

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la
Producción**

Automatización del cableado automotriz mediante el diseño de brazo robótico
y sistema de identificación

PROYECTO INTEGRADOR

Previo la obtención del Título de:

Ingenieros en Mecatrónica

Presentado por:

Sofía Del Rocío España Ayala

Juan Sebastián Sánchez Acosta

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2022

DEDICATORIA

El presente proyecto va dedicado a nuestro cliente, el Ing. Francisco Yumbra, quien nos ofreció su apoyo durante el desarrollo de este y de quien tomamos inspiración con sus trabajos de investigación anteriores.

Al Ing. Bryan Puruncajas, nuestro tutor de tesis. Quien nos introdujo en las investigaciones de inteligencia artificial y nos facilitó herramientas para nuestro aprendizaje en este tema. Además de ponernos en contacto con nuestro cliente y guiarnos a lo largo de este trabajo.

Al Ing. Efraín Terán nuestro tutor de carrera, quien en conjunto con los docentes de la facultad nos dotaron de los conocimientos necesarios para llegar a este punto del final de nuestra vida universitaria.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por todas las bendiciones que me ha dado a lo largo de mi vida, por el amor y la gracia que me ha acompañado.

A mis padres, por ser más que un apoyo, un pilar fundamental en mi vida quienes a diario me motivaron a ser la mejor versión de mí y sin los cuales no hubiera podido lograr nada de lo que he alcanzado.

A la ESPOL por ser una fuente de conocimiento que nos permitió empujar nuestros límites y permitirnos crecer tanto como profesional y personalmente.

A cada uno de los excelentes educadores que tuve el placer de conocer a lo largo de mi vida estudiantil, todos y cada uno de ellos aportaron no solo con su conocimiento, sino con su apoyo en el afán de vernos crecer y mejorar como estudiantes.

Al M.Sc. Efraín Terán, al M.Sc. Bryan Puruncajas y al Ph.D. Francisco Yumbra, quienes con su dirección experta y consejos valiosos me han permitido explorar nuevas áreas de conocimiento y fortalecer mis habilidades como investigadora.

A mis amigos y compañeros con quienes he compartido a lo largo de esta maravillosa experiencia, gracias por ser el apoyo en los momentos difíciles y la compañía en las alegrías y triunfos, me complace haber compartido con personas tan maravillosas y espero que la vida nos depare muchos más momentos por compartir.

Sofía Del Rocío España Ayala.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mis padres por ser quienes me dieron la vida y me criaron para ser una persona de bien y poder llegar hasta este punto de mi vida académica. Sin su apoyo nada de esto sería posible.

Al M.Sc. Efraín Terán, al M.Sc. Bryan Puruncajas y al M.Sc. Francisco Yumbra que con su guía y experiencia pudimos realizar este trabajo de titulación.

A la ESPOL como institución y a los docentes que la conforman y que formaron parte del camino educativo que recorrí. El conocimiento que me brindaron formará los cimientos de mi futura carrera profesional.

Un agradecimiento especial a mis profesores de colegio, Martha Mera por enseñarme a buscar la excelencia en todo lo que hago y a ser responsable, y Rafael Maldonado gracias a quien pude conocer el valor de la disciplina y la dedicación en el deporte y ahora puedo aplicarlos a mi educación.

A mis amigos de la infancia que siempre me han acompañado y motivado a continuar.

A mis amigos de la universidad que he conocido a lo largo de estos cinco años con quienes compartí momentos difíciles y alegres, sin ellos nada hubiera sido igual.

En memoria de mi hermano Jhon Sánchez y de mi prima Emily Mena a quienes recordaré siempre con mucho cariño.

Juan Sebastián Sánchez Acosta

DECLARACIÓN EXPRESA

"Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; *Sofía del Rocío España Ayala* y *Juan Sebastián Sánchez Acosta* damos nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual"


Sofía España Ayala


Juan Sánchez Acosta

EVALUADORES

Efraín Terán, M.Sc.

PROFESOR DE LA MATERIA

Bryan Puruncajas, M.Sc.

PROFESOR TUTOR

RESUMEN

La industria automotriz es una de las más importantes a nivel mundial, con clientes y plantas de ensamblaje en la gran mayoría de países. Dentro de estas fábricas se llevan a cabo procesos altamente automatizados gracias a los avances en robótica durante los últimos años, etapas como la manufactura de chasis, el ensamblaje, la soldadura de partes y la pintura, prescinden de la labor humana para realizarse. Sin embargo, el cableado eléctrico continúa siendo uno de los límites que la automatización no ha podido superar debido a la dificultad que conlleva. Razón por la cual se requieren de alrededor de cinco operadores y veinte horas aproximadas para ejecutar la tarea en un vehículo. El presente proyecto representa un avance en la solución de esta problemática. Se propuso un sistema de identificación de cables automotrices mediante visión artificial compuesto por un brazo robótico con un manipulador mecánico y una cámara de profundidad. El diseño final fue desarrollado en lenguaje de programación Python respecto al algoritmo de aprendizaje automático, y en Sistema Operativo de Robótica (ROS) a nivel de simulación de movimiento del robot. Con este sistema fue posible calcular un determinado número de puntos de agarre del cable sobre una mesa de trabajo en menos de 9s, consiguiendo luego que el robot moviera la pinza mecánica a estas ubicaciones con una precisión aceptable. Se espera reducir de gran manera el tiempo de realización del cableado manual con el sistema propuesto y los trabajos de investigación posteriores a este proyecto.

Palabras Clave: visión artificial, aprendizaje automático, sistema operativo de robótica, industria automotriz, cableado eléctrico.

ABSTRACT

The automotive industry is one of the most important in the world, with customers and assembly plants in most countries. Within these factories, highly automated processes are carried out thanks to advances in robotics in recent years, stages such as chassis manufacturing, assembly, welding of parts and painting, dispense with human labor to be carried out. However, electrical wiring continues to be one of the limits that automation has not been able to overcome due to the difficulty involved. The reason why around five operators and approximately twenty hours are required to execute the task in a vehicle. This project represents an advance in solving this problem. A system for the identification of automotive cables through artificial vision was proposed, consisting of a robotic arm with a mechanical manipulator and a depth camera. The final design was developed in the Python programming language with respect to the machine learning algorithm, and in the Robotics Operating System (ROS) at the robot movement simulation level. With this system, it was possible to calculate a certain number of cable gripping points on a work surface in less than 9s, later getting the robot to move the mechanical gripper to these locations with acceptable precision. It is expected to greatly reduce the operation time for manual wiring with the proposed system and the research work after this project.

Keywords: *machine vision, machine learning, robotics operating system, automotive industry, electrical wiring.*

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	I
ABSTRACT	II
ÍNDICE GENERAL	III
ABREVIATURAS.....	VI
SIMBOLOGÍA.....	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	VIII
ÍNDICE DE TABLAS.....	X
CAPÍTULO 1	
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Descripción del problema	2
1.2. Justificación	4
1.3. Objetivo.....	5
1.1.1 Objetivo general	5
1.1.2 Objetivos específicos	5
1.4. Marco teórico	6
1.1.3 Panorama general de la electrificación vehicular en Ecuador	7
1.1.4 Estructura de un arnés de cables.....	8
1.1.5 Brazos robóticos en la industria	9
1.5. Estado actual de la automatización de cableado	12
1.6. Estado del arte.....	13
CAPÍTULO 2	
2. METODOLOGÍA	2
2.1. Requerimientos de diseño	2

2.2.	Selección de la alternativa de solución	16
2.3.	Proceso de diseño	18
2.4.	Diseño conceptual	19
2.5.	Parámetros de diseño mecánico.....	21
2.5.1.	Cálculo de la cinemática.....	21
2.5.2.	Diseño de la pinza.....	24
2.5.3.	Sistema de sujeción	25
2.5.4.	Cálculo de la fuerza de la pinza	27
2.5.5.	Determinación de la carga puntual.....	27
2.5.6.	Sujeción Interna	28
2.6.	Parámetros de control.....	30
2.6.1.	Control de trayectoria	30
2.6.2.	Control de la pinza	31
2.7.	Parámetros de diseño informático	32
2.7.1.	Selección de algoritmo de reconocimiento.....	33
2.7.2.	Selección de la cámara	35

CAPÍTULO 3

3.	RESULTADOS Y ANÁLISIS	2
3.1.	Algoritmo de reconocimiento.....	2
3.1.1.	Funcionamiento y pruebas del modelo.....	38
3.2.	Diseño de pinza mecánica.....	41
3.2.1.	Sistema de control de cierre.....	44
3.3.	Sistema completo	45
3.3.1.	Simulación en ROS.....	45

3.3.2. Pruebas en robot real.....	47
3.4. Análisis de costos	50
CAPÍTULO 4	
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	38
4.1. Conclusiones	38
4.2. Recomendaciones	53
BIBLIOGRAFÍA	
ANEXOS	

ABREVIATURAS

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
ROS	Robotics Operating System
GLB	Global
USD	United States Dollar
IA	Inteligencia Artificial
RAM	Random Access Memory
ML	Machine Learning

SIMBOLOGÍA

kg	Kilogramo
g	Gramo
s	Segundo
h	Hora
m	Metro
cm	Centímetro
mm	Milímetro
cm/s	Centímetro sobre segundo
u	Unidad
θ	Posición angular (theta)
N	Newton
px	Píxel
V	Voltio
A	Amperio
mA	Miliamperio

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Composición del mercado de vehículos en Ecuador.....	6
Figura 1.2 Ejemplo de arnés de cables automotrices.....	7
Figura 1.3 Ejemplo de conectores y terminales en un arnés de cables.....	8
Figura 1.4 Robot de tipo SCARA.....	10
Figura 1.5 Robot de tipo Cartesiano.....	11
Figura 1.6 Robot Universal.....	11
Figura 1.7 Proceso de manufactura de automóviles.....	12
Figura 1.8 Robots con visión artificial.....	13
Figura 2.1 Metodología de diseño.....	19
Figura 2.2 Diseño conceptual.....	20
Figura 2.3 Diagrama de análisis cinemático.....	22
Figura 2.4 Pinza de tipo mecánica.....	25
Figura 2.5 Pinza mecánica con desplazamiento angular.....	26
Figura 2.6 Pinza mecánica con desplazamiento lineal.....	26
Figura 2.7 Tipos de carga puntual debido a la sujeción.....	28
Figura 2.8 Superficie del cable de trabajo – Elaboración propia.....	29
Figura 2.9 a) Reconocimiento con redes neuronales (reducción de calidad de la imagen) y b) Reconocimiento utilizando clustering (agrupación de píxeles de la imagen para generar secciones del mismo).....	34
Figura 3.1 Etapas del proceso de reconocimiento de cables con python y aprendizaje automático.....	2
Figura 3.2 Pruebas del modelo con cables en varias posiciones. A la izquierda la imagen original, a la derecha el resultado.....	39
Figura 3.3 Gráfica de puntos de agarre calculados versus tiempo de ejecución del programa.....	40
Figura 3.4 Diseño del prototipo inicial de la pinza.....	41
Figura 3.5 Prototipo 3D de la pinza, agarre cóncavo.....	42

Figura 3.6 Prototipo 3D de la pinza, agarre dentado	42
Figura 3.7 Prototipo 3D de la pinza, agarre plano	43
Figura 3.8 Prueba del prototipo sobre el cable	43
Figura 3.9 Plano eléctrico del circuito de control para el cierre de la pinza	44
Figura 3.10 Robot simulado en el espacio de trabajo.....	45
Figura 3.11 Espacio del trabajo del robot y visualización real de la cámara	46
Figura 3.12 Entorno de trabajo con el robot ABB en el laboratorio.....	48
Figura 3.13 Posicionamiento del robot en distintos puntos del cable	49

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Requerimientos de diseño	2
Tabla 2.2 Criterios de selección	17
Tabla 2.3 Matriz de decisión.....	18
Tabla 2.4 Dimensiones y masa promedio de un arnés de cables	21
Tabla 2.5 Tipos de Superficies y materiales para la sujeción interna	29
Tabla 2.6: Componentes eléctricos usados.....	32
Tabla 2.7 Evaluación de alternativas de algoritmos	35
Tabla 2.8 Características de la cámara seleccionada	36
Tabla 3.1 Listado y cotización de rubros esenciales	50
Tabla 3.2 Cotización del brazo robótico adicional a los componentes esenciales.....	51

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

La industria automotriz es una de las más importantes a nivel mundial en Ecuador. En su artículo para diario El Mercurio, F. Ramón [1] comento que, las ventas de vehículos nuevos en abril de 2022 alcanzaron las 12.004 unidades, registrándose un crecimiento interanual del 39,0 % frente al mismo mes de 2021. Para cubrir con la demanda se requiere de una producción industrial con altos niveles de automatización, que permitan tener un flujo constante de productos.

Actualmente los robots industriales realizan una significativa parte del proceso de manufactura para automóviles tales como: la soldadura, pintura, unión de las piezas, entre otras tareas que se basan en movimientos repetitivos con posición de control [2]. Sin embargo, existe una limitante en la operación de objetos linealmente deformables, ya que demanda un mayor nivel de complejidad en los sistemas de visión de las máquinas [3]. Para alcanzar el objetivo de automatizar estas tareas, se requiere crear un sistema que tenga una autopercepción en un entorno cambiante.

Una de estas tareas, es la conexión del conjunto de arnés de cables en el circuito eléctrico del vehículo, lo cual esencial en su manufactura. Este proceso requiere que el cableado sea conectado en distintas partes del chasis [4], lo cual genera una complejidad dando como resultado que, en la actualidad, siga siendo realizada manualmente como se puede apreciar en el ejemplo de la []. Para su realización es necesario el reconocimiento total de la estructura del cable tales como, ramales, conectores, terminales entre otros [5]. Esto ha generado un cuello de botella dentro de una industria a la vanguardia de la tecnología, y la automatización del cableado puede representar un incremento en la eficiencia del proceso y un intrínseco aumento en la producción.

Esta automatización implica encontrar la óptima combinación entre las tecnologías disponibles. Las opciones que tienen mayor probabilidad de éxito optan por un enfoque en métodos de aprendizaje automático tales como clasificación de objetos junto con técnicas de visión por computadora. El resultado deseado es un reconocimiento del cuerpo principal y las ramificaciones del cable, generando una ruta de puntos a lo largo de este, lo cual permitirá al manipulador formar una trayectoria de seguimiento a las partes de interés del cable y realizar las conexiones pertinentes dentro del vehículo.



Figura 1.1 Ejemplo de proceso de cableado automotriz manual [6]

1.1. Descripción del problema

La automatización de procesos de manufactura automotriz es un área que ha recibido atención en las distintas etapas de fabricación de piezas y ensamblaje, con elementos robóticos, neumáticos, de control, entre otros [7]. Sin embargo, el cableado electrónico continúa llevándose a cabo de forma manual. Dependiendo

del caso, esta tarea toma como mínimo una hora en realizarse, pero se conoce que puede llegar a extenderse hasta 20 horas o más si se presentan complicaciones [8]. Este proceso presenta una oportunidad de mejora en caso de automatizarse.

Con lo antes mencionado, resulta de interés el desarrollo de un sistema capaz de reconocer cuerpos y ramales, que brinde a futuro la posible intervención de robots colaborativos en la tarea del cableado automotriz. El presente proyecto va dirigido a cubrir esta necesidad, teniendo como enfoque la mejora de la precisión en de detección de cables que poseen los sistemas robóticos actuales.

1.2. Justificación

Muchas empresas de fabricación de la industria automotriz no cuentan, con procesos automatizados para realizar el cableado de sus vehículos. Un hecho que incrementa la necesidad de dicha automatización es el creciente aumento de componentes electrónicos y de software incorporados en las motos, camiones y, principalmente, en autos. Entre estos se encuentran sistemas de conducción asistida con IA, cámaras delanteras y posteriores, equipos de sonido y cerraduras electrónicas de seguridad, por mencionar algunos ejemplos [9].

Si bien los intentos por cubrir esta necesidad no han sido nulos, los métodos aplicados para conseguirlo no presentan resultados lo suficientemente efectivos como para dar soluciones replicables y escalables a nivel industrial. Entre los obstáculos que se presentan en este apartado, se destaca el de la limitada capacidad de percepción del entorno que poseen las máquinas. Resulta ser que “todavía se puede observar una brecha significativa entre la eficiencia en los sistemas sensoriales de los humanos y la de los robots industriales, lo que crea la necesidad de contratar personas para trabajos tediosos y repetitivos” [3]. Por este motivo, la detección de las mallas de cables y sus conectores se considera el proceso que retrasa el avance de la automatización completa de la fabricación automotriz [5].

Con estos antecedentes, se propone entonces lograr una precisión en la detección de mallas de cables superior al 70%; mediante el diseño de un sistema mecatrónico de identificación y manipulación autónoma de mallas de cables con ayuda de un brazo robótico.

