



Powered by  
Arizona State University

**ING. MECATRÓNICA**

Tesis previa a la obtención del título  
de Ingeniero en Mecatrónica.

AUTOR: Diego Fernando Mesias  
Logroño

TUTOR: Ing. Gabriela Andaluz  
Ortiz, MSc

Diseño y construcción de un prototipo de carro inteligente para supermarket por medio de  
visión artificial

Design and construction of a prototype of an intelligent cart for a supermarket by means of  
artificial vision

## CERTIFICACIÓN DE AUTORÍA

Yo, DIEGO FERNANDO MESIAS LOGROÑO, con cédula de ciudadanía 1311465502, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido presentado anteriormente para ningún grado o calificación profesional y que se ha consultado la bibliografía detallada.

Cedo mis derechos de propiedad intelectual a la Universidad Internacional del Ecuador, para que sea publicado y divulgado en internet, según lo establecido en la Ley de Propiedad Intelectual, reglamento y leyes.



---

C.I.: 131146550-2

## **APROBACIÓN DEL TUTOR**

Yo Gabriela AndaluZ Ortiz, certifico que conozco al autor del presente trabajo de Disertación “Diseño y construcción de un prototipo de carro inteligente para supermarket por medio de visión artificial”, Diego Fernando Mesias Logroño, siendo la responsable exclusiva tanto de su originalidad y autenticidad, como de su contenido.



---

**ING. GABRIELA ANDALUZ, MSc.  
DIRECTOR DE TRABAJO DE TITULACIÓN**

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a mi padres por todo el apoyo, sacrificio, paciencia y gran ejemplo en toda esta etapa universitaria, ya que gracias a ellos he logrado cumplir con las todas las metas que me he propuesto. A mi hermano, tía y familiares por estar conmigo en todo momento, por su apoyo y constante preocupación durante todo este proceso.

Por último, quiero dedicar esta tesis a todos mis amigos que en distintos momentos compartí durante mi vida académica Marco, Belén, Paz, Sele, Reno, Karlita, Sebas, etc.

# ÍNDICE DE CONTENIDOS

1	Tema . . . . .	1
2	Objetivos . . . . .	1
	2.1 General . . . . .	1
	2.2 Específicos . . . . .	1
3	Problema . . . . .	2
4	Hipótesis . . . . .	2
5	Introducción . . . . .	2
6	Tipos de carros de compras . . . . .	3
7	Normativas de supermercados . . . . .	5
8	Robot móvil . . . . .	6
	8.1 Sistema de locomoción para robots móviles . . . . .	6
9	Control de motores DC . . . . .	6
10	Componente de sistemas de visión . . . . .	9
	10.1 Cámaras . . . . .	10
	10.2 Iluminación . . . . .	11
	10.3 Óptica . . . . .	11
11	Imagen digital . . . . .	12
	11.1 Resolución en una imagen . . . . .	12
	11.2 Imágenes a color . . . . .	13
12	Filtros y operaciones morfológicas . . . . .	14
	12.1 Eliminación de ruido . . . . .	15
	12.2 Operaciones morfológicas . . . . .	15
13	Reconocimiento de patrones . . . . .	16
14	Visión por computadora . . . . .	17

14.1	Extracción de características . . . . .	17
15	Sistemas embebidos y microcontroladores . . . . .	19
16	Trabajos existentes . . . . .	19
17	Análisis y selección de alternativas . . . . .	20
17.1	Análisis de alternativas del material para la estructura principal . . . . .	20
17.2	Análisis y selección del controlador . . . . .	22
17.3	Análisis y selección del regulador de voltaje . . . . .	23
17.4	Análisis y selección de los sensores . . . . .	24
18	Diseño mecatrónico . . . . .	26
18.1	Necesidades y parámetros de diseño . . . . .	28
19	Diseño mecánico . . . . .	28
19.1	Estructura principal del prototipo . . . . .	28
19.2	Dimensionamiento del diámetro de varillas y tubos de la estructura . . . . .	29
19.3	Dimensionamiento de motores . . . . .	48
20	Diseño electrónico . . . . .	52
20.1	Dimensionamiento de driver . . . . .	53
20.2	Dimensionamiento de la batería . . . . .	54
20.3	Modelo matemático motor DC . . . . .	56
21	Desarrollo del control DC . . . . .	58
21.1	Variables del motor DC . . . . .	58
21.2	Controlador PID . . . . .	59
21.3	Implementación del controlador en los motores DC . . . . .	65
22	Programación . . . . .	68
22.1	Detector de objetos Haar Cascade . . . . .	68
22.2	Distancia focal . . . . .	71
22.3	Modo de funcionamiento . . . . .	73
23	Pruebas y resultados . . . . .	77
23.1	Pruebas de reconocimiento . . . . .	77
23.2	Pruebas de desplazamiento . . . . .	79
23.3	Pruebas de giro de $90^\circ$ . . . . .	80

23.4	Pruebas de precisión . . . . .	81
23.5	Pruebas de iluminación . . . . .	81
23.6	Pruebas de distancia evasión de personas y estanterías . . . . .	82
23.7	Prueba de estatura del usuario . . . . .	82
23.8	Análisis de costo . . . . .	83
24	Conclusiones . . . . .	85
25	Recomendaciones . . . . .	85

# ÍNDICE DE FIGURAS

1	Carro convencional. . . . .	3
2	Carro de plástico . . . . .	4
3	Carro motorizado . . . . .	4
4	Carro plegable . . . . .	5
5	Sistemas de locomoción. . . . .	6
6	Sistema de control lazo cerrado. . . . .	7
7	Esquema de un sistema de visión artificial . . . . .	10
8	Campos de visión . . . . .	11
9	Imagen digital en escala de gris con 256 niveles de intensidad . . . . .	12
10	Ejemplos de resolución en una imagen . . . . .	12
11	Modelo RGB . . . . .	13
12	Modelo HSV . . . . .	14
13	Modelo HSI . . . . .	14
14	Tipo de operaciones morfológicas . . . . .	15
15	Diagrama de bloques para un proceso de reconocimiento de patrones . . . . .	16
16	Filtro en cascada . . . . .	18
17	LBP operando en un vecindario . . . . .	18
18	Vector binario de LBP . . . . .	19
19	Modelo XL4015. . . . .	24
20	Sensor ultrasonico HC-SR04. . . . .	25
21	Sensor infrarrojo FC-03. . . . .	26
22	Modelo 3D del carro de supermercado. . . . .	27
23	Estructuras a analizar del carro de compras. . . . .	29
24	Representación de los apoyos y fuerza de la varilla de la canasta. . . . .	31



25	Diagrama de cuerpo libre de la varilla de la canasta. . . . .	31
26	Diagrama de fuerzas cortantes y momentos flectores en la varilla del fondo de la canasta. . . . .	32
27	Representación de la varilla de soporte de la canasta . . . . .	35
28	Diagrama de cuerpo libre la varilla de soporte de la canasta . . . . .	36
29	Diagrama de momento flector de la varilla de soporte de la canasta. . . . .	36
30	Representación de los apoyos del carro de supermercado. . . . .	38
31	Diagrama de cuerpo libre y diagramas de los apoyos del carro de supermercado. . . . .	39
32	Valor de la constante de fijación . . . . .	42
33	Uniones soldadas sujetas a flexión. . . . .	44
34	Patrón de soldadura circular . . . . .	45
35	Diagrama de cuerpo libre de las fuerzas presentes en el sistema. . . . .	48
36	Diagrama de bloques del circuito electrónico. . . . .	53
37	Módulo BTS7960 . . . . .	54
38	Esquema motor DC . . . . .	56
39	Sistema motor DC en lazo abierto. . . . .	59
40	Resultado del sistema motor DC en lazo abierto. . . . .	60
41	Sistema motor DC Controlador P. . . . .	60
42	Herramienta PID de Simulink. . . . .	61
43	Resultado del sistema motor DC Controlador P. . . . .	61
44	Sistema motor DC Controlador I. . . . .	62
45	Resultado del sistema motor DC Controlador I. . . . .	62
46	Sistema motor DC Controlador PD. . . . .	63
47	Resultado del sistema motor DC Controlador PD. . . . .	63
48	Sistema motor DC Controlador PI. . . . .	64
49	Resultado del sistema motor DC Controlador PI. . . . .	64
50	Sistema motor DC Controlador PID. . . . .	65
51	Resultado del sistema motor DC Controlador PID. . . . .	65
52	Disco implementado en el sistema de control. . . . .	66

53	Parámetros obtenidos por la herramienta control PID de simulink. . . . .	66
54	Respuesta del sistema PI con $K_p = 0,29$ y $K_i = 3,38$ . . . . .	67
55	Base de datos de la figura característica . . . . .	69
56	Resultado del clasificador cascada. . . . .	70
57	Resultado de la matriz de confusión. . . . .	70
58	Representación del objeto proyecto en la imagen. . . . .	71
59	Relación de triángulos distancia real. . . . .	71
60	Resultado del algoritmo de distancia focal. . . . .	72
61	Señales recibidas del Arduino por medio de comunicación serial. . . . .	73
62	Lógica, desplazamiento frontal. . . . .	74
63	Lógica, desplazamiento lateral. . . . .	75
64	Lógica, Giro de $90^\circ$ . . . . .	76
65	Distancia real = 1,5m; distancia focal = 1,51m. . . . .	78
66	Reconocimiento con inclinación. . . . .	79

# ÍNDICE DE TABLAS

1	Proyectos similares existentes. . . . .	20
2	Criterios de evaluación. . . . .	21
3	Matriz de selección del material de la estructura. . . . .	21
4	Propiedades mecánicas acero A36 . . . . .	22
5	Alternativas de controladores programables. . . . .	23
6	Alternativas de regulador de voltaje. . . . .	23
7	Alternativas sensores de distancia. . . . .	24
8	Parámetros principales de diseño. . . . .	26
9	Elementos principales de diseño. . . . .	27
10	Datos iniciales para el dimensionamiento de las varillas de la canasta. . . . .	30
11	Datos iniciales para el dimensionamiento de soporte de la canasta. . . . .	34
12	Datos iniciales para el dimensionamiento del los apoyos del carro de supermercado. . . . .	38
13	Catálogo ImportAcero, tubo mecánico redondo. . . . .	41
14	Datos iniciales para análisis de pandeo en el tubo. . . . .	43
15	Propiedades mínimas del material de aporte. . . . .	47
16	Código AISC para el material de aporte. . . . .	48
17	Masa aproximada del carro de supermercado. . . . .	49
18	Condiciones iniciales para el dimensionamiento de los motores. . . . .	49
19	Análisis de sistemas de locomoción. . . . .	51
20	Características de motores a elegir. . . . .	52
21	Alternativas drivers de motores. . . . .	53
22	Consumo de voltaje y corriente del prototipo. . . . .	54
23	Parametrización constantes electromotriz. . . . .	59

24	Características del motor DC. . . . .	59
25	Pruebas de reconocimiento por distancia. . . . .	77
26	Pruebas de reconocimiento por inclinación del usuario. . . . .	78
27	Pruebas de desplazamiento. . . . .	79
28	Pruebas de giro. . . . .	80
29	Pruebas de número de imágenes. . . . .	81
30	Pruebas de iluminación. . . . .	81
31	Pruebas de distancia entre objetos. . . . .	82
32	Pruebas de estatura. . . . .	83
33	Costo total del prototipo. . . . .	84

# **CARRO INTELIGENTE PARA SUPERMARKET POR MEDIO DE VISIÓN ARTIFICIAL**

## **1. Tema**

El tema del proyecto planteado es el "Diseño y construcción de un prototipo de carro inteligente para supermarket por medio de visión artificial".

