C_t} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{C_i}$$

Donde:  $C_i = \frac{EA_i}{L_i}$  y  $A_i = \frac{\pi D_i^2}{4}$ . De esta forma, se obtienen los siguientes resultados:

Tramos	0.4 d	ls/r	lr	0.5 d	0.4 d
Longitud	2	8	12	2.5	2
1/Ci	0,0000004850	0,0000019402	0,0000040291	0,0000009386	0,0000004850

La suma resulta ser 0,0000078780 y el valor de rigidez del tornillo es 126935.7.

Para calcular la rigidez de la placa, hay que analizar ciertas características del agujero que permiten saber en que caso de estudio estamos. En primer lugar, tenemos el valor de  $d_1$  es igual a 9mm, el diámetro exterior es de 35mm, por la forma geométrica que tiene la brida, y el diámetro máximo es obtenido a partir de las siguientes ecuaciones:

$$b_l = \frac{L_p}{s} = 3.88$$

$$e = \frac{D_{ext}}{d_1} = 3.88$$

$$\tan(\gamma) = 0.462 + 0.032 * \ln\left(\frac{b_l}{2}\right) + 0.153 * \ln(e) = 0.591$$

$$D_{m\acute{a}x} = d_1 + L_p * \tan(\gamma) = 29.68mm$$

Después de calcular este valor, se llega a la conclusión que esta aplicación se encuentra en el caso 2 ( $D_{ext} > D_{m\acute{a}x}$ ). Por lo tanto, la constante de la rigidez de la placa se calcula con la siguiente ecuación:

$$c_p = \frac{2 * \pi * E * d_{agujero} * \tan(\gamma)}{\ln\left(\frac{(D_{maz} - d_{agujero}) * (d_1 + d_{agujero})}{(D_{max} + d_{agujero}) * (d_1 + d_{agujero})}\right)}$$

En este caso, es la unión de placas de acero fundido (brida) y plástico ABS (tapa inferior), por lo que se toma como el módulo de elasticidad igual  $2300 \frac{N}{mm^2}$ . Con este valor, se obtiene que  $c_p$  es igual a 44890.95. Con estas dos constantes, se puede calcular el factor de distribución de carga a través de  $\phi = \frac{c_t}{(c_t + c_p)}$  el cual resulta ser 0.020746. Posterior a este paso se requiere calcular el factor de asentamiento. En la *Tabla B5*, se presenta los valores de asentamiento, asumiendo una rugosidad superficial de 25  $\mu m$ .

*Tabla B5.* Valores de asentamiento. Elaboración propia

Cabeza con placa carga normal	3 $\mu m$
Placa con placa carga normal	2 $\mu m$
Hilos tornillo/tuerca carga normal	3 $\mu m$
Tuerca con placa carga normal	3 $\mu m$
Factor de asentamiento	11 $\mu m$

Con este factor de asentamiento, se procede a calcular la fuerza asentamiento, de la siguiente manera:

$$F_{as} = \frac{c_p * c_t}{c_t + c_p} * \delta_{as} = 10,24 N$$

Luego, se calcula la fuerza de pretensión con la ecuación:

$$F_{Mmax} = \alpha_A * [F_{res} + F_{as} + (1 - \phi) * F_{ext}]$$

El valor recomendado para el factor de ajuste ( $\alpha_A$ ) es 1.6. En tanto, el valor de  $F_{ext}$  es igual a la fuerza total que actúa sobre el tornillo. Por lo que la fuerza de pretensión resulta ser 1791.11 N. El último cálculo por realizar es del montaje. En primer lugar, se realiza el cálculo del momento torsor medio. Para esto se requieren los siguientes datos:

$$\tan(\varphi) = \frac{P}{\pi * d_2} = 0.0568 \Rightarrow \varphi = 3.2529 \text{ rad}$$

$$\tan(\rho') = \frac{\mu}{\cos\left(\frac{30}{2}\right)} = 0.16564 \Rightarrow \rho' = 9.405 \text{ rad}$$

$$M_{tm} = F_{Mmax} * \frac{\tan(\varphi + \rho')}{2} * d_2$$

Donde el momento torsor medio resulta ser  $901.171 \frac{N}{mm^2}$ . En segundo lugar, se calcula el momento flector medio a partir de las ecuaciones:

$$D_{fm} = \frac{s + d_{agujero}}{2}$$

$$M_{fm} = D_{fm} * F_{Mmax} * \frac{0.2}{2}$$

De lo cual, el momento flector medio resulta ser  $1298.55 \frac{N}{mm^2}$ . Con estos dos valores de momento, se calcula el valor del momento de ajuste, que resulta ser la suma entre estos: 2199.72. Verificando el valor con las Tabla 1 de *Uniones Atornilladas*, se concluye que es un valor adecuado, ya que es menor ( $2199.72 < 27000$ ).