1.3. Objetivo

1.3.1 Objetivo general

Diseñar un sistema de detección y trazado de trayectoria de mallas de cables, mediante un brazo robótico comandado por algoritmos de visión artificial, para la manipulación del cableado eléctrico de vehículos.

1.3.2 Objetivos específicos

- I.** Diseñar un manipulador mecánico capaz de acoplarse a un brazo robótico seleccionado, para la sujeción del cable o de sus conectores.
- II.** Simulación de un sistema de control retroalimentado con imágenes que garantice el posicionamiento preciso del actuador en los puntos de agarre.
- III.** Construir un algoritmo de aprendizaje automático que permita realizar la detección y segmentación del cuerpo principal del cable y sus ramales para la generación de los puntos de agarre.

1.4. Marco teórico

Durante el último cuarto del siglo veinte, la creciente implementación de sistemas electrónicos en los vehículos alcanzó un auge con las innovaciones presentadas en esta área. Componentes anteriormente mecánicos o analógicos, como el carburador y distintos sensores, se volvieron electrónicos. Sin embargo, el cambio más significativo se daría a partir del año 2000 con la llegada de los autos eléctricos (EV) a la industria [9].

Adicional a lo antes expuesto, la industria automotriz resulta ser una de las industrias más grandes a nivel mundial. En Ecuador, durante el 2019, se vendieron 27.000 vehículos ensamblados en territorio nacional; es decir, 19.4% de todo el consumo local se produjo en el país en ese año [10]. Los porcentajes de producción nacional por año y los principales países importadores de vehículos a Ecuador se muestran en la Figura 1.1.

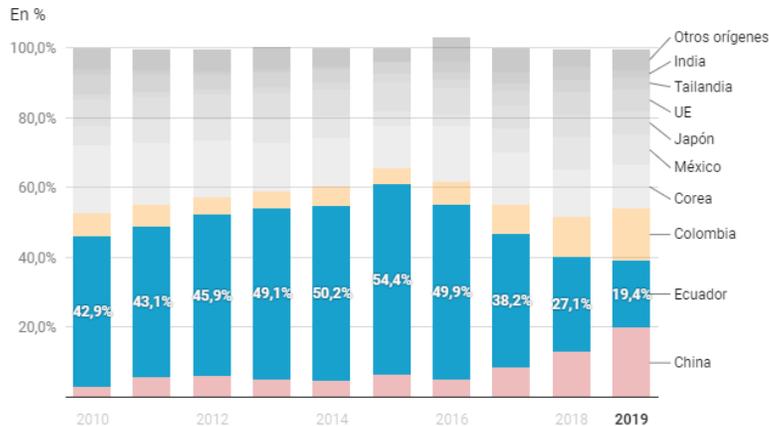


Figura 1.2 Composición del mercado de vehículos en Ecuador [10]

1.3.3 Panorama general de la electrificación vehicular en Ecuador

Actualmente, un auto posee en promedio unos 2 km de cables, en masa se traducen a cerca de 40 kg [11]. Estos se encuentran repartidos a lo largo y ancho de su estructura, a fin de mantener alimentados y comunicados los componentes electrónicos en su interior. Considerando las cifras de producción vehicular del 2019 en Ecuador, alrededor de 1080 toneladas de arneses de cables (como el que se ilustra en la Figura 1.2) fueron instalados y se encuentran en operación.

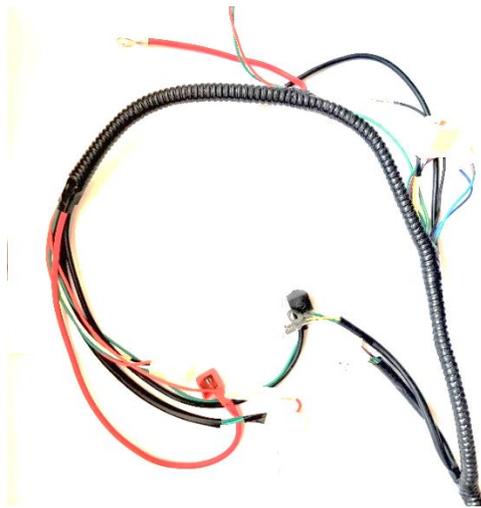


Figura 1.3 Ejemplo de arnés de cables automotrices

Toda esta cantidad de material debe ser manipulada e incorporada al ensamblaje automotriz de forma manual por operadores; en contraste, las otras etapas de fabricación se llevan a cabo por máquinas automatizadas. Esto puede dar una idea de todo el tiempo que desperdicia a causa de un proceso ineficiente [12].

1.3.4 Estructura de un arnés de cables

Un arnés de cables ('wire harness' por su nombre en inglés) constituye una manera efectiva de proteger y juntar múltiples cables en orden. Corresponde a la cubierta exterior que recubre los conductores internos, la cual puede ser elaborada de distintos materiales [13].

Los conductores internos alojados dentro de un arnés de cables poseen, en sus extremos, distintos tipos de conectores y terminales utilizados para transmitir la señal que llevan de un componente eléctrico a otro. Estos, al realizar algunas funciones ante condiciones diversas, varían sus diseños para un amplio rango de aplicaciones. Las formas y dimensiones de estos están diseñadas según el uso para el cual estén destinados [14].

Otro elemento de interés son los terminales, que al igual que los conectores permiten la conducción de energía entre dispositivos. Estos suelen tener forma de pines anchos (macho) o ranuras (hembra) hechos de metal y unidos al cobre del cable. Sus diseños varían según la aplicación y magnitud de corriente que transporten.

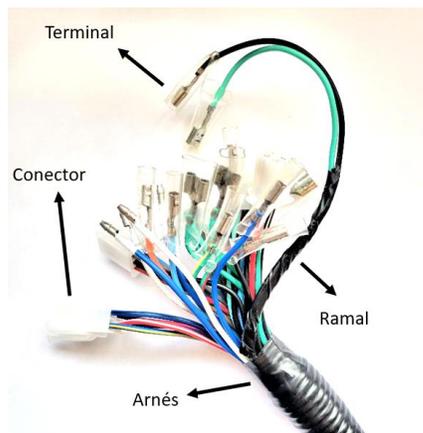


Figura 1.4 Ejemplo de conectores y terminales en un arnés de cables.

Tanto el cuerpo del arnés de cables como sus conectores y terminales son necesarios de identificar correctamente para poder acoplarlos al ensamble de la máquina donde operarán [5].

1.3.5 Brazos robóticos en la industria

La automatización es una de las principales herramientas con la que la industria ha podido dar frente al aumento de la demanda y las masivas expansiones que la era moderna requiere [2]; con la robótica siendo el puente principal entre la potencia del software y la tangibilidad del hardware.

El uso de brazos robóticos para manufactura representa múltiples ventajas, entre las cuales se encuentran: El aumento de eficiencia, la seguridad de los trabajadores, aumento de calidad y reducción de los costos de producción entre otros [15].

A lo largo de los años se han desarrollados distintos modelos de brazos robóticos, que responden a necesidades específicas de procesos particulares. Entre los cuales existen:

- Los robots con programación fija, los cuales son diseñados para desarrollar una única tarea
- Los robots programables, son aquellos que se diseñan con la opción de ser reconfigurados para otras labores
- Los robots flexibles, aquellos usados para trabajar de manera cooperativa dentro de un sistema [16].

La robótica automotriz nace de la necesidad de crear estrategias que permitan armonizar y combinar un conjunto de distintas actividades con el fin de generar productos de alta calidad. A continuación, se detallan los principales modelos de robots usados en la industria automotriz [17].

Scara: Robot de posicionamiento horizontal con cuatro grados de libertad, usado para la distribución de las distintas piezas del vehículo.



Figura 1.5 Robot de tipo SCARA [18]

Robots cíclicos: Son los más usados en la industria por su mayor versatilidad y su alto grado de repetitividad, se usa para ensamblajes de partes pequeñas que requieren una mayor precisión y flexibilidad de orientación.

Cartesianos: Son especialmente usados por su alto grado de precisión gracias a sus ejes, permiten un mayor grado de confiabilidad y una muy alta relación de productividad-precio.

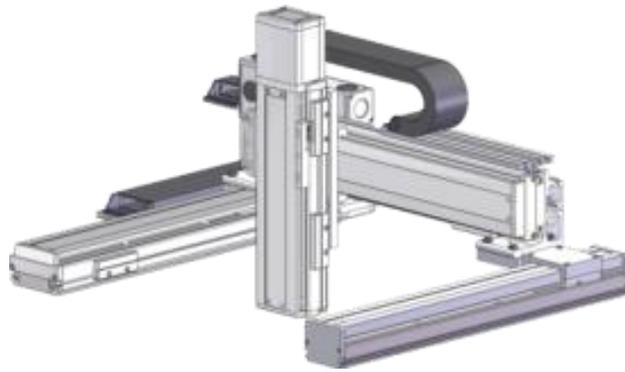


Figura 1.6 Robot de tipo Cartesiano [19]

Robots universales: Este tipo de robot nace de la necesidad de automatizar distintos procesos repetitivos, son por lo general robots de 6 ejes que pueden adaptarse a una variedad de espacios de trabajo, puede poseer una mayor área de trabajo. Este modelo de manipulador ha captado la atención del desarrollo de nuevas tecnologías, ya que su diseño permite la adaptabilidad de nuevas funcionalidades y mejoras continuas.



Figura 1.7 Robot Universal [20]

1.5. Estado actual de la automatización de cableado

El proceso de manufactura para vehículos motorizados compone varias etapas en la que cada una tiene sus características especiales y dificultades específicas del proceso. De manera general se comienza con la generación individual de cada una de las piezas que componen el chasis del vehículo. Posteriormente un ensamble de cada una de estas, usando técnicas como la unión a presión, soldadura, entre otras. A continuación, se procede con la pintura y los acabados del chasis, para finalmente, colocar todos los componentes internos del vehículo.

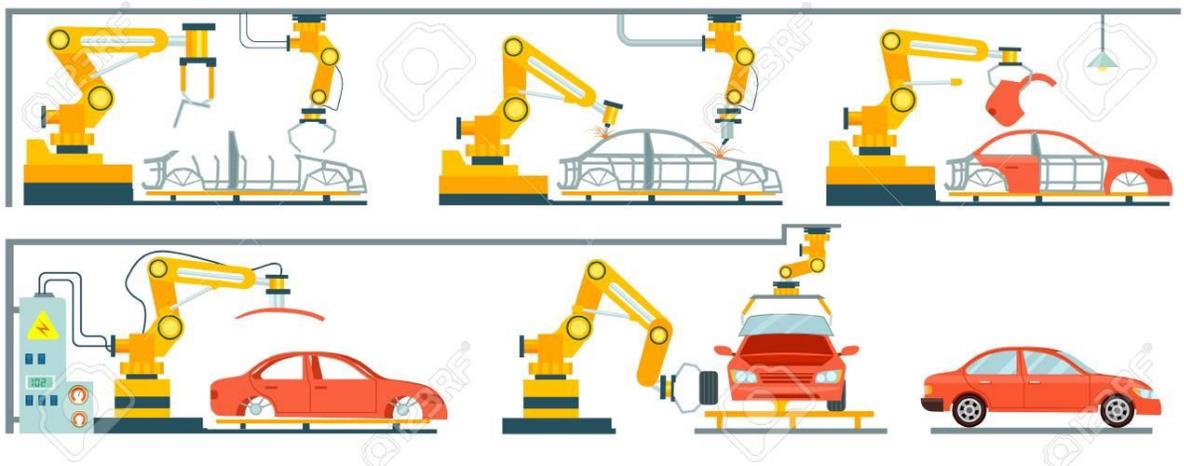


Figura 1.8 Proceso de manufactura de automóviles [21]

De los procesos anteriormente mencionados, un gran porcentaje de la automatización, aproximadamente de 200 o 300 robots, se centra en la producción de las partes metálicas del chasis, gracias a que es uno de los más repetitivos [22].

Los siguientes procesos tal como la soldadura del chasis y la pintura son también altamente automatizados, así mismo tareas secundarias de movilización de piezas entre otras que son fácilmente automatizables por la alta repetitividad de estas.

Las características comunes que estos procesos comparten, es la alta repetitividad y no requieren de mayor análisis individual que el robot deba realizar. Razón por la cual, actividades como la inspección de calidad, conexión de cables en puertos, entre otras, que requieren el uso de la detección de detalles, como el reconocimiento del entorno, detección de formas no lineales entre otras [23], no son completamente automatizadas. De manera comercial no se cuenta con la incorporación de la tecnología suficiente para que sea realizada con la precisión y calidad necesaria en la industria.



Figura 1.9 Robots con visión artificial [23]

1.6. Estado del arte

Al ser una parte tan importante para la manufactura, no solo en la industria automotriz sino en general para el campo comercial de equipos eléctricos, existen trabajos dedicados al análisis y reconocimiento del cableado. Se han realizado investigaciones centradas mayormente en tres herramientas y sus diferentes combinaciones y posibles interacciones, las cuales son: visión artificial, robots manipuladores y aprendizaje automático.

En [24] se realizó una investigación en la cual, mediante el uso de visión por computadora se podía realizar un mejor control de fallas durante la inspección del ensamble de las mayas de cables. En [12] se presentó un trabajo donde se utilizan algoritmos para determinar los ángulos en los que se debe se debe posicionar la pinza del robot para realizar una correcta conexión del cable. El estudio en [25], busca automatizar la desmetilación de electrodomésticos y otros aparatos eléctricos, donde se hace uso de robots para la desconexión del cableado de dichos modelos.

Sin embargo, para los fines de este trabajo se tomará como guía la investigación del trabajo en [5], misma que hace referencia a la detección de los conectores de las mallas de cables para automotores mediante visión por computadora. Así también se usarán las bases del trabajo presentado en [3] el cual presenta la clasificación de los ramales de cables usando algoritmos de aprendizaje automático y visión artificial.

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGÍA

Este capítulo presenta las etapas llevadas a cabo durante el proceso de diseño de la solución a la problemática planteada. Abarca desde la identificación de los requerimientos del sistema y la selección de alternativas, hasta el diseño conceptual y la elección de los parámetros mecánicos y de software establecidos.

2.1. Requerimientos de diseño

Para diseñar un sistema de identificación y manipulación de cables fue necesario establecer ciertas directrices a cumplir, determinadas por parte del cliente. La Tabla 2.1 presenta de forma detallada los requerimientos de diseño.

Tabla 2.1 Requerimientos de diseño

Mecánicos	<ul style="list-style-type: none">• Velocidad mínima de movimiento de la piza a lo largo del cable de 3 cm/s.• Alcance del brazo robótico en un área de trabajo de al menos 1m de distancia desde su centro.
Control	<ul style="list-style-type: none">• Exactitud del robot de ubicarse a no más 10 mm del punto de destino, con repetibilidad de resultados.• Cierre de la pinza mecánica acorde a la sección del cable a manipular.
Informáticos	<ul style="list-style-type: none">• Datos de entrada: Imágenes capturadas a tiempo real.• Uso de aprendizaje automático.• Tiempo de ejecución del software no superior a 30 segundos.

2.2. Selección de la alternativa de solución

Se propusieron tres posibles alternativas para abordar el caso en cuestión: la identificación y manipulación de cables automotrices. Estas se detallan a continuación:

- **Alternativa 1:**

Diseño de una pinza mecánica instalada en un robot de seis grados de libertad, permitiendo que este pueda seguir el contorno del cable y transportarlo a un lugar determinado.

- **Alternativa 2:**

Diseño de una pinza adhesiva instalada en un robot Scara, donde el robot se posicione sobre cualquier parte del cable y la pinza permita elevarlo de la superficie de trabajo.

- **Alternativa 3:**

Diseño de una pinza mecánica instalada en un robot Scara, donde el robot se posicione sobre cualquier parte del cable y la pinza permita transportarlo a una posición determinada.

Estas tres soluciones fueron evaluadas con respecto a varios criterios relevantes para la problemática del proyecto. La Tabla 2.2 muestra la importancia de cada uno ponderada en valores del uno al cinco, donde uno es muy poco y cinco es bastante.

Tabla 2.2 Criterios de selección

Criterio	Ranking	Peso relativo	Porcentaje
Complejidad de control	1	5	32%
Flexibilidad de uso	2	4.2	27%
Precisión	3	3.8	25%
Costo inicial	4	1.5	10%
Estética	5	1	6%
TOTAL		15.5	100%

Una breve definición de cada criterio se presenta a continuación:

- **Complejidad de control:** Dificultad de comandar el sistema por su cantidad de grados de libertad.
- **Flexibilidad de uso:** Posibilidad de realizar diferentes maniobras con el arnés de cables una vez agarrado.
- **Precisión:** Cercanía de la posición de la pinza con la posición real de los puntos de agarre.
- **Costo inicial:** Valor monetario de las partes que se necesitarían para la posible construcción de la solución.
- **Estética:** Atractivo visual de la solución.