## **2. Objetivos**

### **2.1. General**

Diseñar y construir un prototipo de carro inteligente para supermarket por medio de visión artificial.

### **2.2. Específicos**

- Investigar y documentar los diferentes prototipos de carros inteligentes que se están desarrollado.
- Diseñar la estructura y mecanismo del carro inteligente acorde al espacio disponible en cada carril del supermercado.
- Seleccionar los elementos electrónicos y fuente de alimentación para dar al equipo una autonomía de una hora de uso.
- Aplicar técnicas de visión artificial y reconocimiento de patrones que permitan seguir la referencia que va a tener el usuario.
- Construir el prototipo tomando en cuenta la parte de la programación, mecánica y electrónica.
- Realizar pruebas de funcionamiento.

### **3. Problema**

Los carros de supermercado aparecieron por primera vez gracias a Sylvan N. Godman dueño de la cadena Piggly-Wiggly, se trata de un vehículo cuya estructura contiene un chasis de metal y posee un manillar de plástico que tiene la finalidad de apoyar al usuario para realizar sus compras más cómodas y ágiles, [1]. Actualmente, existen diversos tipos de carros manuales y motorizados que permiten en general al usuario transportar productos. No obstante, los carros motorizados no se encuentran muy popularizados por sus costos, pero permiten una mayor comodidad y agilidad al usuario al momento de realizar sus compras. Si bien ya existen este tipo de carros, se ha visto que las personas que los usan tienen dificultad al momento de movilizarse o levantarse del carro motorizado ya sea por alguna discapacidad física, embarazo, entre otros factores que afectan a la libre movilidad y esfuerzo al momento de usar los carros de compras convencionales, por lo que, mejoras y automatizaciones en este mercado aún no están satisfechas.

### **4. Hipótesis**

El carro inteligente será capaz de cumplir la función de asistente de compras de supermercado, el carro tendrá una capacidad de cargar hasta 40kg, podrá desplazarse y seguir al usuario que porte una figura característica, evitando colisiones con estanterías y personas.

### **5. Introducción**

En 1936 en el estado de Oklahoma el dueño de la cadena Piggly-Wiggly se dio cuenta que sus clientes realizaban sus compras sin ningún tipo de coche o estructura que ayude a transportar los productos, en consecuencia, los clientes se movilizaban por toda la tienda con bolsas de papel impidiendo llenarlas debido a la fragilidad de las bolsas por el peso de los productos, esto provocaba a los clientes reducir el consumo dentro de la cadena antes mencionada, para promocionar las compras el Señor Sylvan N. Godman creó un carro con una silla plegable con ruedas y una cesta de alambre, debido al gran éxito del primer prototipo de carro de compras y con ayuda del mecánico Fred Young fundaron una fábrica de carros de compras en 1947, [1].

## 6. Tipos de carros de compras

En la actualidad existe una gran variedad de tipos de carros de supermercado que pueden diferenciarse por su capacidad, materiales y diseño, a continuación se detalla los más conocidos y usados por las grandes franquicias.

- **Carro de supermercado convencional:** Este tipo de carro se encuentra en la mayoría de centros comerciales, está fabricado con varillas de metal y una capacidad de carga de 120kg dependiendo su diseño y proveedor, [2]. En la Figura 1 se presenta el modelo antes mencionado.



**Figura 1:** Carro convencional, [2].

- **Carros de supermercados híbridos:** Este tipo de carro se caracteriza por ser más ligero que los carros de metal y se puede fabricar con cualquier requerimiento de los supermercados, tiene una capacidad de carga de 93kg dependiendo su diseño y proveedor, [3]. En la Figura 2 se presenta el modelo antes mencionado.



**Figura 2:** Carro de plástico, [3].

- **Carros motorizados:** El factor diferenciador de este tipo de carros son los motores que van acoplados a las llantas trasera y en algunos caso delanteras con el fin de ser un apoyo a las personas con movilidad reducida, la capacidad de carga es de 50kg dependiendo su diseño y proveedor, [4]. En la Figura 3 se presenta el modelo antes mencionado.



**Figura 3:** Carro motorizado, [4].



- **Carros plegables:** Estos carros de compras tienen una canasta principal alta que se pliega para cerrar para ahorrar espacio mientras se almacenan los carros. Son más livianos y requieren menos esfuerzo para levantarlos o moverlos que otros estilos de carros de compras, tiene una capacidad de carga de 40kg dependiendo su diseño y proveedor, [5]. En la Figura 4 se presenta el modelo antes mencionado.



**Figura 4:** Carro plegable, [5].

## 7. Normativas de supermercados

Dentro de algunos países como Argentina, España entre otros, se tienen normativas de edificaciones para la construcción de centros comerciales y supermercados, en este caso es importante conocer las dimensiones reales y correctas del ancho entre pasillos dentro del supermercado, de acuerdo a la normativa municipal del Rosario en Buenos Aires Argentina, en la sección 6.2.3.3 detalla que las calles interiores del establecimiento debe tener un ancho no menor a 1,5m, [6]. Adicional, de acuerdo a la Tabla 4.1 del apartado 4.2 del DB-S1-3 de España el ancho mínimo entre estanterías de un supermercado que se prevea el uso de carros debe ser mínimo de 1,8m, [7].

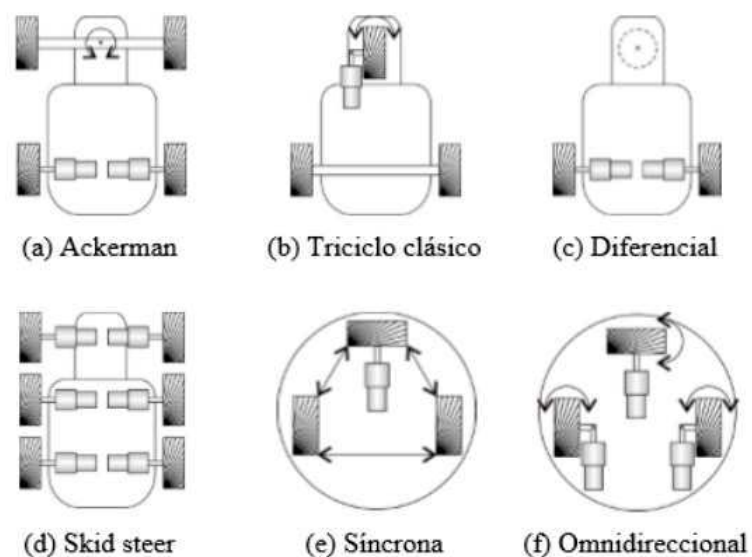
## 8. Robot móvil

Un robot móvil tiene la capacidad de desplazarse en diversos entornos, los robots móviles son usados habitualmente para labores en bodega, embalaje, despacho y transporte de mercadería. [8].

### 8.1. Sistema de locomoción para robots móviles

Actualmente, se puede observar varios tipos de sistemas de locomoción para robots en diferentes superficies basados en diversos principios, los sistemas de locomoción tiene como principal objetivo utilizar dispositivos externos para su movilidad como ruedas, patas, orugas y hélices.

En la Figura 5 se presenta los diferentes sistemas de locomoción de robot móviles con ruedas.

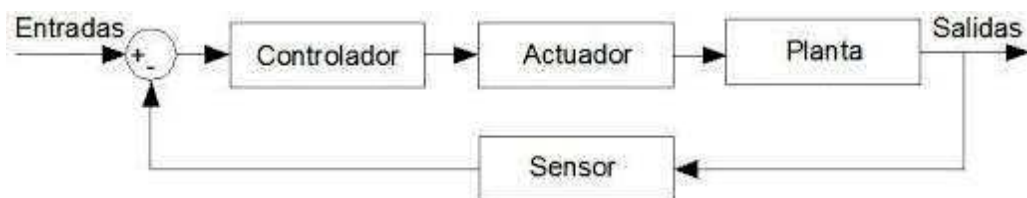


**Figura 5:** Sistemas de locomoción, [9].

## 9. Control de motores DC

En la actualidad los sistemas de control han sido vitales para la construcción y desarrollo de nuevas tecnologías, debido a que en la industria varios trabajos están condicionados por algún tipo de sistema de control, existen dos tipos: control en lazo abierto y en lazo cerrado. El control en lazo abierto se representa por no tener un sistema de medición para estimar

el valor de salida, es decir, no tiene una retroalimentación del valor de salida en el valor de entrada, en otras palabras la regulación del error se basa en la experiencia o resultados previos, por otro lado el control de lazo cerrado corrige las desviación de la señal de salida frente a la referencia de manera automática, [10]. En la Figura 6 se presenta un diagrama de bloques de un sistema de control en lazo cerrado, donde el sistema cuenta con dos bloques principales, el controlador y la planta. La planta esta influenciada por la salida del controlador que puede ser a través de un actuador como un motor, la salida de la planta conjunto con el sensor cumplen la función de manipular la variable de proceso dependiendo si el error es positivo o negativo, el objetivo de este sistema es disminuir lo mejor posible el error.



**Figura 6:** Sistema de control lazo cerrado, [11].

### Controlador proporcional

Este tipo de controlador da una salida del controlador que es proporcional al error el cual su función de transferencia seria:

$$C_p(s) = K_p \quad (1)$$

Donde

$C_p(s)$  Función de transferencia del controlador P, adimensional;

$K_p$  Ganancia proporcional ajustable, adimensional.

El controlador proporcional es capaz de mantener una planta estable, pero tiene trabajo limitado y error en régimen permanente.

La ventaja principal del controlador proporcional es contribuir a reducir el error de estado estacionario, por ende el sistema sea más estable, además, de que la lenta respuesta del sistema sobre amortiguado puede hacerse más rápido, [12].

### Controlador derivativo

Para el uso de este controlador es dispensable de controlador proporcional debido a que el controlador derivativo no puede mejorar el error en estado estacionario, produce efectos de saturación y amplifica las señales de ruido generado por el sistema.

La ventaja de este controlador se da en mejorar la respuesta transitoria del sistema, [12].

### Controlador integral

Este modo da una salida del controlador que es proporcional al error acumulado su función de transferencia es:

$$C_i(s) = \frac{K_i}{s} \quad (2)$$

Donde:

$C_i(s)$  Función de transferencia del controlador I, adimensional;

$K_i$  Ganancia integral, adimensional.

Ya que es proporcional al error acumulado puede llegar hacer inestable en respuestas lentas al error producido por lo que es una desventaja que se debe tomar en cuenta.

### Controlador PI

Este tipo de control genera un señal resultante de la suma de una acción proporcional y una acción integral, su función de transferencia sería de la siguiente manera, [13]:

$$C_{PI}(s) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} \right) \quad (3)$$

Donde

$C_{PI}(s)$  Función de transferencia del controlador PI, adimensional;

$T_i$  Tiempo integral, adimensional.