Se procede a realizar las verificaciones. La primera condición es que la fuerza exterior que se ejerce sobre el tornillo debe ser menor a  $0.1\sigma_{0.2}A_s$ . Para calcular la fuerza exterior se emplea la siguiente ecuación:

$$F_{ext/t} = \phi * F_{ext} = 23.49 \text{ N} < 650 = 0.1\sigma_{0.2}A_s$$

Cumple con la primera condición. La segunda condición es verificar que los esfuerzos durante el montaje. Para esto es necesario hallar los siguientes valores:

$$d_0 = \frac{d_2 + d_3}{2} = 4.249 \text{ mm}$$

$$A_0 = \frac{\pi * d_0^2}{4} = 14.182 \text{ mm}^2$$

$$\sigma_m = \frac{F_{M \max}}{A_0} = 126.28 \text{ N/mm}^2$$

$$W_p = \frac{\pi * d_0^3}{16} = 15.06 \text{ mm}^3$$

$$\tau_{tm} = \frac{M_{tm}}{W_p} = 59.81 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_m^2 + 3 * \tau_{tm}^2} = 163.34 \text{ N/mm}^2 \leq 0.9 * 480 = \gamma * \sigma_F$$

Cumple con la segunda condición. La tercera condición es verificar que los esfuerzos con carga exterior estática sean menores al esfuerzo de fluencia.

$$\sigma_{max} = \frac{F_{M \max} + F_{ext}}{A_0} = 127.94 \text{ N/mm}^2$$

$$\tau_{trabajo} = \frac{\tau_{tm}}{2} = 29.90 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_{max}^2 + 3 * \tau_{trabajo}^2} = 138.03 \text{ N/mm}^2 < 480 = \sigma_F$$

La verificación siguiente es del tornillo por esfuerzo variable. A partir de las siguientes ecuaciones:

$$\sigma_{alt} = \frac{F_{total} * \phi}{2 * A_s} = 0.8284 \text{ N/mm}^2$$

$$F_{tm} = \frac{F_{total} * \phi}{2} + \gamma * F_{0.2} = 5861.75$$

$$\frac{F_{tm}}{\sigma_{0.2} * A_s} = 0.9 < 1$$

Cumple con la condición de esfuerzo variable. Además, al ser un tornillo de grado 8.8, este requiere de tratamiento térmico, calculado con las siguientes ecuaciones:

$$\sigma_a = \left( \frac{150}{d} + 45 \right) * 0.85 * \left( 3.8 - \frac{F_{ext}}{F_{0.2}} \right) = 242.02 \text{ N/mm}^2$$

$$FS = \frac{\sigma_a}{\sigma_{alt}} = 292.12 > 1.2$$

Cumple con el requerimiento de tratamiento térmico. Por último, la verificación por presión superficial se realiza de la siguiente manera:

$$F_{max/t} = F_{Mmax} + F_{ext/t} = 1814.61 \text{ N}$$

$$A_c = \pi * \frac{s^2 - d_{agujero}^2}{4} = 39.85 \text{ mm}^2$$

$$p = \frac{F_{max/t}}{A_c} = 45.52 < 420 = p_{adm}$$

Por lo tanto, se concluye que el tornillo M5x45 cumple y aprueba todos los requerimientos mecánicos para esta aplicación. Análogamente, se resuelve para el caso de los tornillos más cercanos al agujero central dando como resultado el tornillo M8x80.

## B5. Matriz Morfológica

Tabla B.5 Matriz Morfológica del Dominio Interfaz. *Fuente:* Elaboración Propia.

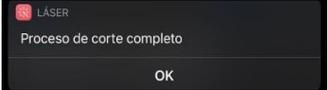
	<b>Solución 1</b>	<b>Solución 2</b>	<b>Solución 3</b>
Iniciar/Pausar sistema	 HMI	 Aplicación móvil	 Botón mecánico
Recepción de indicaciones de prendas	 HMI	 Aplicación móvil	 Aplicación móvil
Regresar a la posición inicial	 HMI	 Aplicación móvil	 Botón mecánico
Indicar estado del sistema	 Led	 Led	 Led
Alertar un proceso de corte completo	 Led	 Alerta Textual	 Alarma sonora

Tabla 3.2 Matriz Morfológica del Dominio Sensores. Fuente: Elaboración Propia.