Según el análisis realizado en base a estos criterios, la alternativa 1 resultó ser la más adecuada para la tarea. Un robot de seis grados de libertad con pinza mecánica mantiene un equilibrio correcto entre su precisión y la complejidad para ser controlado. A su vez, este tipo de sistemas logran una flexibilidad de uso (destreza) para ubicarse en puntos dentro del plano de trabajo desde distintos ángulos y posiciones de la pinza, lo cual es crucial; mientras mantienen un costo

inicial aceptable y un aspecto visual atractivo. La tabla 2 presenta los resultados de esta evaluación.

Tabla 2.3 Matriz de decisión

Criterios	Costo inicial	Flexibilidad de uso	Precisión	Estética	Complejidad de control	TOTAL
Peso	1.5	4.2	3.8	1	5	15.5
Alternativa 1	6	10	8	7	7	8.0
Alternativa 2	8	3	8	5	10	7.1
Alternativa 3	8	5	8	5	10	7.6

2.3. Proceso de diseño

Para representar el proceso de diseño de la solución a la necesidad del cliente y demostrar cómo se cumplieron los requerimientos establecidos, se dividió el procedimiento en etapas consecutivas descritas en la Figura 2.1.

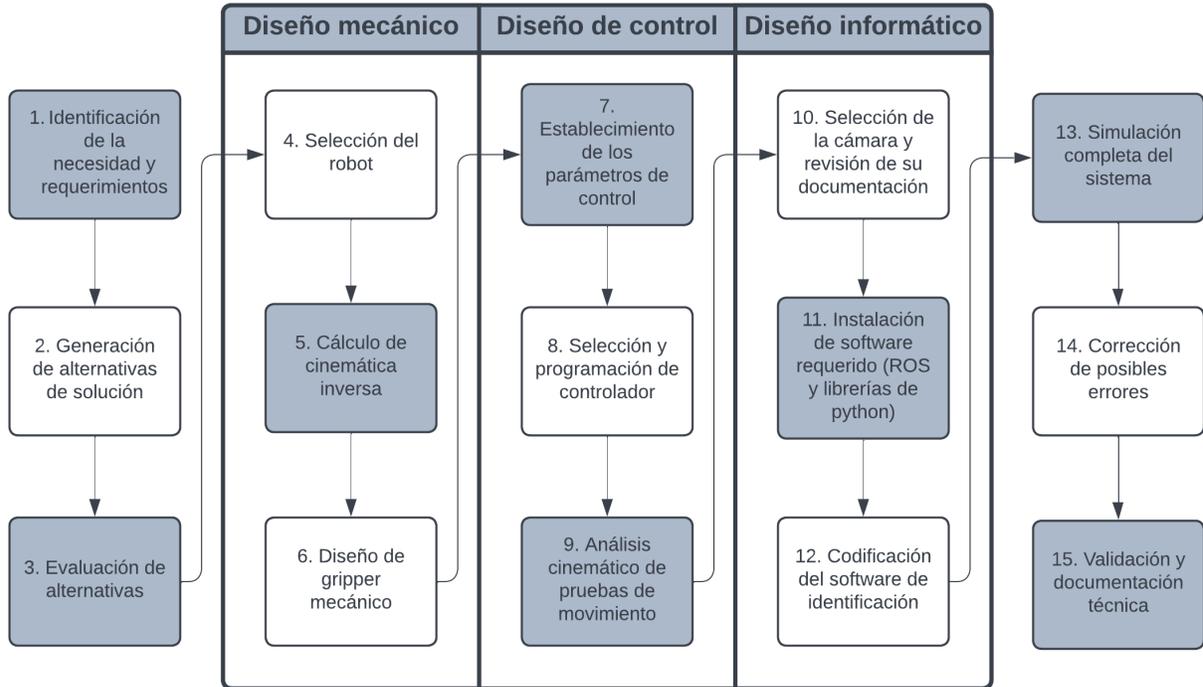


Figura 2.1 Metodología de diseño

2.4. Diseño conceptual

La Figura 2.2 ilustra una representación de la solución planteada a manera de boceto. Los elementos principales de la misma se encuentran identificados, siendo estos la cámara, el robot manipulador, la pinza mecánica y el arnés de cables.

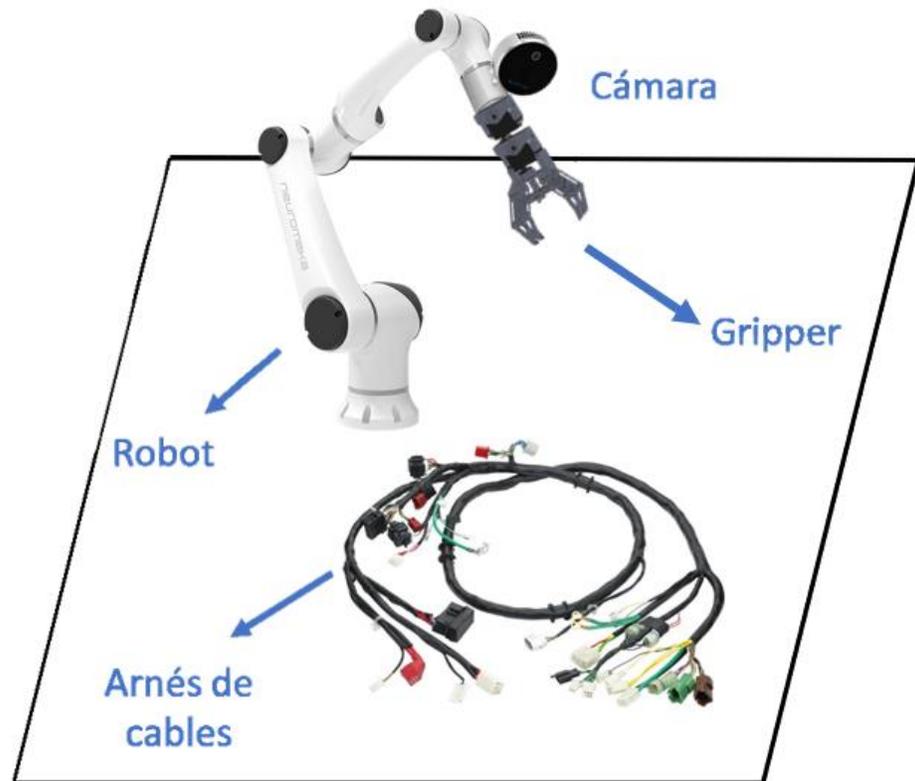


Figura 2.2 Diseño conceptual

Con el objetivo de realizar un diseño correctamente enfocado en su área de aplicación, se consideró que el sistema estaría destinado a un sistema de producción industrial. Partiendo de esta premisa, se pueden establecer requerimientos de diseño inicial, juntos con los del cliente, sirven de guía para direccionar mejor la selección de componentes específicos que se utilizarán. Estos requerimientos adicionales son: capacidad de reconocimiento de cables en tiempos inferiores a 10 segundos y alcance del manipulador en un área de trabajo de mínimo 1.5 metros cuadrados sobre una mesa.

A continuación, se delimitaron las dimensiones de los arneses de cables a los cuales se les realizará el reconocimiento. Estos corresponden a cables de motos con promedios de longitud y anchura enlistados en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4 Dimensiones y masa promedio de un arnés de cables

Masa [g]	280
Longitud [cm]	120
Ancho [cm]	1.2

2.5. Parámetros de diseño mecánico

A fin de garantizar el cumplimiento de los requerimientos mecánicos del robot, se realizaron distintas simulaciones, utilizando inicialmente un modelo básico, respetando las dimensiones de los modelos comerciales.

2.5.1. Cálculo de la cinemática

De las imágenes capturadas por la cámara y el algoritmo de procesamiento, se obtiene como resultado los puntos que forman el cable. Al convertir estos pixeles en coordenadas dentro del espacio de trabajo, se obtiene la trayectoria deseada para la pinza del manipulador.

Esto permite que sea posible realizar un análisis de cinemática inversa, con la finalidad de obtener las coordenadas de cada una de las articulaciones del robot.

Partiendo de las coordenadas conocidas por el extremo del robot (p_x, p_y, p_z) se realiza un diagrama de los respectivos eslabones y articulaciones

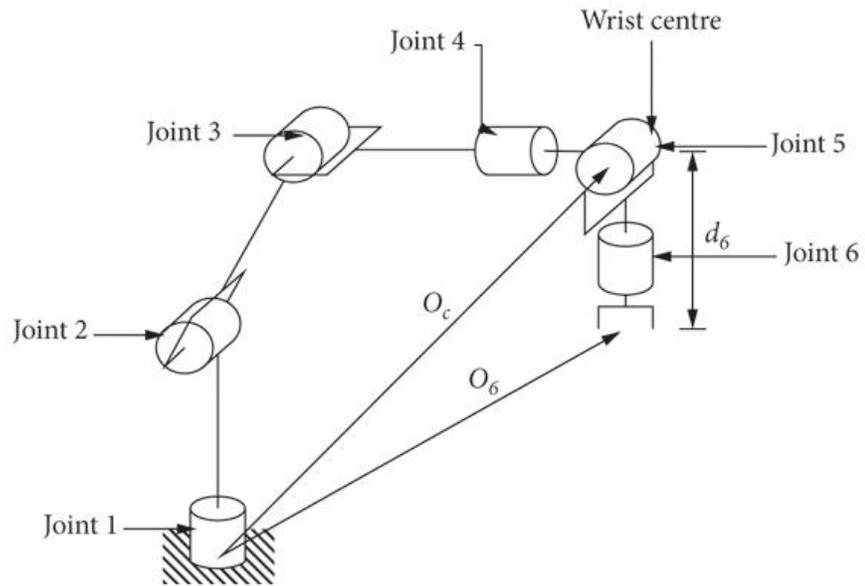


Figura 2.3 Diagrama de análisis cinemático [26]

Definiendo la longitud del eslabón final como d_6 y los ángulos de la base hasta este O_c se calcula cada uno de los ángulos internos y externos entre los eslabones empezando por los ángulos de las tres articulaciones finales.

Usando las posiciones iniciales y la matriz de Rotación respectiva se obtienen las ecuaciones 2.2 y 2.3:

$$o_c^0 = o_6^0 - d_6 R_6^0 \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

$$R_6^3 = [R_3^0]^T R_6^0 \beta \quad (2.2)$$

$$R_6^3 = \begin{bmatrix} c_4 c_5 c_6 - s_4 s_6 & -c_4 c_5 c_6 - s_1 c_3 & c_4 c_5 \\ s_4 c_5 c_6 + c_4 c_6 & -s_4 c_5 c_6 + c_1 c_3 & s_4 s_5 \\ -s_5 c_6 & s_5 c_6 & c_5 \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

$$R_6^3 = \begin{bmatrix} q_{11} & q_{12} & q_{13} \\ q_{21} & q_{22} & q_{32} \\ q_{31} & q_{23} & q_{33} \end{bmatrix}$$

A continuación, se obtienen los ángulos de las articulaciones 4, 5 y 6

$$\theta_4 = \text{atan2}(q_{23}, q_{13})$$

$$\theta_5 = \text{atan2}\left(\sqrt{q_{13}^2 + q_{23}^2}, q_{33}\right)$$

$$\theta_6 = \text{atan2}(-q_{32}, q_{31})$$

Una vez obtenido estos ángulos se usa la siguiente ecuación

$$o_c^0 = \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

$$o = \begin{bmatrix} o_x \\ o_y \\ o_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} o_x - d_6 r_{13} \\ o_y - d_6 r_{23} \\ o_z - d_6 r_{33} \end{bmatrix}$$

$$\theta_2 = h1 - h2 = \text{atan2}\left(\sqrt{x_c^2 + y_c^2}, z_c - d_1\right) - \text{atan2}(a_2 + a_3 \cos \theta_3, a_3 \sin \theta_3) \quad (2.5)$$

$$\cos\theta_3 = \frac{x_c^2 + y_c^2 + (z_c + d_1)^2 - a_2^2 - a_3^2}{2a_2a_3} \quad (2.6)$$

$$\sin\theta_3 = \sqrt{1 - \cos\theta_3^2} \quad \tan\theta_3 = \sqrt{\frac{1 - \cos\theta_3^2}{\cos\theta_3}} \quad (2.7)$$

Finalmente, se obtienen los ángulos de las articulaciones 1, 2 y 3

$$\theta_1 = \text{atan2}(x_c, y_c)$$

$$\theta_2 = -\text{atan2}\left(\sqrt{x_c^2 + y_c^2}, z_c + d_1\right)$$

$$\theta_3 = \text{atan2}\left(D, \pm\sqrt{1 - D^2}\right)$$

2.5.2. Diseño de la pinza

El objetivo de la pinza es sostener y trasladar al cable de una posición inicial a una posición final, esto tanto para el ramal principal como para cada uno de sus terminales. Por esta razón se decidió que el diseño de esta debe ser el de una pinza mecánica, como se muestra en la Figura 2.4 este tipo de pinzas poseen forma de garra, lo cual les permite hacer presión sobre el objeto para su posterior manipulación.



Figura 2.4 Pinza de tipo mecánica

Para el diseño de la pinza se concibió una forma de dos mandíbulas, debido a que los cables no presentan mayor carga o complejidad geométrica.

2.5.3. Sistema de sujeción

Para la pinza mecánica se observan dos tipos de desplazamiento para la sujeción del objetivo:

- **Desplazamiento angular:** Donde ambos extremos de la pinza poseen un punto fijo común, sobre el cual pivotean hasta llegar a su punto de destino.



Figura 2.5 Pinza mecánica con desplazamiento angular

- **Desplazamiento Lineal:** Ambos extremos de la pinza realizan el movimiento de apertura y cierre mediante un desplazamiento paralelo entre ellas.

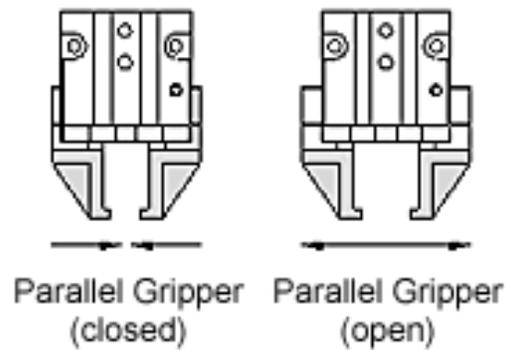


Figura 2.6 Pinza mecánica con desplazamiento lineal

En función del objetivo planteado, se tomó un desplazamiento angular, ya que estas pueden ser accionadas de manera electromecánica mientras que para

las de desplazamiento lineal por lo general son accionadas de forma neumática y son usadas cuando se requieren mayores fuerzas de sujeción.

2.5.4. Cálculo de la fuerza de la pinza

Como se mencionó anteriormente, el accionamiento requerido para la pinza es eléctrico, por ello es fundamental saber un estimado de la fuerza requerida para la sujeción del cable, con la finalidad de tener una guía para la selección del tipo de motor que se va a utilizar. Para ello se utiliza una generalización del cálculo dada por Esha Chakraborty [27].

$$F = \frac{m * (a + g)}{\mu * n} \quad (2.8)$$

Donde la fuerza es calculada mediante la masa del objeto (m) y la aceleración (a) por el coeficiente de fricción (μ) y el número de dedos de la pinza (n).

2.5.5. Determinación de la carga puntual

Existen varios tipos de carga puntual a los que se hace referencia durante la sujeción de un objeto. Para fines de análisis en este trabajo, fue tomado un diferencial del cable el cual se trató como un objeto rígido, los distintos tipos de carga se muestran la Figura 2.7.

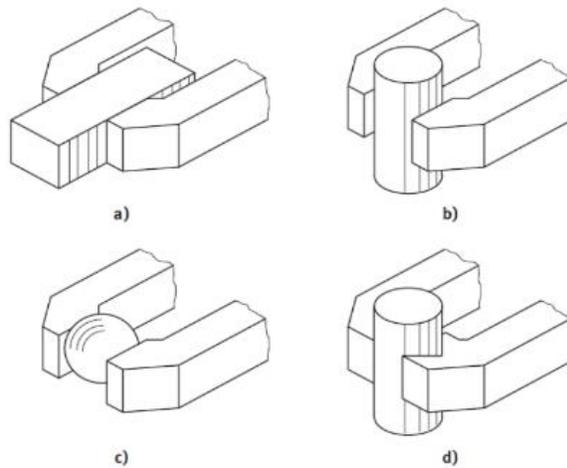


Figura 2.7 Tipos de carga puntual debido a la sujeción [28]

Bajo este precepto se determina que la pinza posee una superficie de agarre con la carga la cual puede ser línea/superficie o doble línea/superficie la elección de uno de estos dos depende de la fuerza de fricción entre la pinza y la carga y como esta se puede repartir en los extremos de la pinza.