## Controlador PD

Este tipo de control genera una señal resultante de una acción proporcional y acción derivativo, su función de transferencia sería la siguiente, [13]:

$$C_{PD}(s) = K_p + sK_pT_d \quad (4)$$

Donde

$C_{PD}(s)$  Función de transferencia del controlador PD, adimensional;

$T_d$  Constante llamada tiempo derivativo, adimensional.

## Controlador PID

Este tipo de controlador reúne las ventajas de cada una de las acciones de control de P, I y D explicadas anteriormente, la función de transferencia se detalla a continuación, [13]:

$$C_{PID}(s) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (5)$$

Donde

$C_{PID}(s)$  Función de transferencia del controlador PID, adimensional.

## 10. Componente de sistemas de visión

Los sistemas de visión artificial es una de las etapas más importantes dentro del campo de la inteligencia artificial, ya que gracias a un buen sistema de visión se puede obtener imágenes claras y objetivas para su respectiva descripción y reconocimiento de su contenido. Entre los elementos fundamentales para la captación de imágenes se tiene: tipo de cámaras, iluminación, óptica, entre otros como se puede visualizar en la Figura 7, [14].

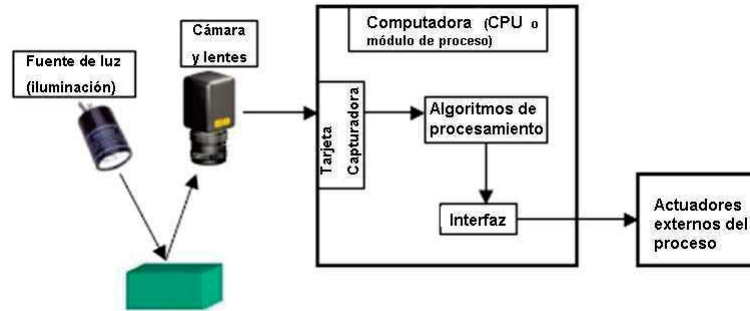


Figura 7: Esquema de un sistema de visión artificial, [15].

### 10.1. Cámaras

El propósito principal de las cámaras es adquirir imágenes o fotos mediante su proyección en un sensor, con el objetivo de transferirlas a un sistema electrónico para su procesamiento correspondiente, en el campo de la visión artificial las cámaras usadas tienen como características principales el control de disparo, sensibilidad, tiempos entre otros. Actualmente en el mercado se encuentra una diversidad de cámaras utilizadas en sistemas de visión artificial, entre las más destacadas se tiene las siguientes, [16]:

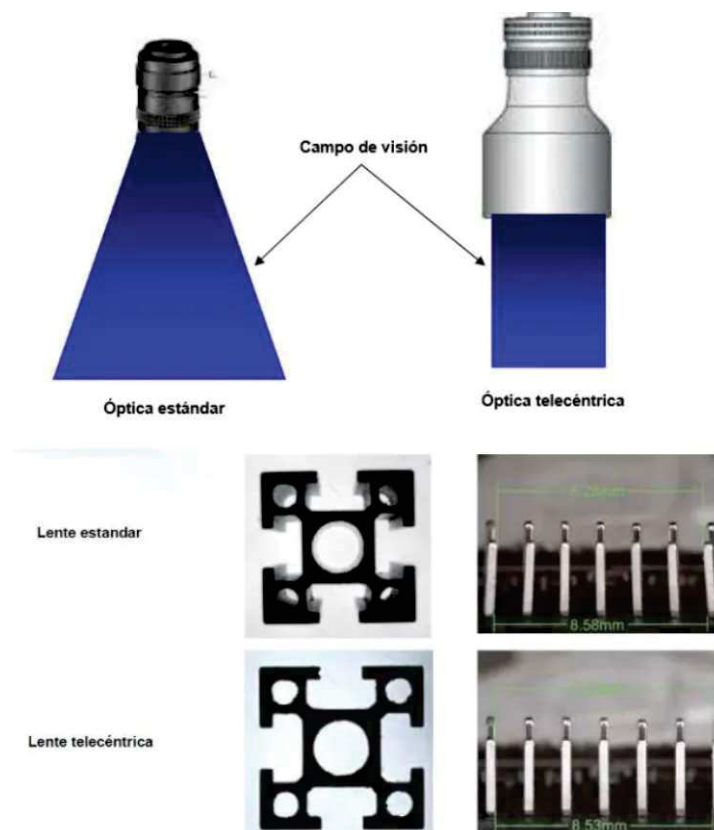
- **Cámaras Matriciales:** Tienen como característica principal su sensor que cubre un área formada por una matriz de píxeles.
- **Cámaras Lineales:** Las cámaras lineales, al contrario, edifican la imagen línea a línea por medio de un barrido del objeto con movimiento longitudinal del objetivo.
- **Cámaras Alta Velocidad:** Como su nombre lo indica son usadas en aplicaciones industriales o científicas, permitiendo capturar imágenes a altas velocidades para pruebas como el estudio de proyectiles o el control de tuberías, entre otras situaciones.
- **Cámaras Inteligentes:** Las cámaras inteligentes además de tener los componentes comunes que contiene las cámaras normales cuentan con un procesador, memoria y en algunos casos un sistema completo de visión artificial que ayuda al procesamiento de las imágenes capturadas [16].

## 10.2. Iluminación

Tiene un papel fundamental en el sistema de visión porque sin iluminación no sería posible reproducir una imagen, su trabajo es guiar la luz hacia un objetivo con el propósito de ser registrada en el sensor de la cámara. El tipo de iluminación depende de varios aspectos como puede ser la intensidad de luz necesaria, color del objetivo, tipo de cámara entre otros, por lo cual, se tiene distintos tipos de iluminación como la luz led, fluorescente, fibra óptica, entre otros.

## 10.3. Óptica

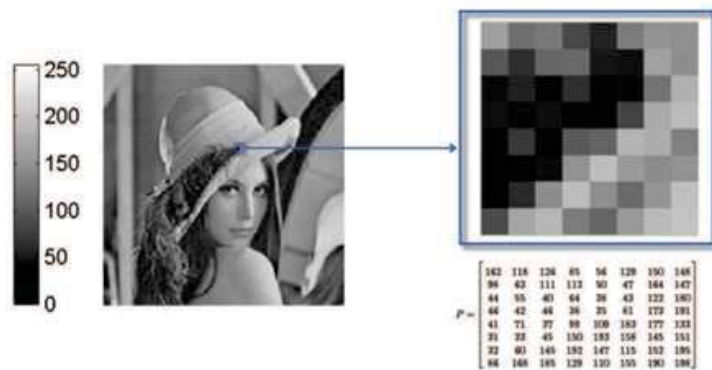
La óptica es un elemento dentro de los sistemas de visión que ayuda a transmitir la luz al sensor de la cámara con el fin de enfocar uno o múltiples objetivos como se puede observar en la Figura 8, [14].



**Figura 8:** Campos de visión, [17].

## 11. Imagen digital

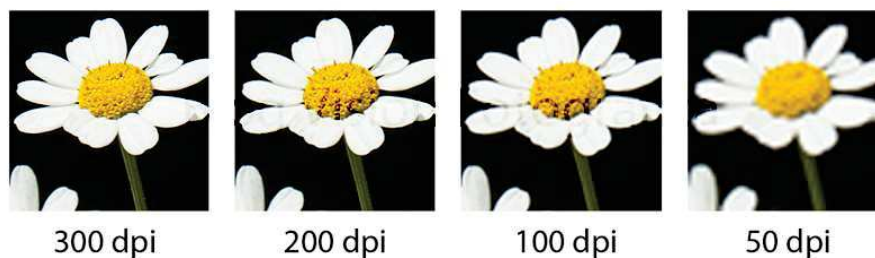
Una imagen digital es una representación de un objeto real que esta definida como una función de dos dimensiones  $f(x,y)$  que interpreta una matriz rectangular de  $M$  filas  $x$  y  $N$  columnas  $y$ , el cual, hace referencia a un pixel de la imagen, la función de dos dimensiones tiene asociado el nivel de color de dicho punto o el nivel de gris como se puede observar en la Figura 9, que indica una imagen con 256 niveles de intensidad, cada punto de los pixeles contiene un número entero que representa el nivel de intensidad luminosa en escala de gris, [18].



**Figura 9:** Imagen digital en escala de gris con 256 niveles de intensidad, [18].

### 11.1. Resolución en una imagen

La resolución en una imagen consiste en el número de píxeles atribuido a cada pulgada que contiene una imagen, medido en píxeles por pulgadas (PPP), es muy importante tomar en cuenta esta característica para obtener detalles y obtener el mayor número de información, [19].



**Figura 10:** Ejemplos de resolución en una imagen, [18].



## 11.2. Imágenes a color

Las imágenes digitales a color se representan por medio de una matriz rectangular de M filas y N columnas que contienen un número específico de píxeles, en este caso cada píxel se describe por medio de modelos de colores, cada modelo tiene una manera diferente de determinar los colores que van a representar una imagen.

Para representar estos colores en cada píxel se analiza por medio de los espacios de color ya que se usa en los sistemas informativos para reproducirlo y crear colores en los monitores, como los modelos más conocidos se tiene los siguientes:

- Modelo RGB (Red, Green Blue): Es un modelo del color basado en la descomposición de la luz en su consecuente espectro luminoso, donde las intensidades de luz se relacionan mediante los colores rojo, verde y azul para crear distintos colores en el píxel como se puede observar en la Figura 11, [20].

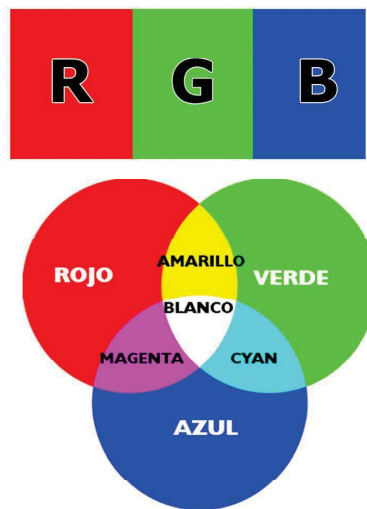


Figura 11: Modelo RGB, [21].

- Modelo HSV: Este modelo trabaja con el tono, la saturación y brillo en un píxel, en la Figura 12 se muestra una representación del modelo.

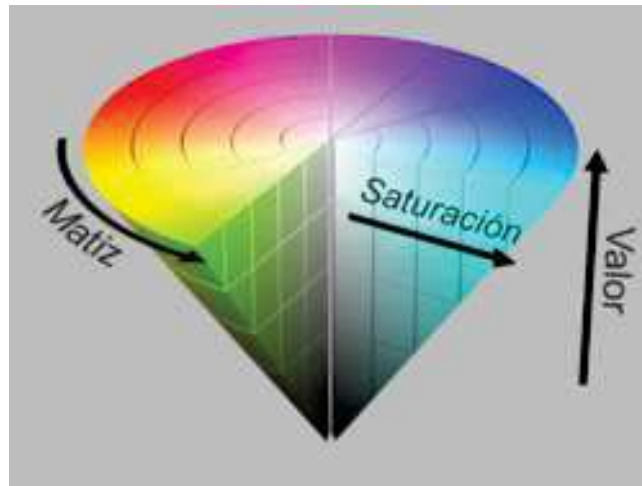


Figura 12: Modelo HSV, [22].