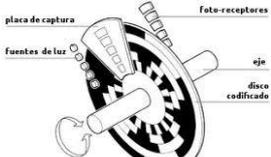
	<b>Solución 1</b>	<b>Solución 2</b>	<b>Solución 3</b>
Sensar posición angular	 <p>Encoder inductivo</p>	 <p>Resolver</p>	 <p>Encoder óptico</p>
Sensar velocidad lineal	 <p>Acelerómetro lineal</p>	 <p>Acelerómetro lineal</p>	 <p>Potenciómetro lineal</p>
Sensar límite de giro o desplazamiento máximo	 <p>Interruptor de límite de palanca fija</p>	 <p>Magnéticos</p>	 <p>Capacitivos</p>
Sensar presencia de humo	 <p>Detector de humo térmico</p>	 <p>Detector de humo iónico</p>	 <p>Detector de humo óptico</p>

Tabla 3.3 Matriz Morfológica del Dominio de Control. Fuente: Elaboración Propia.

	<b>Solución 1</b>	<b>Solución 2</b>	<b>Solución 3</b>
Procesar información de sensores	Hardware		
	 Microprocesador	 Mini PC	 Microcontrolador
	Software		
	Filtro de Kalman	Filtro de Kalman	Filtro Adaptativo
Procesar información de sistema	Hardware		
	 Microprocesador	 Mini PC	 Microcontrolador
	Software		
	Cinemática inversa	S-curve	Interpolación cuadrática
	Control PID	Control Adaptivo	Control PD

Tabla 3.4 Matriz Morfológica del Dominio de Energía. Elaboración: Propia

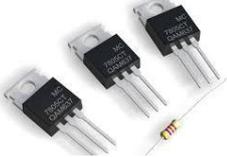
	<b>Solución 1</b>	<b>Solución 2</b>	<b>Solución 3</b>
Conexión a energía	 Conexión directa	 Estabilizador de voltaje	 Supresor de picos
Energizar interfaz Energizar sensores Energizar actuadores Energizar control	 Regulador Switching	 Rectificador de corriente	 Reguladores lineales
Desenergizar el sistema	 Parada de emergencia tipo Seta	 Pulsador de habilitación	 Parada de emergencia tipo Seta

Tabla 3.5 Matriz Morfológica del Dominio de Actuadores. Elaboración: Propia

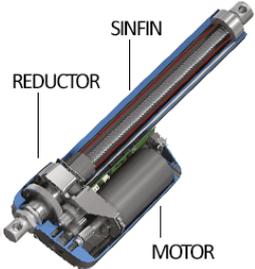
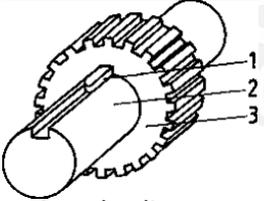
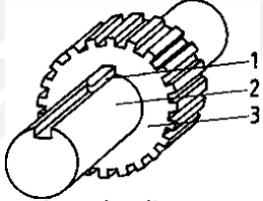
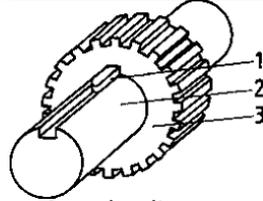
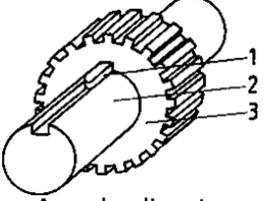
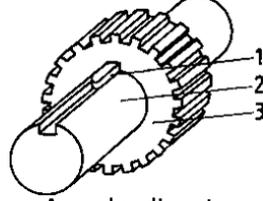
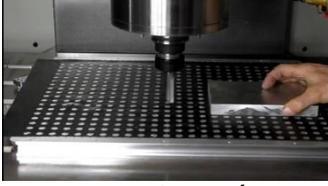
	<b>Solución 1</b>	<b>Solución 2</b>	<b>Solución 3</b>
Accionar láser	Láser de CO <sub>2</sub>	Láser de fibra	Láser de Nd-Yag
Accionar sistema de sujeción	 Manual	 Válvulas de succión	 Servomotor
Accionar los motores	 Servomotor	 Motor DC	 Actuador lineal

Tabla 3.6 Matriz Morfológica del Dominio Mecánico. Elaboración: Propia

	<b>Solución 1</b>	<b>Solución 2</b>	<b>Solución 3</b>
Desplazar en un plano horizontal	 Configuración RRP	 Configuración RRR	 Configuración PPP
Movimiento en un eje lineal (ejeX)	 Acople directo	 Acople directo	 Acople directo
Movimiento en un eje lineal (ejeY)	 Acople directo	 Fajas	 Acople directo

<p>Soportar tela</p>	 <p>Mesa de vacío</p>	 <p>Mesa panal de abeja</p>	 <p>Mesa de lamelas de acrílico</p>
<p>Sujetar la tela</p>	 <p>Ganchos</p>	<p>Succión</p>	 <p>Mordazas</p>