2.5.6. Sujeción Interna

La sujeción interna de la pinza es un factor clave a la hora de determinar el diseño óptimo de esta para un objeto específico, para ello se toma en cuenta el tipo de material sobre el cual va a actuar la pinza y cuál es el que presenta una mejor fricción para asegurar la sujeción al mismo. En la Tabla 2.5 se listan los distintos tipos de sujeción interna.

Tabla 2.5 Tipos de Superficies y materiales para la sujeción interna [28]

Superficie	Lisa
	Rugosa
	Porosa
	Sensible
Material	Plástico
	Textiles
	Láminas
	Cerámica

Para el trabajo actual la superficie de los cables es de plástico, como se muestra en la Figura 2.8, para determinar el mejor material para la sujeción interna se realizaron las siguientes pruebas de concepto.



Figura 2.8 Superficie del cable de trabajo – Elaboración propia

2.6. Parámetros de control

2.6.1. Control de trayectoria

Para asegurar que el robot siga las trayectorias indicadas, se usaron los controladores de la plataforma de ROS. Estos algoritmos interactúan con el hardware sea real o simulado, realiza un continuo monitoreo de los distintos estados en los que se encuentra el robot a lo largo de la ejecución del movimiento y cuando se encuentra en reposo poniendo así a disposición la información necesaria para tomar las acciones pertinentes. Este software es específico para el modelo de robot que se va a utilizar. Entre los paquetes proporcionados por el controlador de ROS se encuentran:

- Un controlador para el manipulador que permite obtener la condición de este y enviar esta información al sistema en forma de mensajes
- Un nodo que monitorea continuamente el robot para conocer los estados del sistema, este realiza un análisis y envía la información mediante mensajes de ROS
- Un servicio que ejerce una acción recíproca discreta con los controladores del robot, tales como iniciar y detener el programa.
- Un paquete de hardware que utiliza una interfaz de movimiento guiado externo
- Un controlador que se detienen automáticamente cuando finaliza la sesión de comunicación de la interfaz de movimiento externo

Cada uno de estos paquetes de software se encuentran disponibles ya sea por el proveedor del robot como en el caso del modelo Neuromeka o por el repositorio propio de la herramienta en el caso del modelo ABB.

2.6.2. Control de la pinza

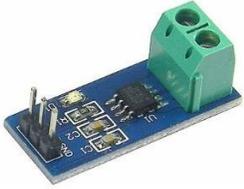
Para determinar el cierre correcto de la pinza, se pueden tener en cuenta una serie de mecanismos de control los cuales varían en complejidad y precisión dependiendo de lo requerido.

Entre las opciones se encuentra el control mediante sensores de presión, control mediante el consumo de corriente del motor a medida que la pinza se cierra sobre el cable y por último control de posición del motor para determinar los grados de cierre máximo de la pinza.

Para esta aplicación se determinó que la opción de control más adecuada es un control de monitoreo de consumo de corriente. En la Tabla 2.6 se muestran los componentes eléctricos que se utilizaron para el circuito de control.

Se determinó esa opción debido a que no se requiere un control exacto de la presión a ejercer sobre los cables, puesto que estos debido al material del que están formados no sufrirán ningún tipo de daño estructural al someterse a las presiones máximas que puede ofrecer el mecanismo, además de que esta opción no requiere de mayores cambios estructurales sobre la pinza o un circuito más elaborado. En el Apéndice D se presenta un análisis más profundo de las opciones aquí mencionadas.

Tabla 2.6: Componentes eléctricos usados

Elemento	Modelo	Imagen	Función
Controlador	Arduino nano		Recibir la medición de corriente del sensor y enviar la señal de paro para el motor
Sensor	ACS712		Leer la corriente consumida por el motor y enviar la información al controlador
Relé	1 channel 5V/12V/24V relay		Recibir la señal del controlador y desconectar el circuito de potencia para parar el motor

2.7. Parámetros de diseño informático

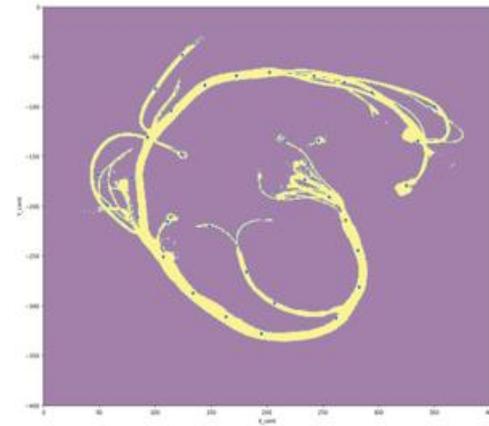
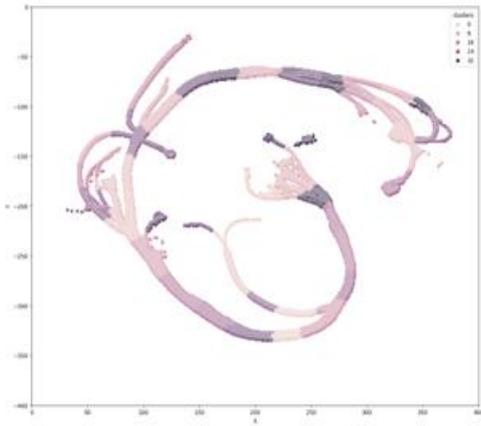
Esta sección corresponde a la selección de componentes de software que conforman el sistema de identificación. Los parámetros clave considerados en este apartado son el tiempo de respuesta del programa, la exactitud en la detección de los puntos de agarre de los cables y el costo computacional demandado para la tarea.

2.7.1. Selección de algoritmo de reconocimiento

Cuando se trabaja con imágenes de cualquier tipo, existen algunas alternativas que se pueden explorar en cuanto a algoritmos se refiere. Para el propósito del proyecto en específico, la tarea de identificación y generación de puntos de agarre en un arnés de cables no requiere de modelos demasiado robustos dadas las condiciones en donde esto se va a llevar a cabo: cables de color negro ubicados sobre una superficie blanca. El contraste de colores que esto supone brinda por defecto una ventaja a la hora de procesar las imágenes capturadas con la cámara, por lo que la selección de alternativas para el algoritmo de aprendizaje automático a utilizar se limitará a dos tipos: redes neuronales convolucionales (aprendizaje supervisado) o agrupamiento (*'clustering'* en inglés, aprendizaje no supervisado). Un ejemplo de ambas técnicas se ilustra en la Figura 2.9.



a)



b)

Figura 2.9 a) Reconocimiento con redes neuronales (reducción de calidad de la imagen) y b) Reconocimiento utilizando clustering (agrupación de píxeles de la imagen para generar secciones del mismo).

La Tabla 2.7 presenta a continuación una comparación de las dos alternativas considerando los parámetros establecidos anteriormente.

Tabla 2.7 Evaluación de alternativas de algoritmos

	Redes neuronales	Agrupamiento
Velocidad de respuesta	Alta	Media
Demanda computacional de recursos (procesador, tarjeta gráfica y memoria RAM)	Alta	Baja
Exactitud de los resultados	Media	Alta
Flexibilidad para implementarse con otros tipos de cables	Media	Alta

Como resultado, se tiene que utilizar algoritmos de agrupamiento resulta en una mejor decisión con respecto a la otra opción. Si bien esta última presenta una velocidad de respuesta más rápida (actuando a tiempo real), las ventajas en los otros apartados están más presentes en el método de aprendizaje no supervisado.

2.7.2. Selección de la cámara

Si bien la cámara a utilizar corresponde a un elemento de hardware, resulta de mucha importancia para el aspecto informático a la vez. Especificaciones como su resolución y capacidad de detección de profundidad son necesarias de considerar al desarrollar el código de programación. En relación con esto, el cliente suministró y sugirió el uso de una cámara en particular, una Intel RealSense L515. Este modelo está diseñado para aplicaciones de robótica y visión por computadora, contando además con sus respectivas librerías de Python para su correcta implementación en el apartado de software. La Tabla 2.8 a continuación describe sus características más relevantes.

Tabla 2.8 Características de la cámara seleccionada



The image shows the Intel RealSense LiDAR Camera L515. On the left is the camera unit, a circular black device with a silver ring around the top edge and the RealSense logo at the bottom. To its right is the product box, which is black with the Intel logo at the top left, the RealSense logo in the center, and 'LIDAR CAMERA L515' written below it. The box also features a blue and purple light effect.

Modelo	RealSense LiDAR Camera L515
Marca	Intel
Resolución	1024 x 768
Tipos de imagen	RGB (imagen a color) y Depth (profundidad)
Rango de detección	0.25 m a 9 m
Tecnología	Escaneo laser

CAPÍTULO 3

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En este capítulo se presenta el análisis de rendimiento del sistema de identificación y manipulación de cables automotrices, conformado por un brazo robótico simulado en un entorno virtual y una cámara de reconocimiento física. Se iniciará con la descripción y presentación de resultados del algoritmo de aprendizaje automático, seguido del análisis mecánico del movimiento y el agarre de cables por parte de la pinza diseñada. Finalmente, se dará a conocer el sistema completo simulado en ROS y, como punto final, el análisis de costos que involucraría el desarrollo del proyecto.

3.1. Algoritmo de reconocimiento

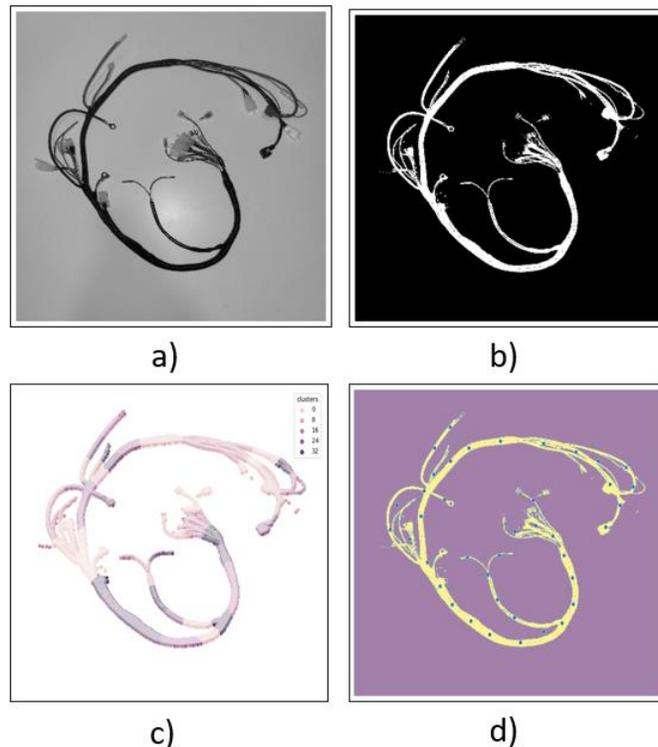


Figura 3.1 Etapas del proceso de reconocimiento de cables con Python y aprendizaje automático.

La Figura 3.1 presenta el proceso de reconocimiento del cable por medio del software. Consiste en cuatro etapas: captura de la imagen por parte de la cámara (a), segmentación del cable eliminando la mesa de trabajo de fondo (b), aplicación del modelo de ‘*clustering*’ aglomerativo para el seccionamiento del cable (c), y obtención de centroides de cada grupo como puntos de agarre para el robot (d).

El código de programación para desarrollar el algoritmo fue escrito en Python, utilizando librerías como “realsense2” para la configuración de la cámara Intel, “Scikit-learn” en lo que tuvo que ver con el modelo de aprendizaje automático, y “pandas” para la manipulación de los datos obtenidos (píxeles) a partir de cada imagen capturada.

3.1.1. Funcionamiento y pruebas del modelo

Una vez realizada la configuración de la cámara y el preprocesamiento de las imágenes capturadas, como se detalla en el apéndice C, se realizaron pruebas con cables en distintas configuraciones para comprobar la efectividad del modelo de aprendizaje automático. Algunos ejemplos de esto se muestran en la Figura 3.2.

Como se puede observar, los puntos obtenidos no fueron perfectos en cuanto a su ubicación dentro del cuerpo del cable, sin embargo, de forma general este efecto se considera aceptable dada la velocidad de respuesta del software (9 segundos en promedio) y la ventaja de poder funcionar bajo cualquier disposición en la que se encuentre el cable.



Figura 3.2 Pruebas del modelo con cables en varias posiciones. A la izquierda la imagen original, a la derecha el resultado.

En adición, se comprobó mediante experimentación que conforme se incrementaron el número de puntos de agarre que calcular con el agrupamiento, mayor fue el tiempo de ejecución del software. Por motivos prácticos, las imágenes del cable usadas en las pruebas no se capturaron en vivo, en su lugar se utilizaron fotos almacenadas en el ordenador. Esto redujo el tiempo de ejecución del programa con respecto al que se tendría en la práctica, al no incluir en el código el apartado de configuración de la cámara. La Figura 3.3 muestra una gráfica con los resultados de los experimentos, llevados a cabo en un ordenador con un procesador Intel Core i5-11600K (factor que también influye en los resultados).

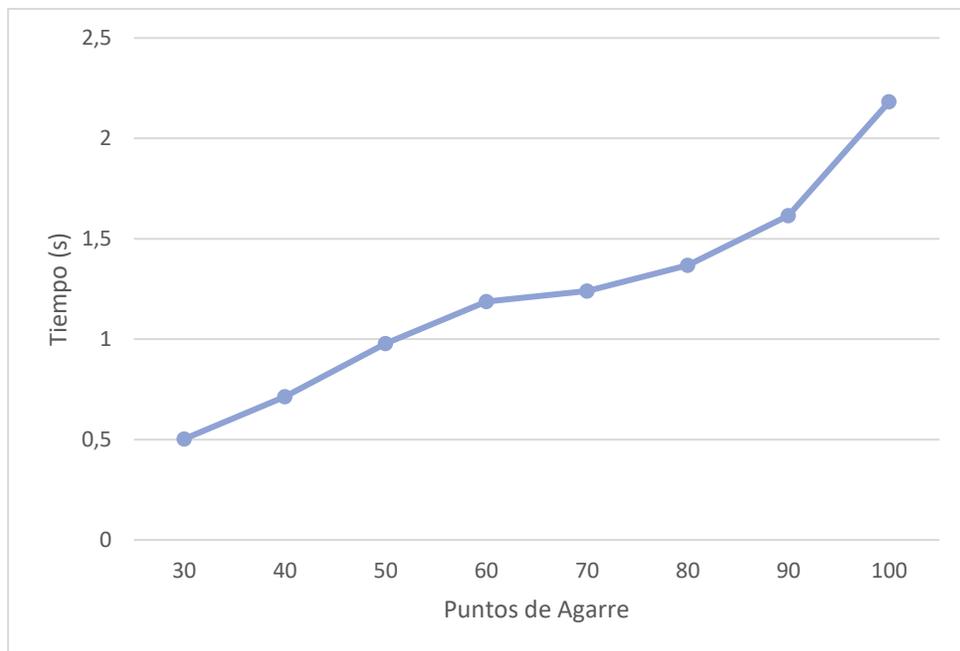


Figura 3.3 Gráfica de puntos de agarre calculados versus tiempo de ejecución del programa

3.2. Diseño de pinza mecánica

Para el diseño de la pinza, se tomó como concepto base el sistema de sujeción angular descrito en el capítulo anterior. Con el objetivo que este modelo se adapte lo mejor posible al caso particular de los cables automotrices, se realizaron varios diseños de agarraderas, para determinar cuál posee la mejor fijación con el mecanismo de accionamiento electromecánico establecido.



Figura 3.4 Diseño del prototipo inicial de la pinza

Teniendo los aspectos de diseño y mecánica pertinentes se realizaron pruebas de concepto con tres distintos tipos de agarraderas con la finalidad de determinar el diseño que brinde el mejor agarre para los cables.