- Modelo HSI: Este modelo trabaja con el tono, saturación y la intensidad el cual se define por medio de la transformación no lineal del espacio de color RGB, en la Figura 13 se muestra una representación del modelo.

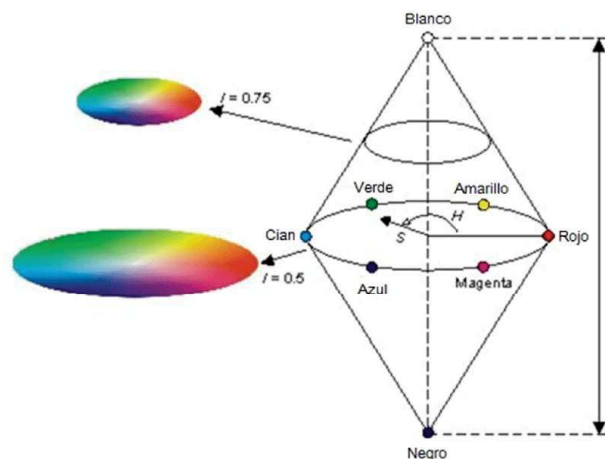


Figura 13: Modelo HSI, [23].

## 12. Filtros y operaciones morfológicas

Para obtener un buen sistema de visión es importante procesar las imágenes recopiladas, se puede dar el caso que por el propio sensor de la cámara, ruidos eléctricos y/o efectos térmicos que las imágenes contengan diversos tipos de ruidos como el ruido aditivo, multiplicativo y el ruido sal y pimienta que afecten en la calidad de la imagen, por ende en el procesamiento de la imagen. Por lo cual, se debe conocer los diversos tipos de filtros para su posterior aplicación de operaciones morfológicas que ayuden a simplificar y

conservar las principales características de los objetivos las imágenes recopiladas, [24].

### 12.1. Eliminación de ruido

Para conseguir la eliminación del ruido en las imágenes recopiladas, se tiene dos tipos de técnicas que se clasifican en globales y locales.

- Técnicas globales: Trabajan en toda la imagen por medio de un análisis general de la imagen y procesamiento en el dominio de la frecuencia.
- Técnicas locales: Por el contrario no consideran toda la imagen, operan en un punto que depende de los puntos de su vecindario y se los realiza por medio de filtros lineales y no lineales, [25].

### 12.2. Operaciones morfológicas

Las operaciones morfológicas se basan en las operaciones de teoría de conjuntos como la unión, la intersección, complemento y diferencia como se puede apreciar en la Figura 14.

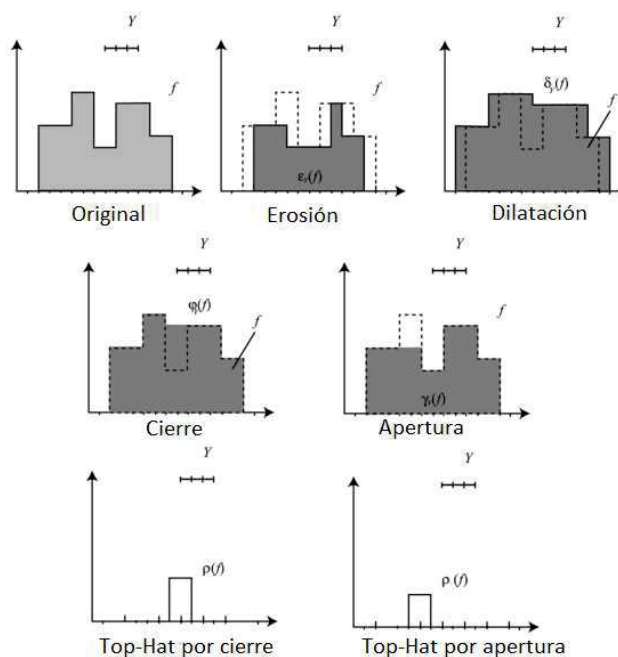


Figura 14: Tipo de operaciones morfológicas, [24].

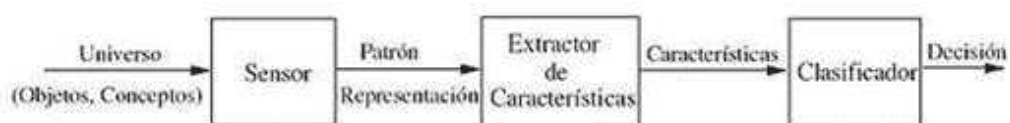
Este tipo de operación ayuda a realizar diferentes tipos de trabajos como el recalcar la estructura de un objeto, el preprocesamiento de imágenes y la descripción detallada de un objeto por su área, perímetro, entre otros. Las operaciones morfológicas más aplicadas en imágenes binarias y en imágenes de escala de grises se tiene la erosión, dilatación, apertura y cierra con el fin de extraer fronteras, contornos, adelgazamiento y engrosamiento del objetivo.

### 13. Reconocimiento de patrones

El reconocimiento de patrones se ha caracterizado por ser la ciencia que tiene como objetivo la clasificación de objetos en ciertas clases o categorías, formando parte de conjunto de Machine Learning y por ende dentro de la Inteligencia Artificial. El reconocimiento de patrones es muy usado para dar solución a problemas de agrupación de objetivos, escaneo de colores, iris entre otros. La función principal como su nombre lo indica es la lectura e identificación de patrones o figuras, esto se lo puede lograr por varias técnicas como las que se presentan a continuación, [26]:

- Reconocimiento estadístico de patrones.
- Reconocimiento sintáctico de patrones.
- Reconocimiento lógico combinatorio de patrones.
- Redes neuronales.

Estos reconocimientos de patrones tienen como finalidad emular la inteligencia para tener fundamentos en la clasificación de un problema. Por lo que es importante conocer que el proceso total del reconocimiento de patrones que inicia con la adquisición de datos, extracción de características y la toma de decisiones como se observar en la Figura 15.



**Figura 15:** Diagrama de bloques para un proceso de reconocimiento de patrones, [27].

## **14. Visión por computadora**

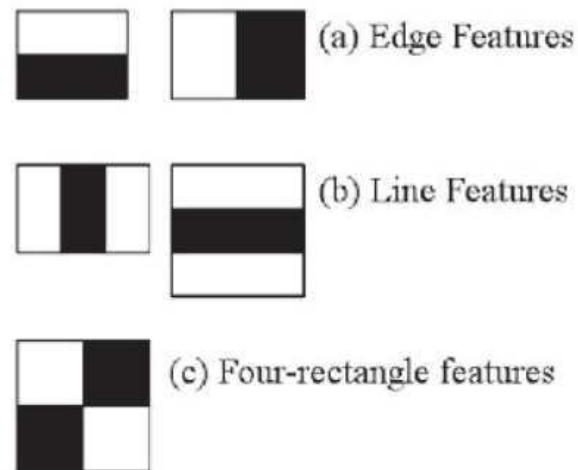
La principal funcionalidad de la visión por computadora consiste en la imitación de la tarea de un sistema de visión, es decir, reconocer objetos, rostros, autos, entre otros. Es una tarea compleja que se ha venido desarrollando desde hace varios años por medio de investigaciones y pruebas con la finalidad de que una computadora sea capaz de detectar o reconocer con precisión algún objeto, para cumplir con este trabajo la visión por computadora tiene que pasar por una serie de procesos como la extracción de características y la respectiva clasificación, [28].

### **14.1. Extracción de características**

Se conoce que una imagen tiene una gran cantidad de características las cuales pueden ser relevantes e irrelevantes para el trabajo que se desee obtener, por lo que el primer paso consiste en reducir la imagen y extraer la información más relevante, a continuación se presenta algunos métodos para este proceso.

#### **Filtro en cascada**

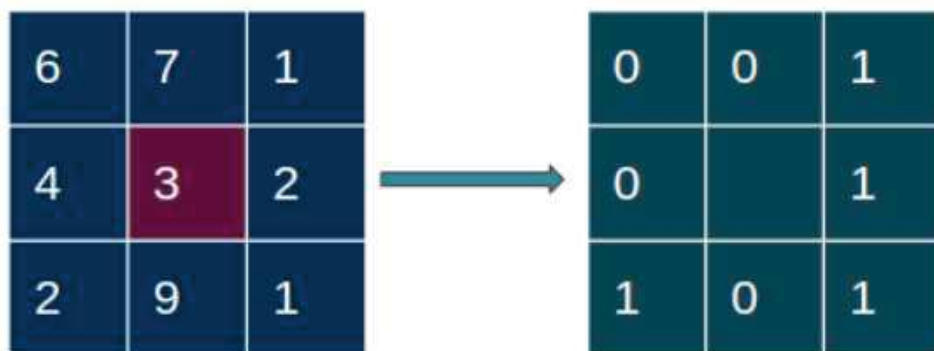
Este método fue propuesto por Paul Viola y Michael Jones el cual utilizaba clasificadores en cascada apoyando en características Haar. Como se puede observar en la Figura 16 cada ventana se coloca en la imagen de entrada extrayendo una característica, el cual se obtiene a partir de la diferencia en la suma de los valores de los píxeles de la región negra y blanca, [28].



**Figura 16:** Filtro en cascada, [28].

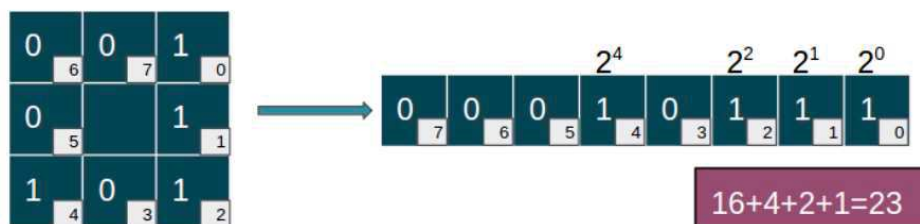
### Patrones binarios locales LBP

Los patrones binarios locales se lo denomina como un descriptor de texturas que se construye comparando cada píxel con los píxeles vecinos, si la intensidad de un píxel vecino es superior al píxel central, se le aplica un peso de 0 para el píxel vecino, de lo contrario se aplica un peso de 1 como se puede observar en la Figura 17, [28].



**Figura 17:** LBP operando en un vecindario, [28].

Una vez obtenido una matriz en binarios se ordena y se calcula el valor del píxel central como se puede observar en la Figura 18, para finalizar se calcula el histograma de características con el fin de detectar patrones de textura y con ello realizar un proceso de clasificación.



**Figura 18:** Vector binario de LBP, [28].

## Histograma de gradientes orientados HOG

Los histogramas de gradientes orientados es un descriptor de características, este proceso se centra en la estructura o la forma del objeto, cuenta las ocurrencias de la orientación de gradiente en partes localizadas de una imágenes.

## 15. Sistemas embebidos y microcontroladores

Los sistemas embebidos o empotrados son sistemas computaciones que permiten realizar varias aplicaciones dedicadas, ser sistemas autónomos que trabajan por sí solo, una diferencia que se puede destacar entre un ordenador y un sistema embebido se da en la búsqueda de la optimización de espacio y sus características técnicas, [29].

## 16. Trabajos existentes

En la actualidad se ha evidenciado diferentes tipos de carros de supermarket que tienen como objetivo principal el brindar una gran comodidad al momento de realizar compras, se ha visto una gran variedad de modelos, características y marcas. En la Tabla 1, se presentan productos similares en donde se incluyen proyectos de investigación (Tesis), así como también productos comerciales que ofrecen servicios similares a los requeridos en este proyecto.

**Tabla 1:** Proyectos similares existentes.

Producto	Medida de la canasta	Capacidad de carga	Velocidad	Tipo de sensor	Controlador
Carro de supermercado por medio de sensor ultrasonido (Investigación)	Alto=500mm Ancho=540mm Largo= 630mm	80kg	1,36m/s	Sensor ultrasonido	Pic18f4550, [30]
Carro común de Supermercado (Comercio)	Alto=1,005mm Ancho=515mm Largo=570mm	180kg	Depende del usuario	N/A	N/A , [31].
Carro motorizado (Comercio)	Alto=381mm Ancho=508mm Largo=609,6mm	50kg	0,84m/s	N/A	N/A , [4].
Carro de la compra autónomo ROBOT MÓVIL ELI	Alto=1,122mm Ancho=680mm Largo=1,172mm	80kg	1,25m/s	Reconocimiento de voz y visión artificial	CPU ROS, [32]

## 17. Análisis y selección de alternativas

Como se puede observar en la Tabla 1 es importante analizar alternativas que asegure el funcionamiento del robot móvil bajo a los alcances del prototipo.

### 17.1. Análisis de alternativas del material para la estructura principal

La estructura debe contener un material resistente, económico y un alto nivel de solubilidad, por esta razón, se analizan tres tipos de materiales que son utilizados en los supermercados del país, a continuación se establecen los siguiente criterios para su selección.

Como se puede observar en la Tabla 2 se asigna el valor que tiene cada peso para posteriormente asignar un peso a cada criterio de los materiales seleccionados como se observa en la Tabla 3.

- Criterio 1: El peso del prototipo debe ser lo más liviano posible con el fin de evitar un peso innecesario y reducir el torque del motor a elegir.



**Tabla 2:** Criterios de evaluación.

Peso de calificación	Asignación de valores
0	No cumple o no es necesario para el diseño
1	Se puede utilizar en el diseño
2	Cumple con los requerimientos mínimos
3	Es necesario para el diseño
4	Cumple a cabalidad con el diseño

- Criterio 2: Existen varios métodos de manufactura para construir un prototipo y uno de ellos y el más utilizado en el Ecuador es la soldadura, siendo importante encontrar un material que se asemeje a este método.
- Criterio 3: El costo es un factor importante en cualquier proyecto.
- Criterio 4: Como se menciona anteriormente la estructura debe contener un material resistencia con el fin de evitar pandeos, desgastes, entre otros.
- Criterio 5: Es necesario analizar la adquisición del material debido al tiempo, logística y costo que puede ocasionar encontrar, comprar y obtener el material.

**Tabla 3:** Matriz de selección del material de la estructura.

Criterio	Peso (1-4)	Alternativas		
		Acero ASTM A36	Aluminio	Polímeros PU
Peso del Prototipo	4	-1	1	1
Facilidad de Soldadura	3	1	0	0
Costo	4	1	1	0
Características mecánicas	3	1	-1	0
Adquisición	3	1	0	-1
Suma Positiva		13	8	4
Suma Negativa		4	3	3
Suma General		9	5	1

En el mercado se encuentran diferentes carros de supermercado según su material, entre los más usados se encuentra estructuras de acero, aluminio y polipropileno, en este caso se decidió usar el acero por encima del polipropileno y del aluminio como se puede observar en la Tabla 3 por diferentes razones que se detallan a continuación:

- El acero tiene una buena relación resistencia/ volumen lo que con lleva obtener una estructura más ligera con una alta resistencia.

- En el mercado se puede obtener diferentes piezas estandarizadas para la construcción y diseño del carro de supermercado.
- Aunque el polipropileno contiene una gran resistencia mecánica su proceso de fabricación para una estructura se lo realiza igual que los procesos de transformación de plásticos, esto quiere decir por medio de moldeo por inyección, moldeo por extrusión o moldeo por soplado por lo que esto con lleva más tiempo de trabajo para el obtener una estructura de polipropileno a diferencia del acero que tiene la capacidad de formar diversas estructuras por medio de soldadura, dobles, atornillado entre otros.

En el mercado ecuatoriano se puede observar un alto dominio del Acero A36 como el acero estructural más vendido en la mayoría de los catálogos de diversas empresas de venta de acero, por lo que, se decide usar este tipo de acero para la estructura del carro de supermercado, en la Tabla 4 se puede observar las propiedades mecánicas del acero antes mencionado.

**Tabla 4:** Propiedades mecánicas acero A36, [33].

Propiedades Mecánicas	Acero A36
Soldabilidad	Alto
Alargamiento de rotura en 50mm (Ductilidad)	23 %
Masa Nominal	0,34kg/m
Esfuerzo de Fluencia	500MPa
Coefficiente de Poisson	0,26

## 17.2. Análisis y selección del controlador

El controlador debe utilizar un lenguaje de programación que permita el uso de procesamiento de imágenes y al menos dos tipos de señales y una de comunicación: 10 pines digitales, 2 modulación por ancho de banda (PWM), 1 bus universal en serie (USB). En este caso se compara tres controladores programables que puede ser candidatos directos para el uso de este prototipo, como primera opción se tiene la placa de microcontrolador Arduino, Raspberry Pi zero 2 y el Raspberry Pi 4, a continuación en la Tabla 5 se presenta sus principales características.

**Tabla 5:** Alternativas de controladores programables.

Modelo	Arduino, [34]	Raspberry Pi Zero 2, [35]	Raspberry Pi 4, [36]
Microcontrolador	ATMega328P	Procesador Cortex-A53	Procesador ARM Cortex-172
Voltaje de funcionamiento	5V	5V	5V
Voltaje de entrada	7 – 12V	5V	5V
Pines E/S Digitales	14 pines de los cuales 6 proporcionan salida PWM	24 pines digitales, 2 salidas PWM, 4 puertos USB (Módulo extra)	24 pines digitales, 2 salidas PWM, 4 puertos USB
Lenguaje de programación	C++	Python, C++, Java entre otros	Python, C++, Java entre otros
Precio	\$15	\$60	\$120

Como se puede observar en la Tabla 5 el modelo que cumple completamente con todos los requisitos es el Raspberry Pi 4 gracias a los puertos USB que vienen integrados en la placa y su variedad de lenguajes de programación, el controlador programable Arduino no cuenta con puertos USB y tampoco con el lenguaje Python que es fundamental para el desarrollo del procesamiento de imágenes, aunque el Raspberry Pi Zero 2 es una excelente opción por su precio y su variedad de lenguajes de programación la disponibilidad en el mercado ecuatoriano es nula, además, es necesario el uso de un módulo que agregue puertos USB.

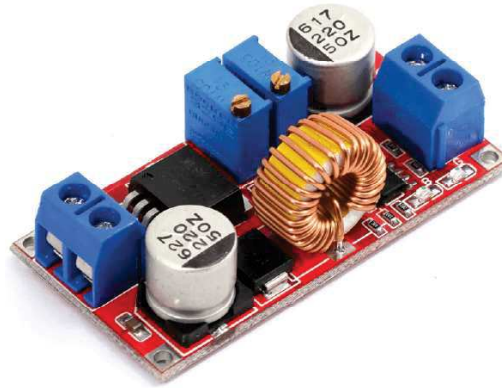
### 17.3. Análisis y selección del regulador de voltaje

Es importante que el regulador de voltaje sea capaz de alimentar y suministra la corriente necesaria del Raspberry Pi 4, el regulador de voltaje debe soportar una entrada con un mínimo de 24V y una corriente de salida de 3,5A, en la Tabla 6 se muestra diferentes alternativas.

**Tabla 6:** Alternativas de regulador de voltaje.

Modelo	Voltaje de entrada	Voltaje de salida	Corriente de salida	Precio
XL4015 [37]	5 – 32V	0,8 – 30V	5A	\$5
UCTRONICS Módulo convertidor [38]	9 – 24V	5,2V	6A	\$15
DROK Regulador de voltaje [39]	6 – 36V	0,6 – 36V	5A	\$27

Como se puede observar en la Tabla 6 todos los reguladores son aptos para el uso en este prototipo pero se decide utilizar el modelo XL4015 debido a su reducido precio a comparación de los otros modelos, en la Figura 19 se puede apreciar dicho componente.



**Figura 19:** Modelo XL4015, [40].

#### 17.4. Análisis y selección de los sensores

##### Sensor de distancia

El prototipo debe tener un sensor que pueda medir las distancia con el objetivo de ayudar al prototipo a evitar colisión con objetos u obstáculos, en este caso se puede usar sensores ultrasónicos, inductivos o infrarrojos, cabe recalcar que, es importante tener un rango de proximidad dentro de 10cm a 1m, en la Tabla 7 se analiza los principales sensores que permitan medir la distancia.

**Tabla 7:** Alternativas sensores de distancia.

Modelo	HCSR04 [41]	Sensor IR [42]	Sensores Inductivos [43]
Rango de distancia	1,7cm – 4,5m	2cm – 15cm	20mm – 55mm
Tensión de funcionamiento	5V	3,3 – 5V	5V
Salida digital o analógica	Digital	Digital	Digital

Como se puede observar en la Tabla 7 el modelo HCSR04 tiene un amplio rango de distancia el cual sobrepasa los 15cm que el sensor IR (Infrarrojo) ofrece, mientras que el sensor inductivo solo ofrece un rango máximo de 55mm por lo que queda descartado, ya que la tensión de funcionamiento y el tipo de salida es similar en los tres modelos se concluye

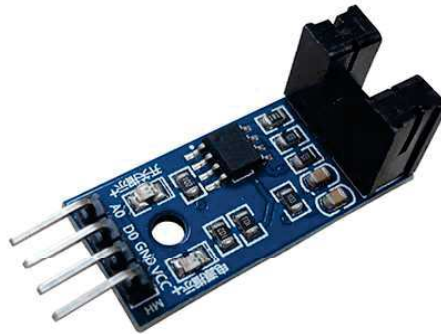
que el sensor más adecuado para este prototipo es el módulo HCSR04 (sensor Ultrasónico) como se puede apreciar en la Figura 20.



**Figura 20:** Sensor ultrasonico HC-SR04, [41].

### **Sensor de posición**

Además del sensor de distancia se requiere un sensor que permita conocer la posición o la velocidad de los motores, es decir, se debe utilizar un sensor que pueda contar a partir de un movimiento rotacional de su eje convirtiendo en impulsos eléctricos de onda cuadrada o sinusoidal. Se tiene dos opciones que cuenta con las mismas características con la diferencia de que el primero es el sensor óptico el cual se debe complementar con un pequeño circuito y el segundo es un módulo con el mismo sensor el cual ya se implementa directamente, por lo que, se decide usar el módulo Infrarrojo FC-03 (MOCH22A) como se puede apreciar en la Figura 21.