Figura 3.5 Prototipo 3D de la pinza, agarre cóncavo



Figura 3.6 Prototipo 3D de la pinza, agarre dentado



Figura 3.7 Prototipo 3D de la pinza, agarre plano

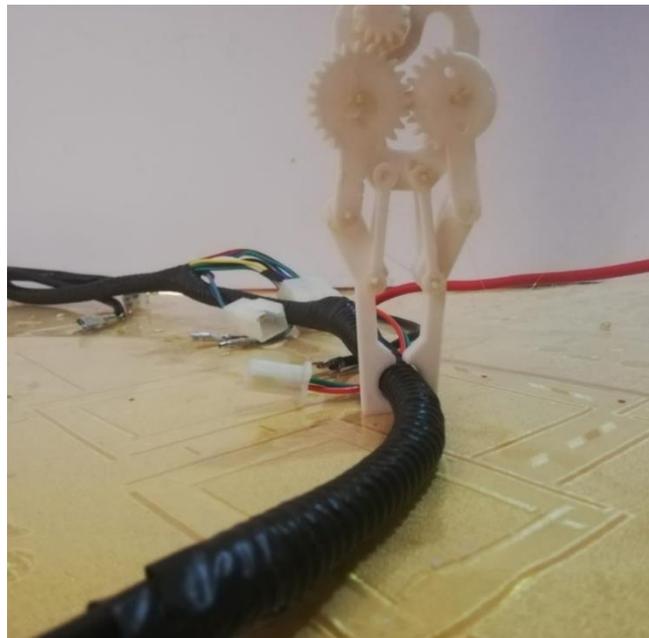


Figura 3.8 Prueba del prototipo sobre el cable

3.2.1. Sistema de control de cierre

Para controlar el cierre de la pinza, una vez que este agarre el cable del área de trabajo, se procede a implementar un circuito de control aplicado al motor, el cual realiza una medición de la continua de la corriente que consume este mediante el sensor ACS712 mismo que envía esta información a un Arduino nano con el fin de verificar que, una vez que la corriente alcance un umbral establecido, el Arduino envíe una señal a un relé conectado al motor, el cual lo desconectará deteniendo así el cierre de la pinza.

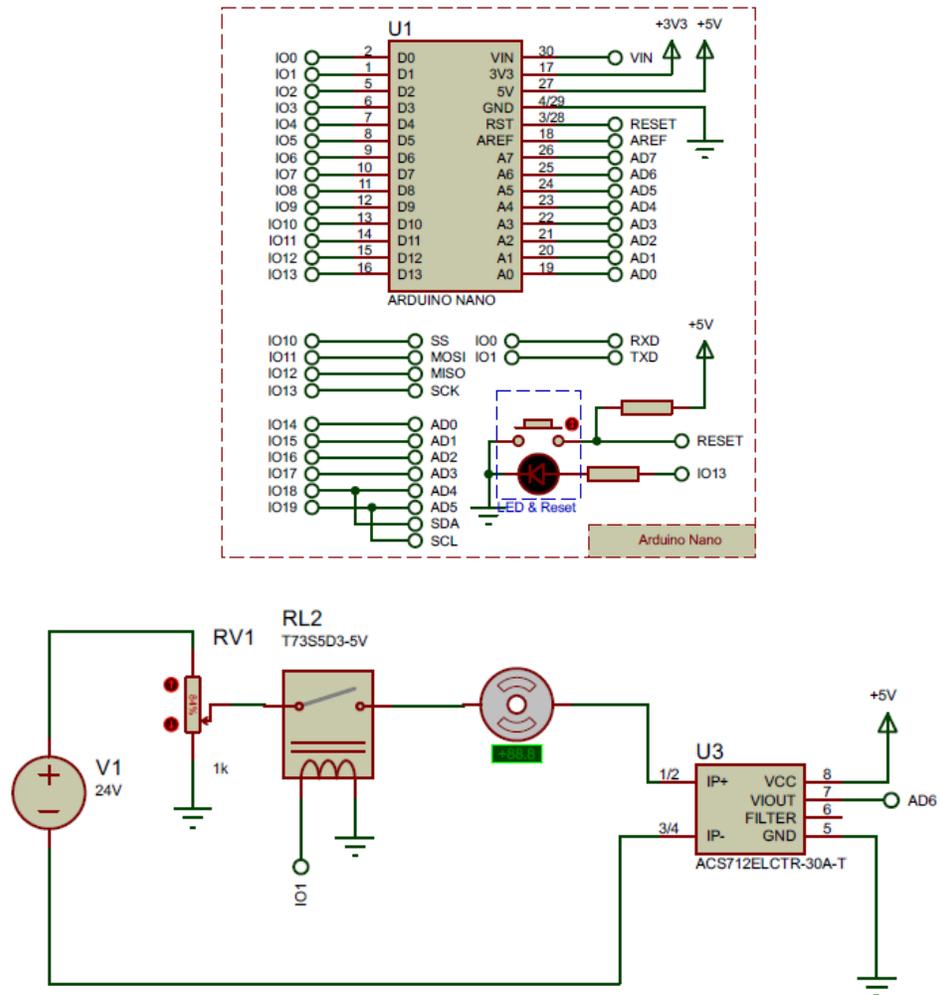


Figura 3.9 Plano eléctrico del circuito de control para el cierre de la pinza

Como se muestra en la Figura 3.9 se utilizó un potenciómetro para simular el incremento de la carga sobre el motor a medida que este hace que la pinza ejerza presión sobre el cable.

3.3. Sistema completo

3.3.1. Simulación en ROS

Como parte de implementación del algoritmo presentado anteriormente se realizó una simulación en el software ROS el cual permite mostrar un modelo virtual del robot utilizado y programar los respectivos movimientos que este vaya a realizar en un ambiente controlado.

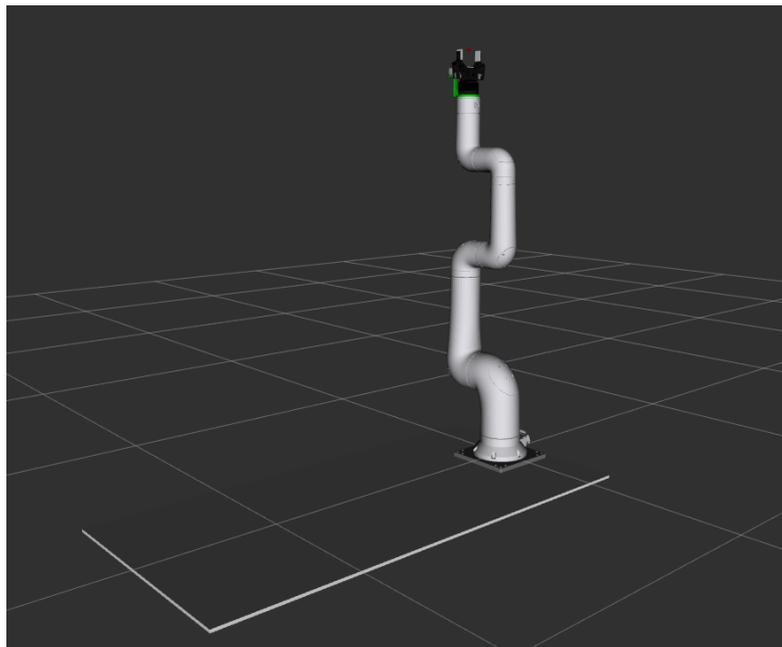


Figura 3.10 Robot simulado en el espacio de trabajo

En la Figura 3.10 se observa el robot colocado sobre una mesa guía la cual sirve de referencia para el posicionamiento del cable y como sistema de referencia para enviar las coordenadas al robot. Usando el asistente de movimiento Moveit se determinaron dos grupos de control de movimiento, el primero para el cuerpo del robot y el segundo para la apertura y cierre de la pinza.

De igual forma se configura dentro de ros, el software de la cámara, el cual posee un nodo nativo para este software y debe ser agregado dentro del mismo espacio de trabajo, para poder apreciar si el movimiento del robot es correcto.

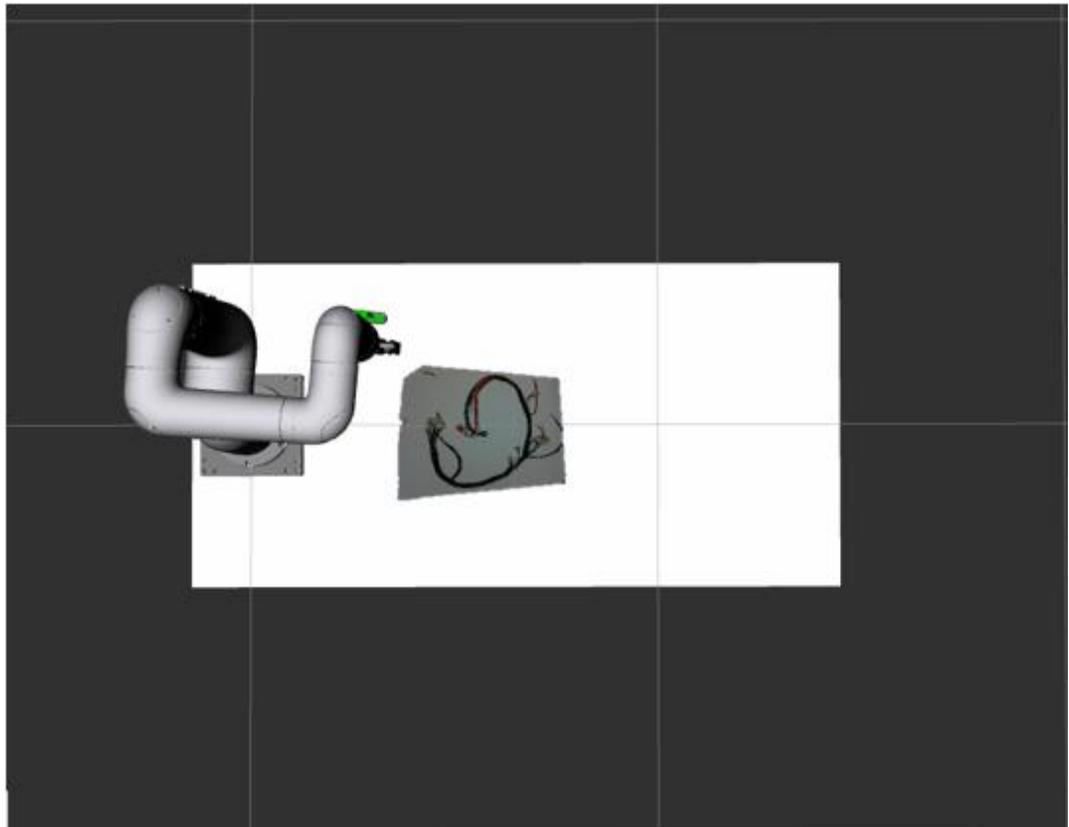


Figura 3.11 Espacio del trabajo del robot y visualización real de la cámara

Como se muestran en la Figura 3.11 la imagen captada por la cámara, la cual es obtenida en formato de profundidad, es decir, lo mostrado en la simulación es una serie de puntos en un espacio tridimensional combinado con la imagen RGB ambas obtenidas de la misma cámara en tiempo real. Una vez el algoritmo capte la imagen del cable y sea procesada y convertida en puntos, el robot procederá a seguirlos dibujando la silueta del cable tanto en su ramal principal como en cada uno de sus terminales.

3.3.2. Pruebas en robot real

Como parte adicional a las simulaciones realizadas en ROS, se tuvo acceso a un brazo robótico industrial ABB-2600 ubicado en el Laboratorio de Mecatrónica de la facultad, con la finalidad de ejecutar pruebas en el mismo y comprobar la adaptabilidad del sistema al ser acoplado a un robot distinto. La Figura 3.12 muestra la disposición de los equipos en el entorno de trabajo del laboratorio, con el cable colocado sobre una mesa con fondo blanco y la cámara acoplada al robot junto con un puntero laser mediante una pieza de acople impresa en 3D.



Figura 3.12 Entorno de trabajo con el robot ABB en el laboratorio

Las pruebas realizadas fueron semejantes a las simulaciones con el robot Neuromeka, primero se posicionó la cámara en una posición central al plano de trabajo para tomar la captura del cable. Seguido se ejecutó el software de reconocimiento y generación de puntos, para culminar con el brazo moviéndose a cada uno de estos de forma que el puntero laser se posicionó en cada ubicación del cable y sus ramales. La Figura 3.13 presenta cuatro posiciones distintas del robot durante una prueba de funcionamiento del sistema, con el láser (no visible en las fotos) apuntando en los puntos de agarre calculados por el algoritmo de reconocimiento.

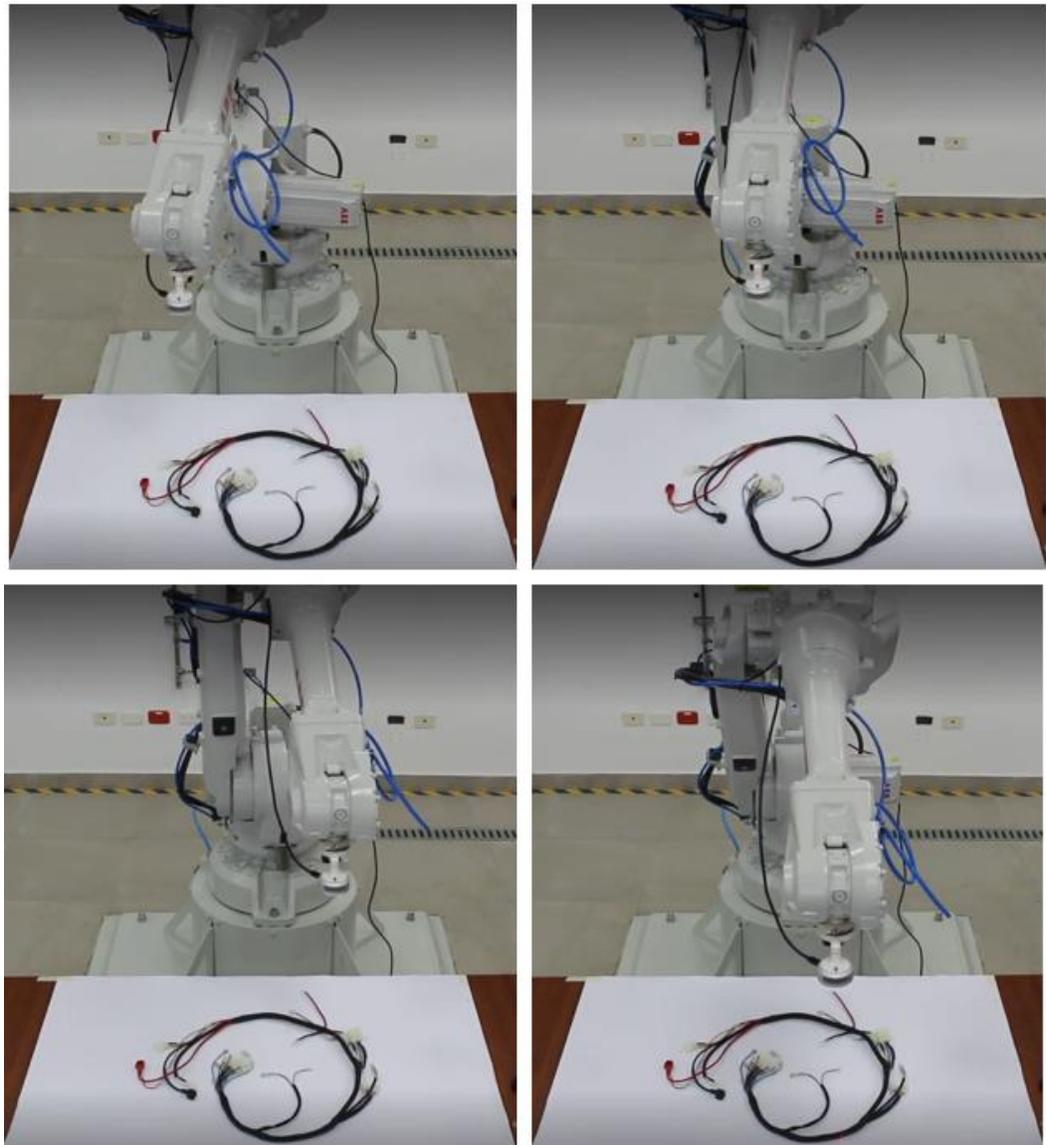


Figura 3.13 Posicionamiento del robot en distintos puntos del cable

3.4. Análisis de costos

Existen varios rubros considerados como parte de los costos necesarios para el desarrollo del presente proyecto. Estos se clasifican de acuerdo con el aspecto del sistema al que pertenecen, incluyendo también una sección de gastos varios relacionados a la mano de obra, impuestos, entre otros. La Tabla 3.1 presenta los componentes esenciales para la implementación del sistema en cualquier proceso de ensamblaje que ya cuente con robots colaborativos, necesitando únicamente de integrar los componentes nuevos a los ya existentes y de instalar el software de reconocimiento.

Tabla 3.1 Listado y cotización de rubros esenciales

Aspecto	Descripción	Cantidad	Unidad	Precio c/u (USD)	Total (USD)
Mecánico	Fabricación de pinza mecánica	1	U	\$ 400.00	\$ 400.00
	Servomotor	1	U	\$ 100.00	\$ 100.00
Informático	Cámara Intel RealSense L515	1	U	\$ 700.00	\$ 700.00
Otros	Mano de obra de diseño	1	GLB	\$ 2000.00	\$ 2000.00
	Instalación y puesta en funcionamiento	1	GLB	\$ 1000.00	\$ 1000.00
	Transporte de equipos importados	1	GLB	\$ 150.00	\$ 150.00
	Impuestos	1	GLB	\$ 100.00	\$ 100.00

Cabe mencionar que los costos detallados incluyen cierto grado de variación entre distribuidores de los productos. La cámara Intel, por ejemplo, cuenta con un precio en las tiendas oficiales de \$589.00, sin embargo, encontrarla en estas es muy poco probable y se requiere de acudir a distribuidoras terceras que incluyen el valor de los impuestos y un porcentaje extra de margen de ganancia para ellos, haciendo que su coste real se eleve a unos \$800.00 en estimado. Adicional, en el tema de

la fabricación de la pinza mecánica los costos pueden variar según el equipo de manufactura con el que se elaboren sus piezas, en este caso se consideraron impresiones 3D realizadas en plástico ABS al ser una alternativa económica que cumple con lo que se requiere.