**Figura 21:** Sensor infrarrojo FC-03, [44].

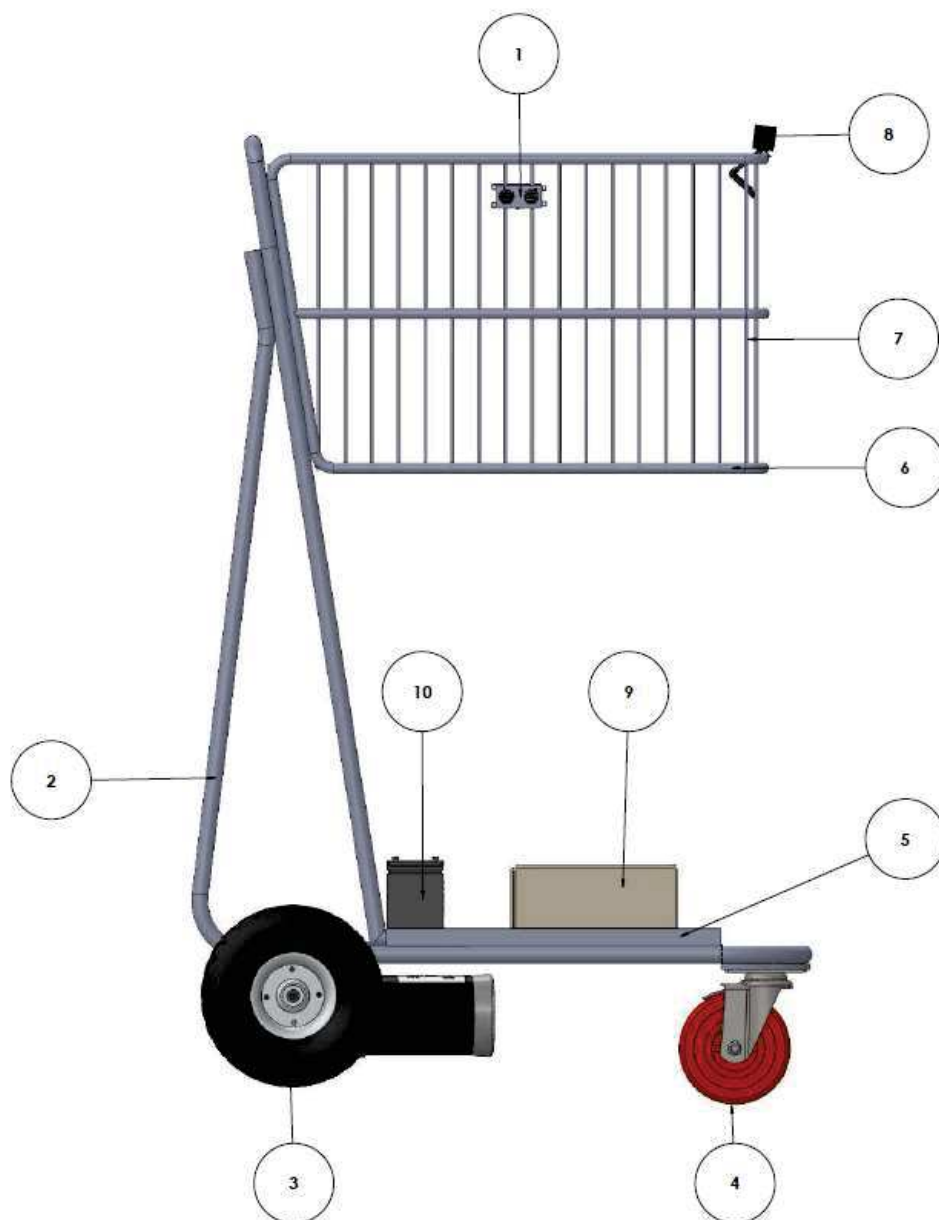
## 18. Diseño mecatrónico

En esta sección se presenta la parte mecánica, electrónica e informática necesario para la construcción y programación del prototipo de carro asistente de compra, en la Tabla 8 se presenta los parámetros de funcionamiento del prototipo, cabe recalcar que los siguientes parámetros se sustenta en el estudio analizado en las secciones anteriores.

**Tabla 8:** Parámetros principales de diseño.

Parámetro	Requerimiento
Capacidad máxima de carga	40kg
Velocidad máxima del carro de compras	0,83m/s
Referencia del sistema de visión artificial	Chaleco característico con forma y color
Tiempo de funcionamiento	1h
Terreno de movilización	Hormigón
Tipo de alimentación	Batería: 24V, mínimo de 10,7Ah

En referencia a los parámetros de diseño se procede a realizar un modelo en 3D del carro de supermercado como se puede observar en la Figura 22, en la Tabla 9 se describe los elementos principales que contiene el carro de supermercado.



**Figura 22:** Modelo 3D del carro de supermercado.

**Tabla 9:** Elementos principales de diseño.

Numeración	Etiqueta
1	Sensor Ultrasónico
2	Estructura, apoyo del carro de supermercado
3	Llantas de 8"
4	Ruedas locas de 5"
5	Placa metálica para soporte de componentes
6	Estructura, soporte de canasta
7	Estructura, canasta
8	Cámara
9	Caja de control de componentes
10	Batería

### 18.1. Necesidades y parámetros de diseño

- Los motores del carro de supermercado debe caracterizarse por tener un torque que supere la masa máxima de 40kg de las compras del usuario y la estructura, como se observa en la Tabla 1, el carro de supermercado motorizado tiene una capacidad de carga de 50kg, por lo que se emplea una capacidad similar a los carros de compras para personas con movilidad reducida siguiendo esa categoría.
- La velocidad promedio de las personas es de 0,83m/s recordando que este prototipo se diseña para personas con movilidad reducida, personas embarazadas entre otros, se decide que la velocidad máxima que tendrá el carro de supermercado no debe de superar los 0,83m/s, en la Tabla 1 se observa que el carro motorizado tiene una velocidad de 0,84m/s.
- Para que el carro de supermercado siga al usuario es fundamental el uso de un chaleco característico con forma y color.
- La estructura de la canasta del prototipo debe soportar la masa de 40kg.

## 19. Diseño mecánico

En esta sección contempla el diseño de la estructura, con diferentes números y tipos de apoyos con múltiples reacciones y cargas, además del diseño de soldadura del soporte y fondo de la canasta y el torque necesario para desplazar la estructura con una masa máximo de 40kg de compras.

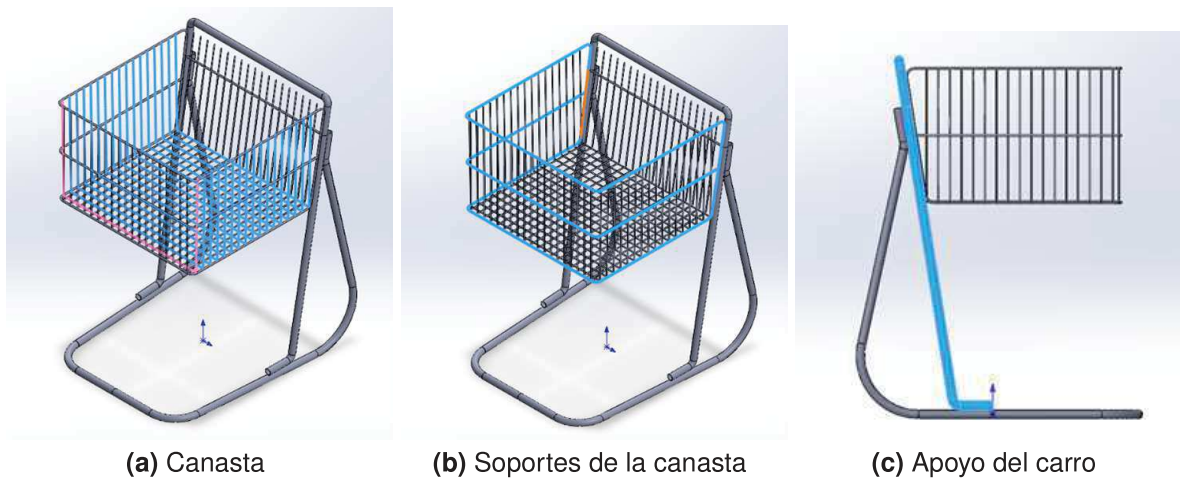
### 19.1. Estructura principal del prototipo

El diseño de la estructura principal del prototipo considera la selección del material, el diámetro de las varillas, tubos y del diseño de soldadura, siendo la selección del material fundamental para el prototipo ya que va conectado a todos los componentes electrónicos y mecánicos para cumplir con su objetivo y soportar la masa máximo de los productos que introduzca el usuario.



## 19.2. Dimensionamiento del diámetro de varillas y tubos de la estructura

Una vez seleccionado el tipo de material para la estructura y el peso máximo que soportará el carro de supermercado se procede a dimensionar los diámetros de cada una de las partes de su estructura, este análisis divide la estructura en 3 partes, primero se analiza el diámetro de la varilla del fondo de la canasta, segundo el diámetro de las varillas que soporta la canasta y por último el diámetro del tubo de los apoyos del carro de supermercado, en los tres casos se analiza las fuerzas de reacción, con sus respectivos diagramas de cortantes y momentos.



**Figura 23:** Estructuras a analizar del carro de compras.

De acuerdo con la Figura 23a y la Tabla 10, se puede determinar el diámetro de las varillas del fondo de la canasta que se representa con una carga puntual con dos soportes a cada extremo de la varilla, como se puede observar en la Tabla 10 se utiliza un factor de seguridad para una mayor confianza en la selección de los diámetros de cada parte de la estructura debido a que se debe tomar en cuenta un masa adicional que el usuario puede colocar sin darse cuenta, de acuerdo con [45] se puede utilizar un factor de seguridad de 1,25 – 2 para el diseño de estructuras con cargas estáticas, la masa que soporta la canasta es de 40kg como se tenía establecido al inicio del proyecto. El diseño de la estructura como las longitudes de las varillas se basan en medidas similares de carro de supermercado motorizados debido a que el usuario puede colocar en la canasta productos de poco volumen pero con una masa considerable y de igual manera productos de un volumen considerable pero con una masa reducida.

El esfuerzo permisible que se utiliza para dimensionar el diámetro se encuentra con (6) y con la Tabla 4, cabe recalcar que se usa un factor de 0,6 debido a que se calcula por medio de la tensión permisible, [46].

$$\sigma_{perm} = 0,6 \cdot S_y \quad (6)$$

$$\sigma_{perm} = 300\text{MPa}$$

Donde:

$\sigma_{perm}$  Esfuerzo permisible, en MPa;

$S_y$  Resistencia a fluencia del Acero A36, en MPa.

**Tabla 10:** Datos iniciales para el dimensionamiento de las varillas de la canasta.

Designación	Variable	Valor
Masa que soporta la canasta	$m_c$	40kg
Factor de seguridad	$f_s$	1,25
Esfuerzo permisible	$\sigma_{perm}$	300MPa
Longitud de la placa	$l_c$	556mm
Número de varillas	$\#v$	15
Diámetro mínimo de la varilla	$H$	-

Para obtener el peso que soporta las varillas como se indica en la Tabla 10 es importante tomar en cuenta el factor de seguridad y la masa total como se observa en la ecuación 7.

$$P_1 = f_s \cdot m_c \cdot g \quad (7)$$

Donde:

$P_1$  Peso que soporta la varilla, en N;

$m_c$  Masa que soporta la varilla, en kg ;

$f_s$  Factor de seguridad para el diseño de estructuras estáticas, adimensional;

$g$  Gravedad, en  $\frac{m}{s^2}$ .

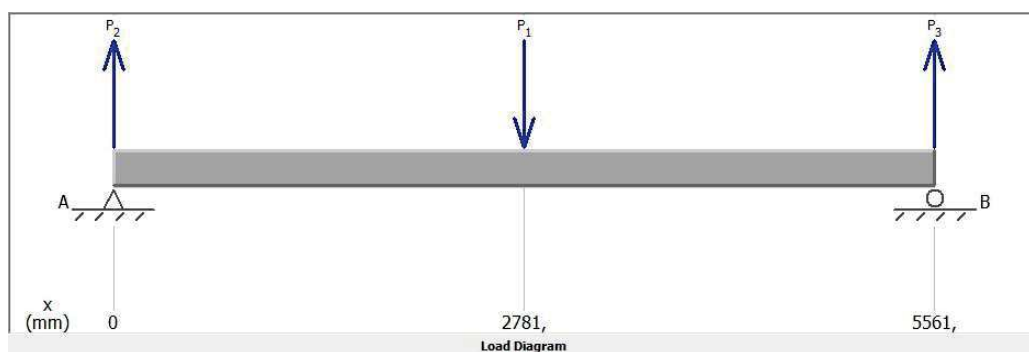
$$P_1 = 1,25 \cdot 40\text{kg} \cdot 9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$P_1 = 490\text{N}$$

En la Figura 24 se representa los apoyos y la fuerza a estudiar, en la Figura 25 se muestra un diagrama de cuerpo libre de la varilla del fondo de la canasta en este caso como se mencionó anteriormente se representa por medio de dos soportes a los extremos y una carga puntual en el centro de la varilla, cabe recalcar que se utiliza una carga puntual con el fin de dimensionar el diámetro de la varilla con el caso más crítico.



**Figura 24:** Representación de los apoyos y fuerza de la varilla de la canasta.



**Figura 25:** Diagrama de cuerpo libre de la varilla de la canasta.

Con (8) se calcula las reacciones en cada apoyo A y B como se puede observar en la Figura 25, con el fin de encontrar su diagrama de fuerzas cortante y diagrama de momentos flectores.

$$A = B = \frac{P_1}{2} \quad (8)$$

Donde:

$R_A$  Reacción en el apoyo A, en N;

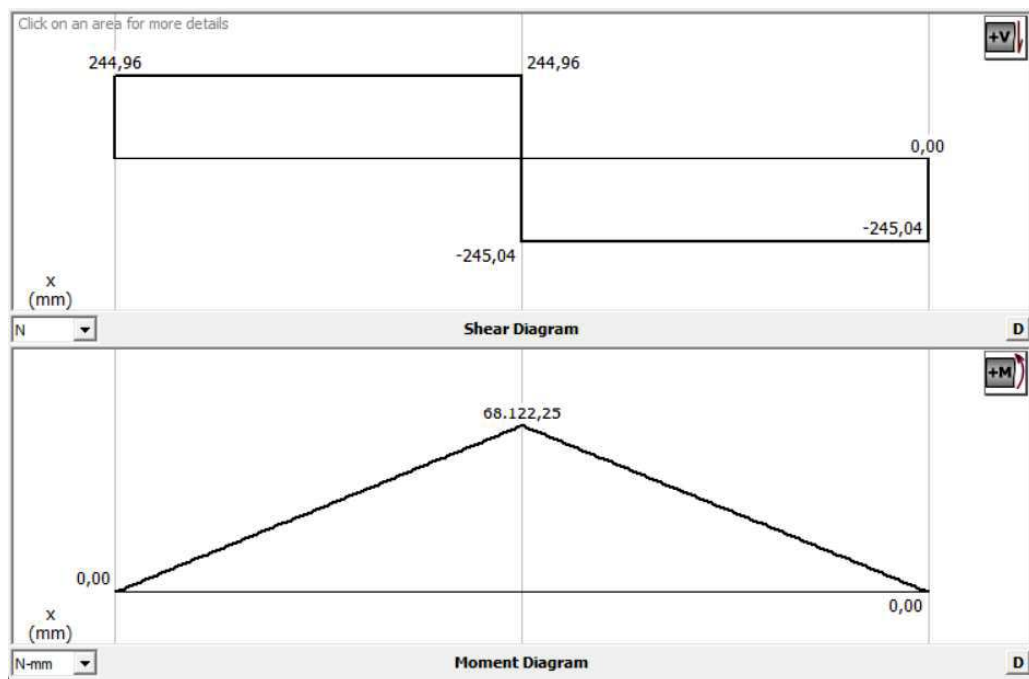
$R_B$  Reacción en el apoyo B, en N;

$P_1$  Fuerza apoyada sobre la varilla, en N.

$$R_A = R_B = \frac{490\text{N}}{2}$$

$$R_A = R_B = 245\text{N}$$

Por medio del resultado de (8) se dibuja los diagramas de fuerzas cortantes y momentos flectores como se muestra en la Figura 26, se determina que la fuerza cortante  $V = 245\text{N}$  y momento de reacción  $M = 68122,25\text{N}/\text{mm}$  como se puede identificar en su respectivos diagramas.



**Figura 26:** Diagrama de fuerzas cortantes y momentos flectores en la varilla del fondo de la canasta.

Se conoce que el momento máximo es de  $68122,25\text{N}/\text{mm}$ , y con este dato se procede

a encontrar el diámetro mínimo que debe tener cada varilla para garantizar que no sufra ninguna falla al momento de soportar la carga máxima, ya que las varillas se encuentran con una separación reducida, se analiza como un placa con una base  $B_c$  de 500mm, el cual, es la longitud del fondo horizontal de la canasta con el fin de encontrar su altura que se representará como el diámetro de las varillas, con (12) se compara si el esfuerzo de trabajo es menor al trabajo permisible.

$$I_1 = \frac{B_c \cdot H^3}{12} \quad (9)$$

Donde:

$I_1$  Segundo momento de inercia la sección transversal, en  $\text{mm}^4$ ;

$B_c$  Base de la sección del fondo de la canasta, en mm;

$H$  Diámetro de la sección del fondo de la canasta, en mm.

$$S = \frac{B_c \cdot H^2}{6} \quad (10)$$

Donde:

$S$  Módulo de sección de la placa, en  $\text{mm}^3$ .

$$\sigma_{max1} = \frac{M_1}{S} \quad (11)$$

Donde:

$\sigma_{max1}$  Esfuerzo de trabajo, en MPa;

$M_1$  Momento flector máximo del fondo de la canasta, en MPa.

Remplazando (10) en (11) se obtiene lo siguiente:

$$\sigma_{max1} = \frac{M_1 \cdot 6}{B_c \cdot H^2} \quad (12)$$

Con (13) se remplaza los datos y se compara con el esfuerzo permisible del material para determinar el diámetro mínimo, es importante recordar que el esfuerzo de trabajo debe ser

menor al esfuerzo permisible.

$$\sigma_{max1} < \sigma_{perm}$$

$$\frac{68122,25\text{N/mm} \cdot 6}{B_c \cdot H^2} < 300\text{MPa}$$

$$H > 1,65\text{mm}$$

De acuerdo con la Figura 23b y la Tabla 11, se puede determinar el diámetro de las varillas que soporta la canasta el cual se representa con una carga puntual en voladizo, debido a que extremo de la varilla esta soldada al apoyo del carro de supermercado, cabe recalcar que la longitud del diseño de la varilla del soporte de la canasta es de 500mm, similar al análisis la carga se puede distribuir por el numero de varillas que soportaran el los 40kg en este caso se divide a 6 varillas.

**Tabla 11:** Datos iniciales para el dimensionamiento de soporte de la canasta.

Designación	Variable	Valor
Masa que soporta la canasta	$m_c$	40kg
Factor de seguridad	$f_s$	1,25
Esfuerzo permisible	$\sigma_{perm}$	300MPa
Longitud de la varilla	$l_s$	500mm
Número de varillas	$\#v_s$	6
Masa que soporta cada varilla	$m_{vs}$	6,67kg
Diámetro mínimo de la varilla	$d_2$	-

Para obtener el peso que soporta cada varilla como se indica en la Tabla 11 es importante tomar en cuenta el factor de seguridad y la masa total como se observa en la ecuación 13.

$$P_2 = f_s \cdot m_{vs} \cdot g \quad (13)$$

Donde:

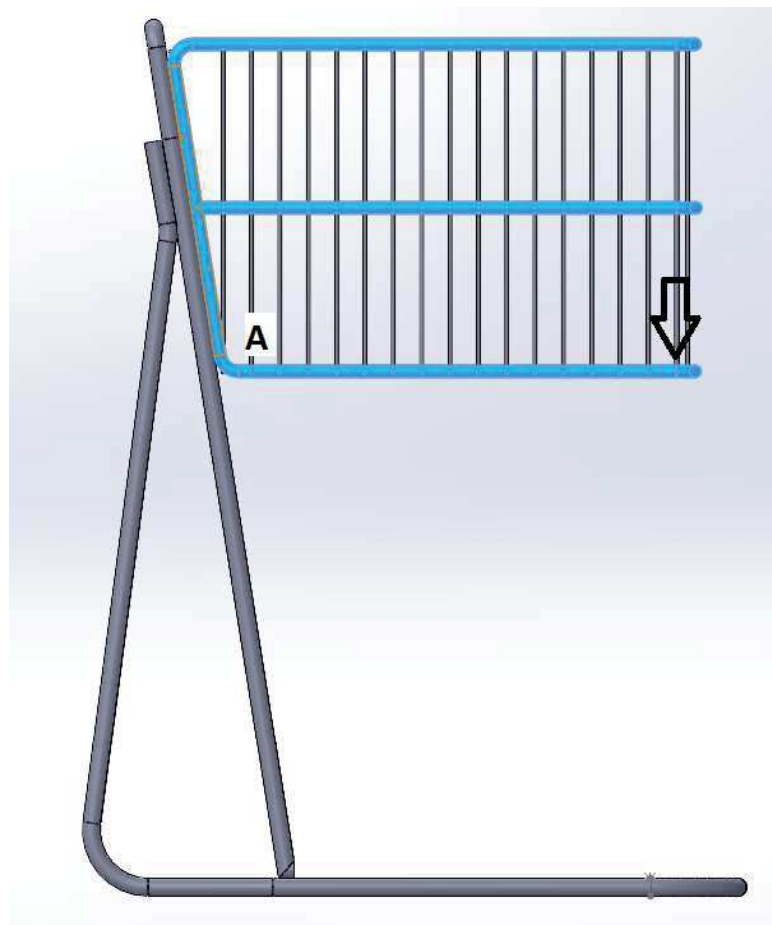
$P_2$  Peso que soporta cada varilla, en N;

$m_{vs}$  Masa que soporta cada varilla, en kg.