Otra opción también se presenta para aquellas entidades en cuyas fábricas de ensamblaje vehicular no se encuentre disponible un brazo robótico para la tarea del cableado. Esta consiste en la adquisición adicional del sistema robótico y su controlador, cuyos costos se especifican en la Tabla 3.2 a continuación.

Tabla 3.2 Cotización del brazo robótico adicional a los componentes esenciales

Aspecto	Descripción	Cantidad	Unidad	Precio c/u (USD)	Total (USD)
Mecánico	Robot Neuromeka Indy7	1	U	\$ 20000.00	\$ 20000.00
	Fuente de alimentación IndyCB	1	U	\$ 5000.00	\$ 5000.00
Otros	Instalación y puesta en funcionamiento	1	GLB	\$ 2000.00	\$ 2000.00
	Transporte de equipos importados	1	GLB	\$ 1500.00	\$ 1500.00
	Impuestos	1	GLB	\$ 3500.00	\$ 3500.00

En este último caso, los costos de instalación, transporte e impuestos se actualizan a los valores presentados en la tabla, pues se contaría con equipos adicionales que demandarían de más personal y de mayor capacidad de carga para su importe al Ecuador.

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones

La propuesta de solución a la problemática del presente proyecto se diseñó tomando en consideración los requerimientos establecidos por el cliente, obteniendo un software capaz de calcular puntos de agarre de un arnés de cables mediante aprendizaje automático, y un sistema de visión por computadora que puede ser adaptado a cualquier brazo robótico que actualmente posean las plantas de ensamblaje vehicular. Esto último resultando de vital importancia pues muchas industrias cuentan con sus marcas de confianza para proveerles sus equipos de automatización y no requieren de adquirir unos nuevos, aportando además un ahorro económico.

A nivel mecánico, parte del cumplimiento de los requisitos de velocidad y alcance dependerá de la selección de los robots en los cuales acoplar el sistema. En el caso de los dos utilizados en este trabajo, Neuromeka Indy 7 y ABB-2600, sus especificaciones técnicas se encontraron por encima de lo mínimo requerido, de manera que las pruebas se ejecutaron sin problemas. Con respecto a la cinemática de movimiento, se comprobó que los cálculos de cinemática inversa efectuados por ROS fueron correctos, al obtener las posiciones angulares de los motores del robot de tal forma que este se ubicó correctamente en los puntos de agarre del cable, validando así los resultados.

Las pruebas del algoritmo de reconocimiento desarrollado en Python demostraron que, sin importar la posición o forma en la que se encuentre el cable sobre el espacio de trabajo, es posible obtener un número de puntos de agarre determinados por el usuario sin presentar inconvenientes e incluyendo tanto el

ramal principal como los secundarios. A su vez, se apreció un incremento en el tiempo de ejecución del programa directamente proporcional al número de puntos de agarre calculados, que para las pruebas realizadas fue de 100 máximo y no superó el tiempo de ejecución límite establecido en los requerimientos de diseño de software.

Finalmente, el presente proyecto corresponde a un eslabón clave dentro del objetivo de conseguir un proceso automatizado de cableado. Se abarcó una de las etapas en las que la robótica actual se encuentra más limitada: el reconocimiento y la generación de puntos de agarre de un cuerpo deformable. Si bien dentro del alcance de este trabajo no se incluyó la manipulación autónoma de los cables y su conexión con otros componentes dentro de un chasis automotriz, como lo haría un humano; este sí propone todos los componentes de hardware necesarios para alcanzar dicho punto. Los requisitos faltantes para lograr una automatización completa del cableado corresponderían a mejoras de software exclusivamente, manteniendo los costos del sistema sin variaciones considerables. Además, considerando que una vez alcanzada la meta no se requeriría de tantos operadores y se incrementaría la producción por la reducción de tiempo, el retorno de inversión podría ser alcanzado a mediano plazo una vez se completen los trabajos futuros que continuarán este proyecto y que se describen en la sección siguiente.

4.2. Recomendaciones

Este proyecto fue concebido a raíz de un tema que actualmente no posee muchos avances en investigación y mucho menos en aplicaciones prácticas para la industria. Los resultados alcanzados y descritos en este documento sentarán una base para el trabajo futuro que lo precederá, como es el uso de técnicas de aprendizaje profundo con redes neuronales entrenadas a partir de un conjunto de imágenes de puntos de cable generadas por el algoritmo actual. La integración de esta mejora de software junto con el sistema operativo ROS, tal como se hizo aquí,

permitirá la distinción más certera del cuerpo principal de un cable y de sus ramales secundarios y conectores. De esa forma sería posible configurar un robot para realizar conexiones entre cables y componentes electrónicos, posicionar estos dentro de un chasis de vehículos, clasificarlos acorde a su longitud y número de conectores, entre otras aplicaciones dependiendo de la necesidad y del entorno de trabajo. De esta forma, se recomienda optar por un enfoque dirigido hacia la integración de la robótica y el aprendizaje profundo, más allá de solo el aprendizaje automático y sus limitaciones usando únicamente métodos matemáticos, los cuales generan grandes costos computacionales y conllevan un mayor tiempo de procesamiento que no es rentable en un entorno industrial que busca la eficiencia en cada uno de sus procesos.

En lo concerniente a una posible implementación real del sistema, como parte de la planeación se recomienda conocer y entender a profundidad las funciones y limitaciones del brazo robótico que se utilizará, pues esto definirá las condiciones del entorno de trabajo en las que podrá operar. Principalmente resultan relevantes especificaciones técnicas como su alcance máximo y su repetibilidad. Adicionalmente, realizar las debidas pruebas exhaustivas en un entorno simulado antes de implementar el sistema en un entorno real.

Respecto a la operación y a las tareas rutinarias, se aconseja establecer un plan de mantenimientos preventivos para garantizar la continuidad y la eficiencia del sistema a largo plazo, prolongando su vida útil. Monitorear constantemente el funcionamiento para detectar posibles errores o problemas técnicos. Y, verificar la correcta calibración y configuración del sistema antes de iniciar cualquier tarea, principalmente lo concerniente al eje de referencia relativo que se establecerá en la mesa de trabajo para así enviar las posiciones de los puntos del cable al robot.

Se recomienda mantener limpia y libre de objetos extraños la superficie donde se apoyará el arnés de cables, pues al momento de realizar la detección con la cámara, se pueden obtener errores en los puntos de agarre generados debido a este aspecto

- [1] F. Ramón, «Sector automotriz recupera ventas tras dos años de pandemia,» *El Mercurio*, 13 Mayo 2022.
- [2] C. Sánchez, «AUTOMATIZACIÓN EN LA INDUSTRIA AUTOMOTRIZ: CONCEPTOS Y PROCESOS,» *DESARROLLO TECNOLÓGICO E INNOVACIÓN EMPRESARIAL*, vol. 2, nº 3, pp. 2-3, 2014.
- [3] M. B. P. L. G. M. A. S. M. K. Piotr Kicki, «Tell Me, What Do You See?—Interpretable Classification of Wiring Harness Branches with Deep Neural Networks,» *Sensors*, p. 15, 2021.
- [4] Sumitomo Electric, 12 Julio 2021. [En línea]. Available: <https://sumitomoelectric.com/products/wiring-harnesses-automobiles>. [Último acceso: 10 Noviembre 2022].
- [5] F. Yumbra, M. Abayebas y A. Loung, «Preliminary Connector Recognition System Based on Image Processing for Wire Harness Assembly Tasks,» *ResearchGate*, p. 5, 2020.
- [6] L. P. Vellequette, «Automotive News,» 17 Marzo 2022. [En línea]. Available: <https://www.autonews.com/automakers-suppliers/ukraine-suppliers-amazingly-still-making-some-wire-harnesses-amid-war>.
- [7] Automate Team, «How Automation Is Impacting the Automotive Industry Today,» 3 Septiembre 2022. [En línea]. Available: <https://www.automateshow.com/blog/how-automation-is-impacting-the-automotive-industry-today#:~:text=Most%20automotive%20factories%20leverage%20some,the%20same%20level%20of%20automation..>
- [8] R. Regole, «HOW LONG DOES IT TAKE TO INSTALL A WIRING HARNESS,» 5 Agosto 2019. [En línea]. Available: <https://www.iconnsystems.com/blog/install-a-wiring-harness>.

- [9] Z. Wendt, «Historia de la electrónica automotriz y la eficiencia del combustible de los automóviles,» 17 Junio 2020. [En línea]. Available: <https://www.arrow.com/es-mx/research-and-events/articles/automotive-electronics-and-car-fuel-efficiency-history>.
- [10] G. Coba, «Industria automotriz ecuatoriana intenta reactivarse con exportaciones y tecnología,» 11 Enero 2020. [En línea]. Available: <https://www.primicias.ec/noticias/economia/empleos-venta-vehiculos-ecuador-mercado/>.
- [11] ABC.ES, «Las neuronas y arterias de un coche: más de 2 km de cables,» 18 Febrero 2019. [En línea]. Available: https://www.abc.es/motor/reportajes/abci-neuronas-y-arterias-coche-mas-2-cables-201902180201_noticia.html#:~:text=El%20interior%20de%20un%20vehículo,y%20circulatorio%20del%20cuerpo%20humano.
- [12] R. Z. G. P. S. P. a. C. M. D. De Gregorio, «Integration of Robotic Vision and Tactile Sensing for Wire-Terminal Insertion Tasks,» IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2019.
- [13] Consolidated Electronic Team, «Guide to Specifying Wire Harnesses,» 23 Noviembre 2020. [En línea]. Available: <https://www.conwire.com/blog/guide-to-specifying-wire-harnesses/>.
- [14] JEM Electronics Inc., «The Different Types of Wire Harness Connectors & Terminals,» 05 Junio 2019. [En línea]. Available: <https://blog.jemelectronics.com/wire-harness-connectors-terminals>.
- [15] «Intel,» Intel, 11 Agosto 2018. [En línea]. Available: <https://www.intel.com/content/www/us/en/robotics/robotic-arm.html#:~:text=Robotic%20arms%20can%20be%20used,a%20risk%20of%20bodily%20injury..> [Último acceso: 27 Octubre 2022].

- [16] UNIR, «Robótica industrial: concepto, objetivo y principales aplicaciones,» 4 Junio 2021. [En línea]. Available: <https://www.unir.net/ingenieria/revista/robotica-industrial/>. [Último acceso: 10 Noviembre 2022].
- [17] Ripipsa, «Ripipsa Tecnología al servicio de la industria,» Ripipsa, 29 Mayo 2019. [En línea]. Available: <https://ripipsacobots.com/robotica-automotriz/>. [Último acceso: 27 Octubre 2022].
- [18] M. Peñafiel, «Novedades Automatización,» 7 Octubre 2019. [En línea]. Available: <https://novedadesautomatizacion.com/scara/>. [Último acceso: 10 Noviembre 2022].
- [19] «Larraioz Elektronika,» 23 Agosto 2018. [En línea]. Available: <https://larraioz.com/iai/productos/robots-cartesianos>. [Último acceso: 11 Noviembre 2022].
- [20] CFZCobots, «UR3e Ficha técnica,» 11 Noviembre 2021. [En línea]. Available: <https://cfzcobots.com/wp-content/uploads/2021/11/ur3e-tech-spec.pdf>. [Último acceso: 10 Noviembre 2022].
- [21] «123RF,» 18 Febrero 2010. [En línea]. Available: https://es.123rf.com/photo_87383619_f%C3%A1brica-con-l%C3%ADnea-de-montaje-automotriz-rob%C3%B3tica-inteligente-sistemas-de-ingenier%C3%ADa-modernos-l%C3%ADnea-de-producci%C3%B3n-d.html. [Último acceso: 10 Noviembre 2022].
- [22] «The Manufacturer,» 12 Diciembre 2021. [En línea]. Available: <https://www.themanufacturer.com/articles/why-the-automotive-industry-is-not-as-automated-as-it-seems/>. [Último acceso: 27 Octubre 2022].
- [23] «Atria Innovation,» 29 Septiembre 2020. [En línea]. Available: <https://www.atriainnovation.com/vision-artificial-y-robots-la-pareja-perfecta/>. [Último acceso: 10 Noviembre 2022].

- [24] H. M. H. a. H. T. K. Hohm, «Robot assisted disassembly of electronic devices," Proceedings,» IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2000), 2000.
- [25] W. L. a. K. Cao, «Application of Machine Vision to Inspect a Wiring Harness,» IEEE International Conference on Industrial Cyber Physical Systems (ICPS), 2019.
- [26] W. Philip, «Kinematics Analysis of 6-DoF Articulated Robot with Spherical Wrist,» 2011.
- [27] E. Chakraborty, «Lambda Geeks,» 15 Junio 2019. [En línea]. Available: <https://es.lambdageeks.com/robot-end-effector/>. [Último acceso: 13 Diciembre 2022].
- [28] A. C. Pose, «ANÁLISIS CINEMÁTICO Y DINÁMICO DE PINZA DE ROBOT PARA ESPACIOS AISLADOS,» Universidad Carlos III de Madrid, Madrid, 2015.
- [29] «Omega,» OmegaMx, 6 Mayo 2020. [En línea]. Available: <https://mx.omega.com/prodinfo/pinzas-grippers.html>. [Último acceso: 10 Diciembre 2022].
- [30] ABB, «Product specification IRB 2600,» 2020.
- [31] «HBK Company,» 10 Septiembre 2020. [En línea]. Available: https://www.hbm.com/es/7363/paceline-cswanillo-piezoelectrico-en-miniatura-para-fuerza/?product_type_no=PACeline%20CSW:anillo%20piezoel%C3%A9ctrico%20en%20miniatura%20para%20fuer. [Último acceso: 13 Diciembre 2022].
- [32] «Mecatrónica LATAM,» 23 Abril 2021. [En línea]. Available: <https://www.mecatronicalatam.com/es/tutoriales/motor/motores-electricos/motor-de-corriente-continua/>. [Último acceso: 3 Enero 2023].

- [33] Our World in Data, «Change in number of new passenger vehicles by type, United Kingdom,» 2020. [En línea]. Available: <https://ourworldindata.org/grapher/new-passenger-vehicles-type?stackMode=relative&time=2010..latest&country=~GBR>.

APÉNDICES

APÉNDICE A

Desarrollo del software de reconocimiento

Para desarrollar el código de programación del algoritmo de '*clustering*' se empezó definiendo los tipos de datos que se recibirían a la entrada y los que se entregarían a la salida del programa, siendo estos:

- **Entrada:** imágenes cuadradas de 3040x3040px capturadas por la cámara Intel. Dado que esta posee detectores de profundidad, cada captura entrega una imagen a color y una de profundidad (valor de cada pixel entre cero y uno según qué tan lejos este se encuentre del lente).
- **Salida:** dataset de coordenadas (x,y,z) de los puntos del arnés de cables que la pinza podrá agarrar.

Conociendo esto, fue posible proceder con el primer paso dentro de todo desarrollo de software de aprendizaje automático, correspondiente al preprocesado de los datos. Esto incluye su limpieza (eliminación de datos innecesarios) y normalización (transformación de todos sus valores a una misma escala).

Para la normalización primero se convierte la imagen, que originalmente fue capturada a color, a un formato en blanco y negro. Seguido de esto se reduce su dimensión a una escala más manejable, pues una gran cantidad de pixeles implica más datos que procesar y más demanda computacional. La dimensión escogida fue de 400x400px manteniendo la forma cuadrada.

Una vez cumplidos los pasos previos, la limpieza se lleva a cabo eliminando el fondo de la imagen, es decir, todos aquellos pixeles que no corresponden al cable como tal. Para ello se aplica un filtro definido por un umbral de luminosidad, pues en una imagen cada pixel toma un valor de entre 0 (negro) y 255 (blanco). Dado que los cables son de color negro, se desean mantener las tonalidades más oscuras. La configuración del umbral se estableció entonces en 100, omitiendo aquellos puntos que superen este número. La función

threshold() de la librería OpenCV fue implementada para este apartado, funcionando de manera que convierte en cero el valor de los píxeles eliminados y en uno el de los que sí corresponden al cable. El resultado se muestra en la Figura A.1.

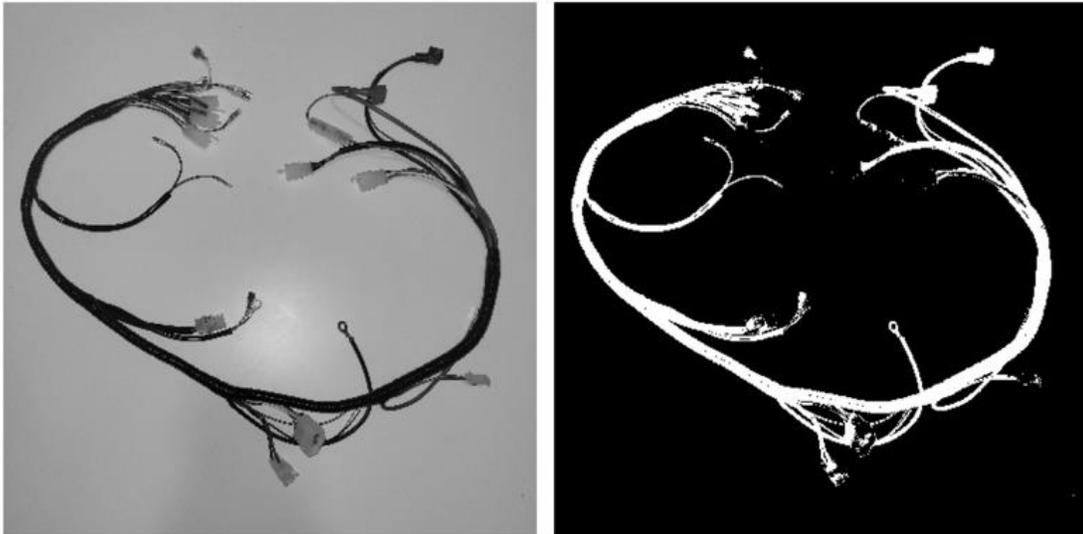


Figura A.1 Imagen original (izquierda) y luego de aplicar la función threshold() para la eliminación del fondo (derecha).

Como última parte del preprocesado, se aplicaron las funciones nonzero() y transpose() de la librería Numpy para la obtención de las coordenadas (x, y) de los píxeles del cable para ser operados como puntos. La coordenada Z fue tomada de la imagen de profundidad proporcionada por la cámara Intel.

Con los datos organizados y almacenados en un arreglo, la siguiente etapa del software tiene que ver con la definición del algoritmo. La librería scikit-learn posee una amplia variedad de herramientas y modelos de aprendizaje automático listos para implementar, de entre los que se obtuvo el utilizado en el presente proyecto: agrupamiento aglomerativo. El proceso que este sigue consiste inicializar a cada punto que se le suministre dentro de su propio grupo individual. Luego, a través de un cálculo matemático de distancias, los grupos se van uniendo entre sí siguiendo los patrones que encuentren en su camino (la forma de un cable, por ejemplo). El número final de grupos que se tendrán es un parámetro (K)

configurable por el usuario. Para el caso presente, un mayor valor de este resulta en puntos de agarre del robot más precisos, a costo de una mayor demanda computacional y viceversa. El número de grupos finales escogido fue de 40 pues mantuvo un equilibrio correcto. La Figura A.2 presenta el resultado del agrupamiento para el ejemplo del cable mostrado anteriormente.

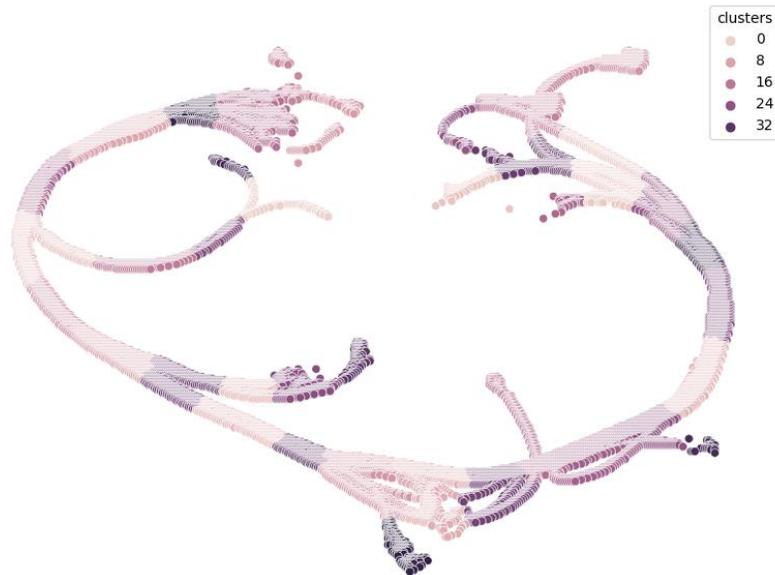


Figura A.2 Agrupamiento de puntos de un cable con K = 40

El paso final consistió en el cálculo de los centroides de cada grupo con el fin de obtener los puntos de agarre del robot. Para un conjunto de puntos de coordenadas (x, y) , el centroide se define como el punto ubicado en la media de cada coordenada, como se expresa en la

$$C_k = (\bar{X}_k, \bar{Y}_k) = \left(\frac{X_k^1 + X_k^2 + \dots + X_k^n}{n}, \frac{Y_k^1 + Y_k^2 + \dots + Y_k^n}{n} \right); k \in [0, K], n \in \mathbb{N}$$

Utilizando la librería Pandas, es posible agrupar a cada punto de acuerdo a su grupo con la función `groupby()`, para de esta forma, aplicar la media solo a los miembros de cada grupo

correspondiente con la función mean(). La Figura A.3 muestra los 40 centroides calculados y graficados.

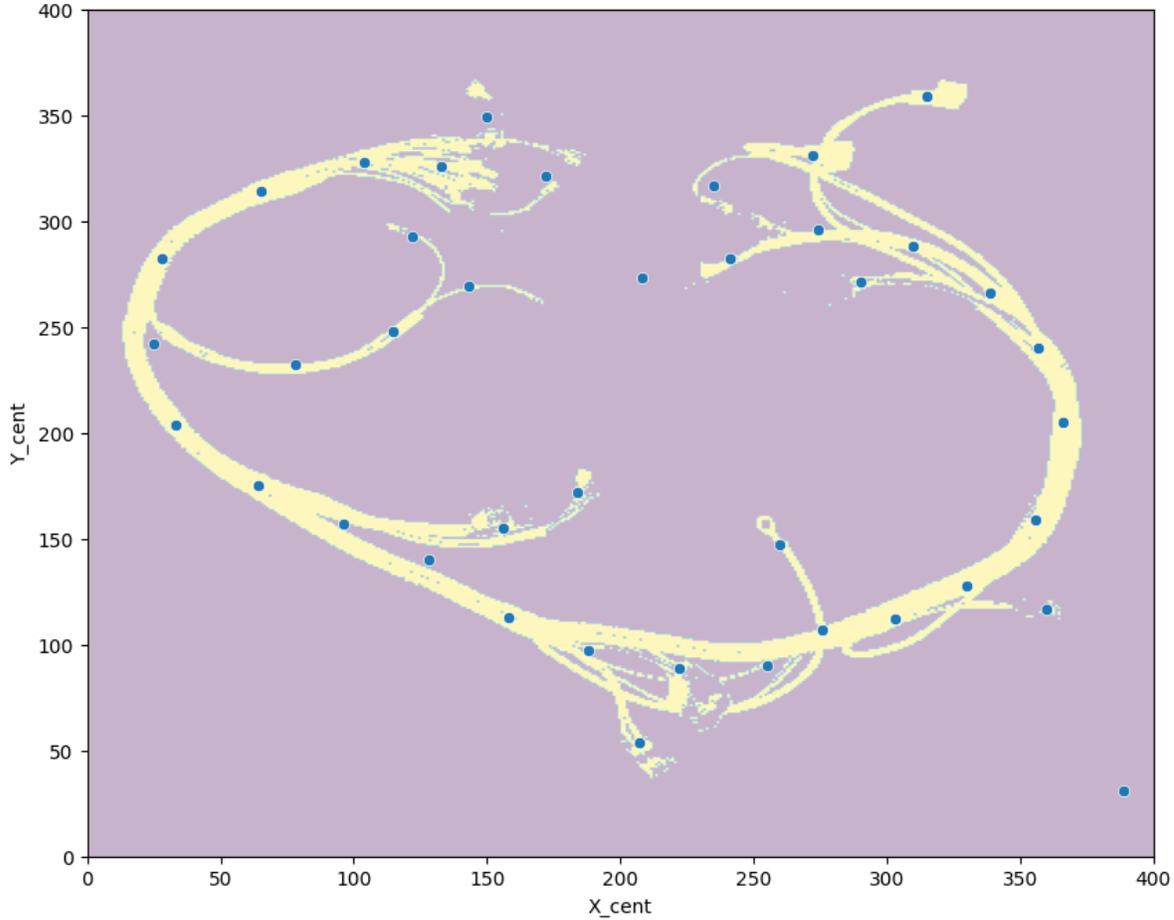


Figura A.3 Grafica de los centroides calculados como resultado del software

APÉNDICE B

Diseño y prototipado de la pieza mecánica

Para el diseño de la pinza se tomaron como base prototipos existentes de pinzas de desplazamiento angular, sobre todo para la de transmisión de movimiento usando un sistema de engranes, esto para poder usar un accionamiento eléctrico mediante un motor.

Para la configuración de la mordaza, se adecuaron de acuerdo con la aplicación a realizar, siendo estas la sujeción y transporte de un arnés de cables. Se pensaron en tres distintos diseños para comprobar, cual funcionaría mejor en una aplicación industrial. Se tomó como principio los dos tipos de acciones de sujeción de una piza, la fricción y la retención o rodeo.

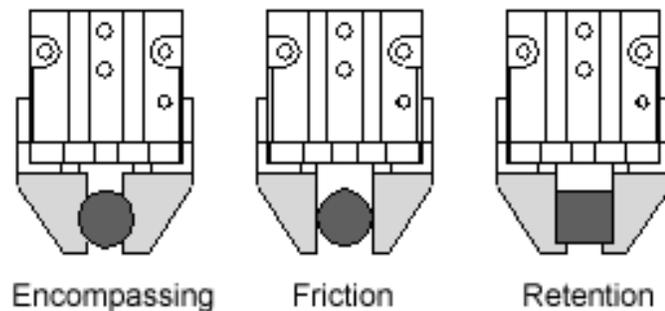


Figura B.1: Tipos de acciones de sujeción [29]

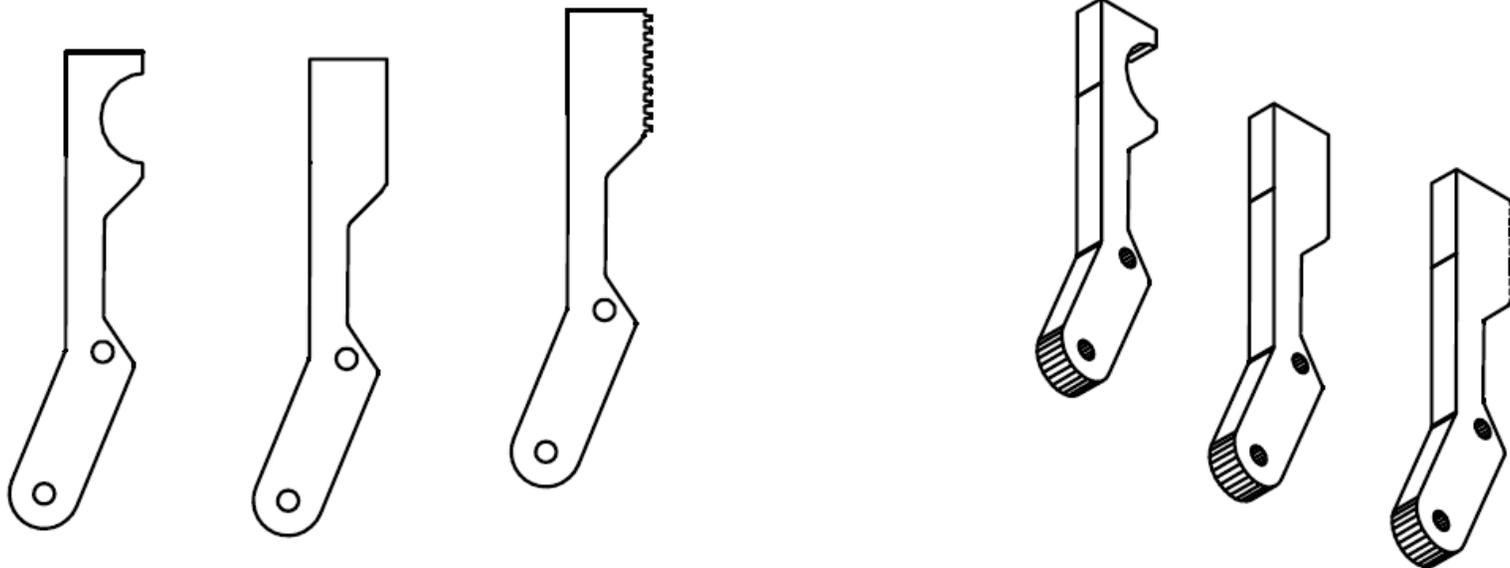
Para primer diseño se diseñó una superficie de contacto plana, recubierta con un material adherente que generara fricción entre esta y el cable, para conseguir un mejor agarre, sin embargo, este se descartó debido a que, de los materiales que se podría usar, estos no ofrecían la fricción suficiente como para tener una estabilidad durante el movimiento del cable y la fuerza requerida es la mayor de los tres casos.

El segundo diseño pensado fue una superficie cóncava, usando como radio la parte más gruesa del cable, esto con la de que este encaje en el cable de manera precisa y lo pueda

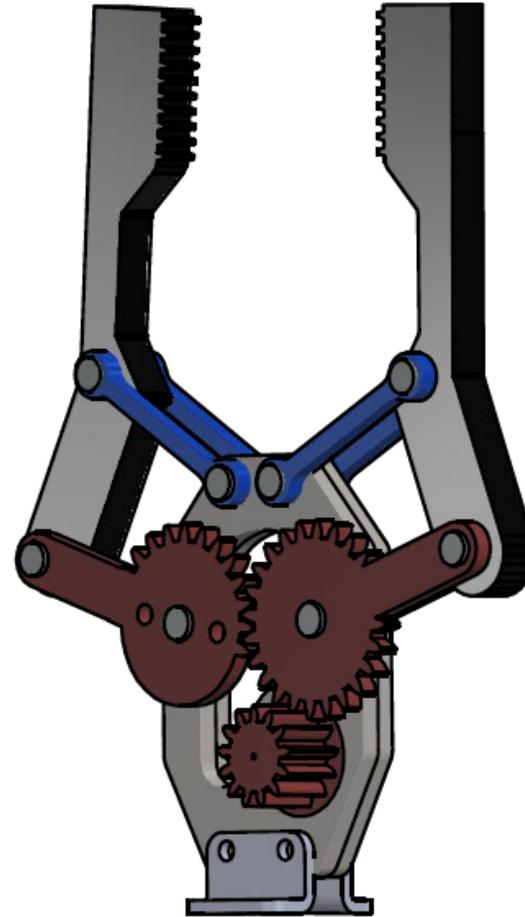
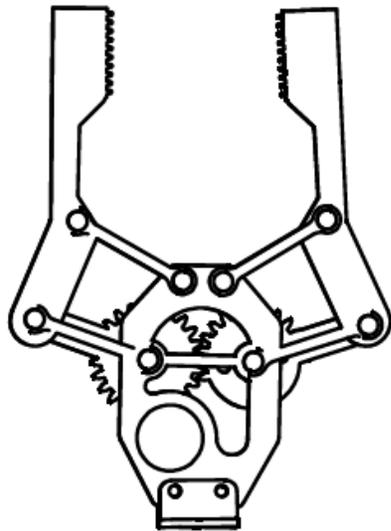
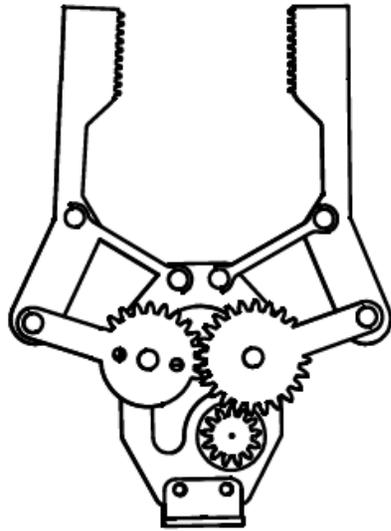
trasladar, el problema con este diseño es que para que funcione correctamente requiere una mayor precisión de posición para el robot, ya que de otra manera no podría realizar el agarre, además funciona únicamente para el ramal principal del cable, ya que con los terminales al no encajar no permite la misma sujeción.

Para el último diseño se pensó en una superficie dentada la cual fue la escogida para el diseño final, esto debido a que, al ser un cable un objeto no rígido requiere un mayor nivel de seguridad sobre todo a la hora de realizar movimientos con el mismo, es por ello que este tipo de superficies permite que la pinza se ajuste a la forma del cable y lo ajuste con más fuerza, lo que previene que se deslice o libere accidentalmente.

A continuación, se muestra un plano con los tres diseños realizados para los agarres de la pinza junto con el plano del ensamble final de la pinza con el agarre seleccionado.



			Proyecto:	Agarraderas de la pinza	
Diseño	15-12-22	S. España	Cliente:	Ing. Francisco Yumbra	
Diseño	15-12-22	J. Sánchez	Descripción: Vista General		
Revisión No.	Fecha	Nombre			
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y CIENCIAS DE LA PRODUCCIÓN			ISO E	Revisor por	Hoja No. 1/1
			Plano No.: HX-001		
			Fecha: 15-12-22	Escala: 2:1	REV: 00



			Proyecto:	Pinza Mecánica		
Diseño	15-12-22	S. España	Cliente:	Ing. Francisco Yumbra		
Diseño	15-12-22	J. Sánchez	Descripción: Vista General			
Revisión No.	Fecha	Nombre				
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y CIENCIAS DE LA PRODUCCIÓN			ISO E	Revisor por		Hoja No. 1/1
			Plano No.: HX-001			
			Fecha: 15-12-22	Escala: 2:1	REV: 00	

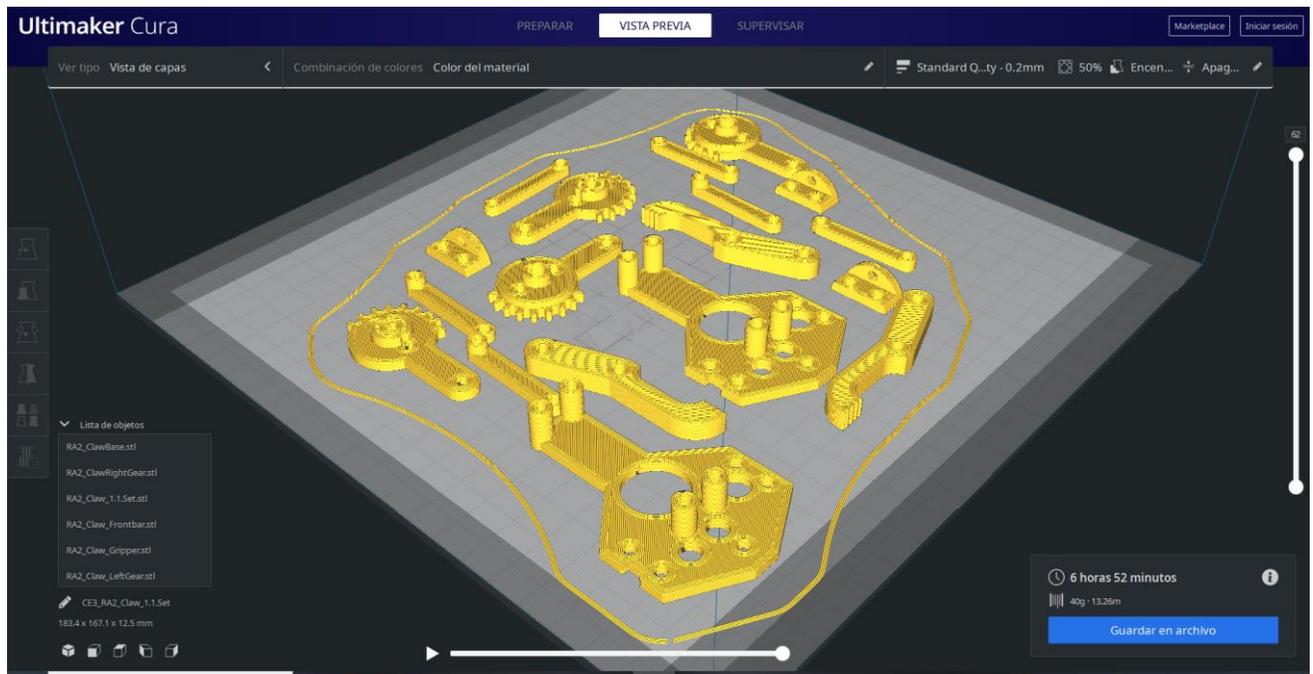


Figura B.2: Vista previa de impresión 3D para la pinza mecánica

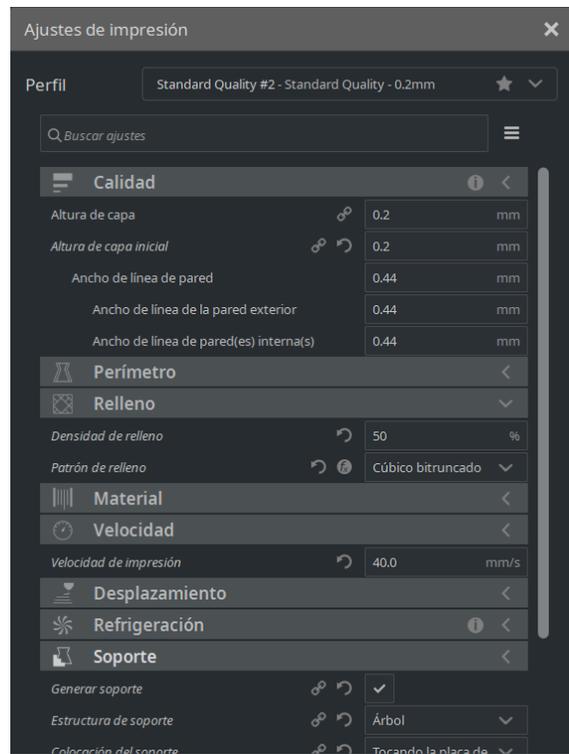


Figura B.3: Configuración de los parámetros de impresión

Para el prototipado de la pinza mecánica, se utilizó la impresión 3D para crear un modelo de esta y realizar las respectivas pruebas usando el cable. En la Figura B se muestra una configuración de las piezas en el software para generar los G-code de la impresión, cada una de las piezas fue impresa bajo la misma configuración en una impresora **Ender3** con una altura de capa de 0.2mm lo cual le da una mejor precisión a la hora de realizar el ensamble final como se mostró en la **Sección 3.2**

Se utilizaron las medidas del fabricante del robot Figura C.1y de la cámara Figura para diseñar un soporte que mantenga a esta última en una posición perpendicular al área de trabajo y paralela a la dirección de la herramienta

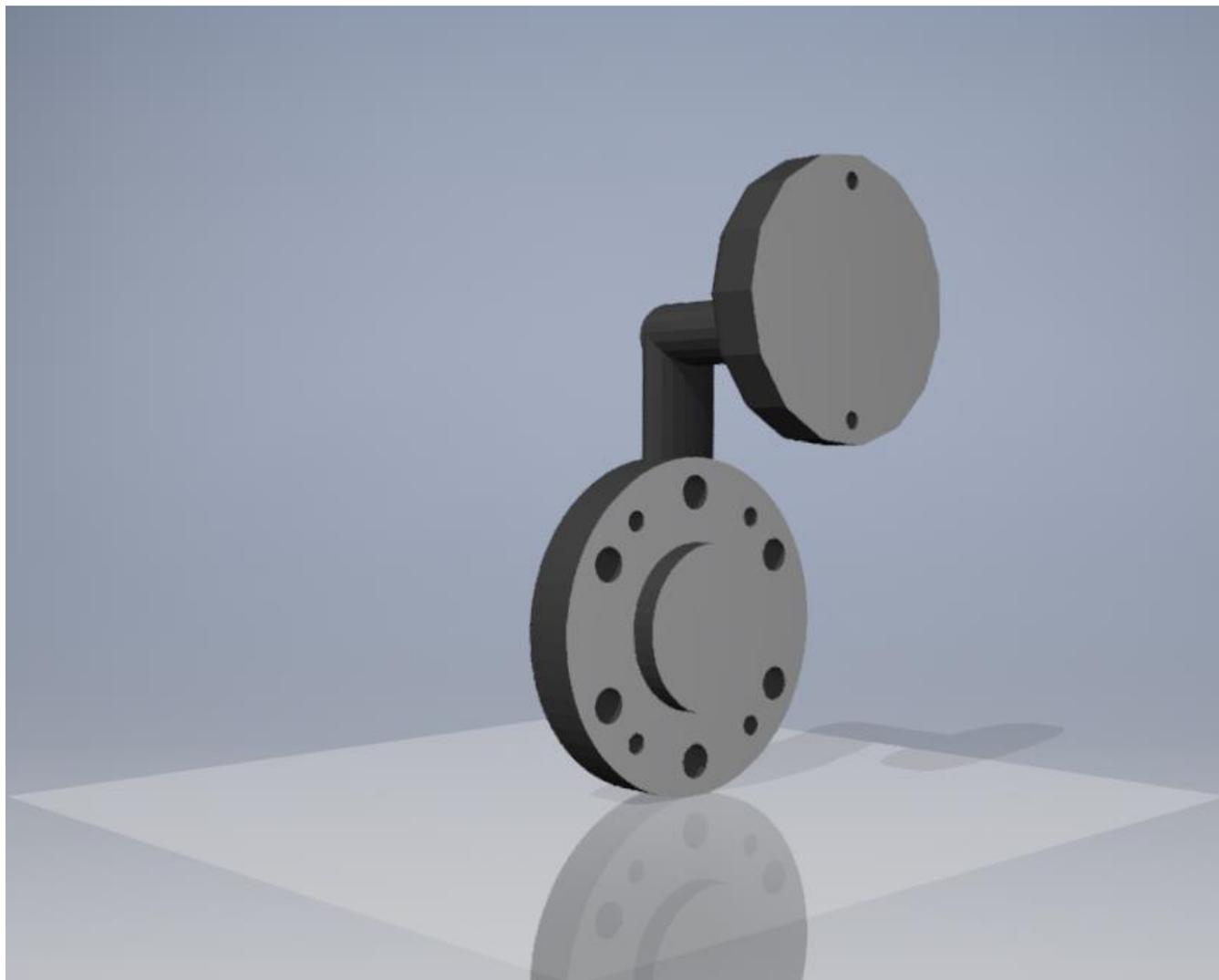
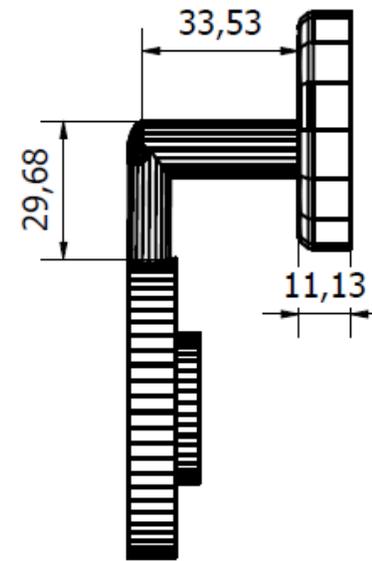
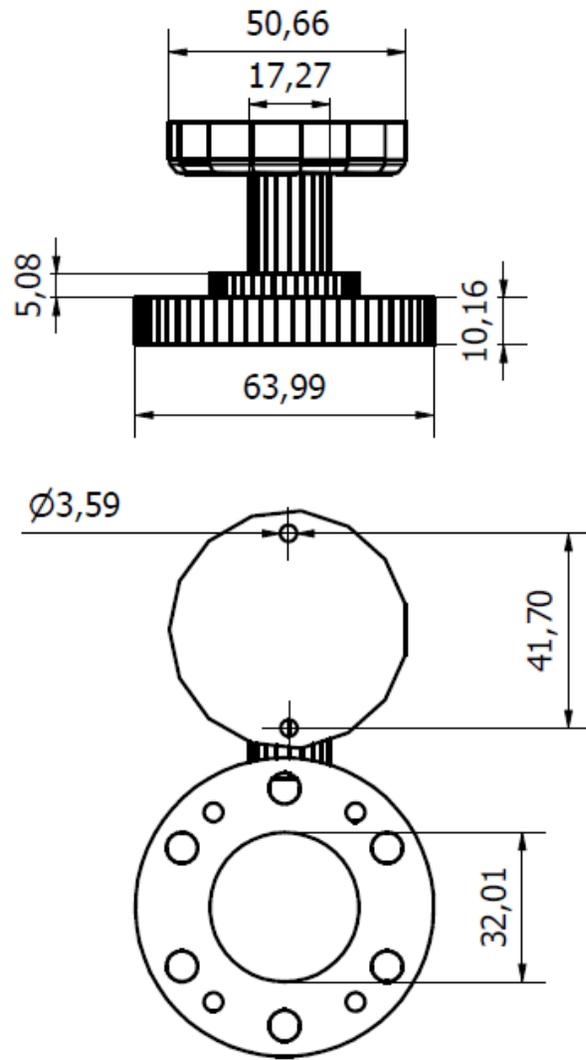


Figura C.3: Diseño del soporte para el robot ABB IRB2600



Nota: Todas las medidas están en milímetros

			Proyecto:	Soporte para la cámara			
Diseño			15-12-22	S. España	Cliente:		
Diseño			15-12-22	J. Sánchez	Ing. Francisco Yumbra		
Revisión No.	Fecha	Nombre	Descripción: Vista General				
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y CIENCIAS DE LA PRODUCCIÓN					ISO E	Revisor por	Hoja No.
			Plano No.: HX-001				1/1
			Fecha:	Escala: 2:1	REV: 00		

APÉNDICE D

Análisis de las opciones de control de la pinza

La primera opción, consiste en el control de cierre de la pinza usando un sensor de presión. Haciendo uso de un transductor piezoeléctrico, el cual permite medir la presión ejercida por el contacto de la pinza con el cable, entregando lecturas de variación de voltaje. La carga eléctrica que genera es proporcional al esfuerzo mecánico realizado, por lo que al determinar la presión suficiente para que la pinza pueda sostener de manera estable al cable y trasladarlo de un punto a otro, se puede obtener también un valor de voltaje que sirva como límite para determinar el rango de apertura y cierre de la pinza, además permite determinar posibles fallas de agarre o incluso determinar si durante el trayecto el cable ha sido soltado por la pinza.



Figura D.1: Sensores piezoeléctricos [31]

En la Figura se muestran anillos piezoeléctricos sub-miniatura, los cuales poseen una carga nominal entre 1kN y 8kN, misma que es más que suficiente para medir la presión entre la pinza y los cables, además de que su forma y tamaño lo hacen ideal para un acoplamiento a la estructura de la pinza sin que represente un inconveniente a la hora de realizar la acción.

La segunda opción consiste en el monitoreo del consumo de corriente del motor encargado de accionar el mecanismo de apertura y cierre de la pinza. Durante la acción de cierre de esta la carga a la que se somete el motor es la misma ya que este estaría moviendo únicamente las piezas que conforman la mandíbula de la pinza. Una vez que estas se cierran lo suficiente para atrapar el cable la carga que soporta el motor aumentará de manera constante a medida que las mandíbulas ejerzan presión sobre el cable haciendo que este consuma una mayor corriente hasta que el torque ejercido sea suficiente para generar la fuerza requerida por la pinza para sostener el cable.

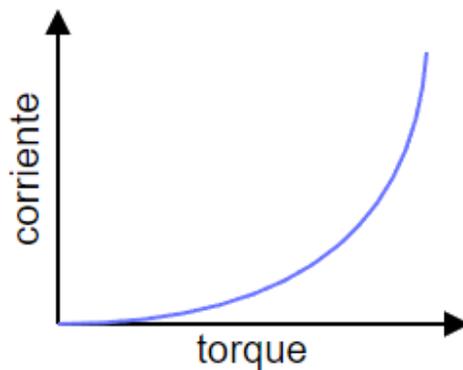


Figura D.1: Curva Corriente vs Torque de un motor Shunt [32]

Basado en este principio, se establece un circuito con un sensor de corriente, el cual permite monitorear el consumo de esta por el motor a medida que el movimiento de cierre de la pinza avanza. Esta información es enviada a un controlador, en este caso, un Arduino Nano, mismo que analizará la información y detectará cuando esta supere un umbral previamente establecido, en ese momento el controlador emite una señal que activa un relé conectado al circuito de poder, para desconectar el motor y que este pare su movimiento.

De estas dos opciones se determinó que la más adecuada para la aplicación que se quiere implementar es la última expuesta, debido a que no genera una mayor intrusión al sistema general de la pinza mecánica ya que no requiere el acople de ningún sensor que pueda provocar una falla en el agarre con el objeto y su circuito de control no genera mayor intrusión al controlador general de apertura y cierre de una pinza mecánica industrial.