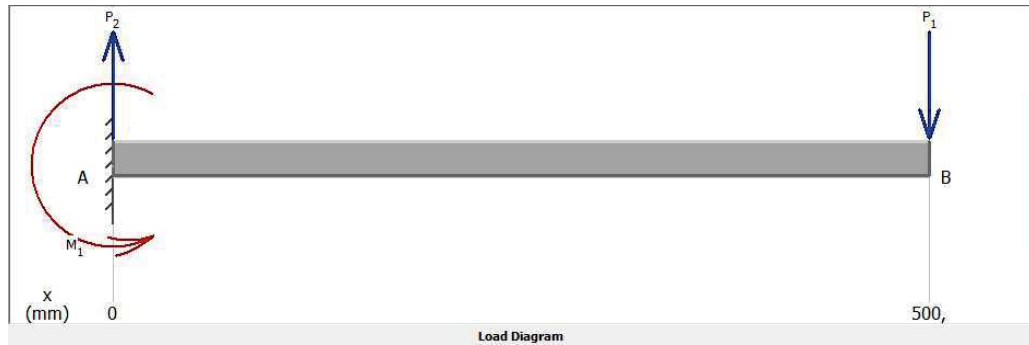
$$P_2 = 1,25 \cdot 6,67\text{kg} \cdot 9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$P_2 = 81,67\text{N}$$

En la Figura 27 se representa el apoyo y la fuerza a estudiar, en la Figura 28 se muestra un diagrama de cuerpo libre de la varilla de soporte de la canasta con (14) se puede encontrar el momento flector máximo como se puede observar en la Figura 29.



**Figura 27:** Representación de la varilla de soporte de la canasta



**Figura 28:** Diagrama de cuerpo libre la varilla de soporte de la canasta

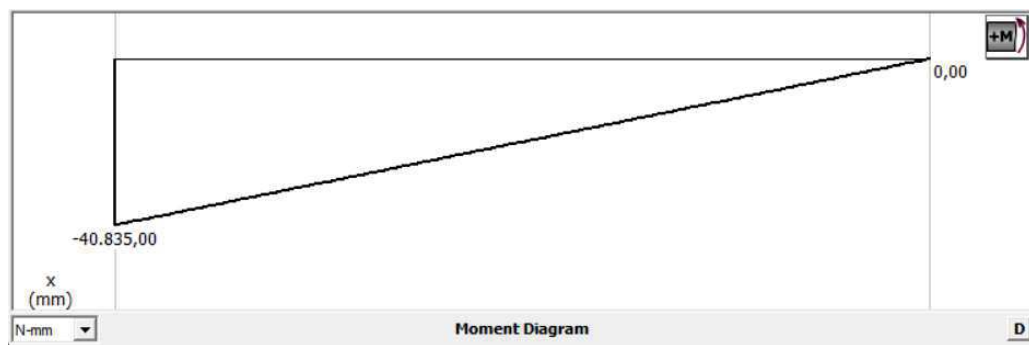
$$M_s - 500 \cdot P_2 = 0 \quad (14)$$

Donde:

$M_s$  Momento flector máximo del soporte, en MPa.

$$M_s = 500 \cdot 81,67N$$

$$M_s = 40835N/mm$$



**Figura 29:** Diagrama de momento flector de la varilla de soporte de la canasta.

Se conoce que el momento máximo es de 40835N/mm por lo que se procede con (15) ) a encontrar el diámetro mínimo reemplazando los datos y comparando con el esfuerzo permisible del material.

$$\sigma_{max2} = \frac{M_s \cdot 32}{\pi \cdot d_2^3} \quad (15)$$

Donde:

$\sigma_{max2}$  Esfuerzo de trabajo de la canasta, en MPa;



$d_2$  Diámetro mínimo del soporte de la canasta, en mm.

$$\frac{40835\text{Nmm} \cdot 32}{\pi \cdot d_2^3} < 300\text{MPa}$$

$$d_2 > 11,15\text{mm}$$

Finalmente, con la Figura 23c y la Tabla 12, se puede determinar el diámetro de los tubos que representa los apoyos del carro de supermercado, en este caso se debe interpretar una carga distribuida en la longitud del tubo debido a que no se puede representar por medio de una carga puntual, debido que la masa se distribuye entre el soporte del tubo, por lo que, se decide dividir la masa en toda la longitud en la que afecta la masa en el tubo, encontrando una carga distribuida como se puede analizar con (16).

En este caso como se analiza un diámetro exterior e interior se procede a calcular el módulo de resistencia de la sección con el fin de encontrar en catálogos ecuatorianos una medida que se aproxime al módulo de resistencia de la sección similar.

$$W_1 = \frac{P_3}{l_3} \quad (16)$$

Donde:

$W_1$  Peso distribuido en cada tubo, en N · mm;

$P_3$  Peso que soporta cada tubo, en N;

$l_3$  Longitud de la carga distribuida, en mm.

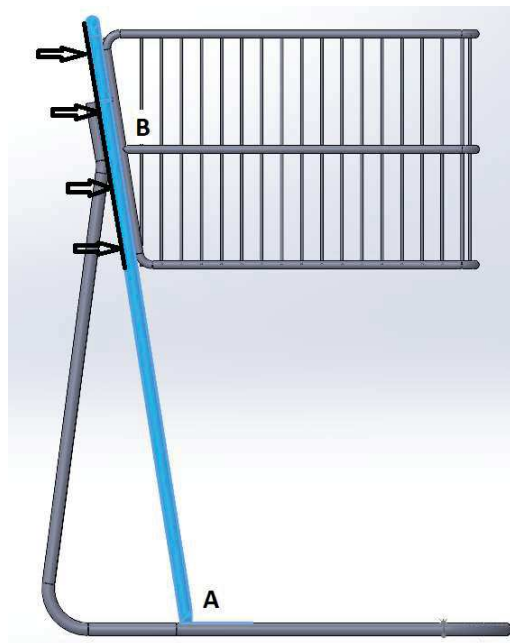
$$W_1 = \frac{245\text{N}}{350,14\text{mm}}$$

$$W_1 = 0,7\text{N/mm}$$

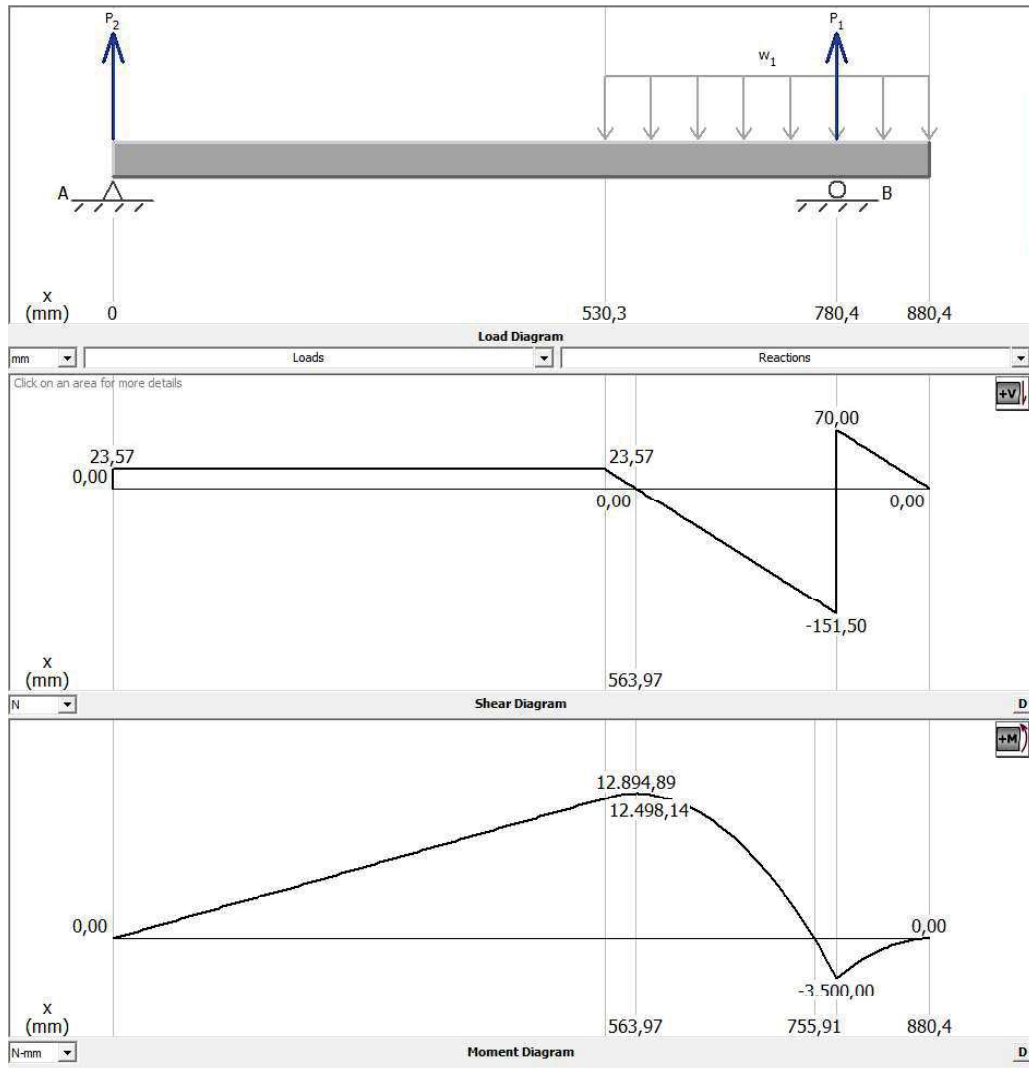
**Tabla 12:** Datos iniciales para el dimensionamiento de los apoyos del carro de supermercado.

Designación	Variable	Valor
Masa que soporta la canasta	$m_c$	40kg
Factor de seguridad	$f_s$	2
Esfuerzo permisible	$\sigma_{perm}$	300MPa
Longitud del tubo	$l$	880,44mm
Número de tubos	$\#v_a$	2
Peso que soporta cada tubo	$m_a$	245N
Módulo de resistencia de la sección	$S_3$	-

En la Figura 30 se presenta los apoyos y la carga distribuida, en la Figura 31 se muestra un diagrama de cuerpo libre con su respectivo diagrama de fuerzas cortantes y diagrama de momentos flectores, por medio del método gráfico se encuentra el momento de reacción debido a la carga, en este caso se determina que  $V = 70N$  y  $M = 12894,9N/mm$  como se puede identificar en su respectivos diagramas.



**Figura 30:** Representación de los apoyos del carro de supermercado.



**Figura 31:** Diagrama de cuerpo libre y diagramas de los apoyos del carro de supermercado.

Se procede a encontrar el módulo de resistencia de la sección que debe tener los tubos, en este caso por medio de (17).

$$\sigma_{max3} = \frac{M_3}{S_3} \quad (17)$$

Donde:

$\sigma_{max3}$  Esfuerzo de trabajo del apoyo del carro, en MPa;

$S_3$  Módulo de resistencia de la sección, en  $\text{mm}^3$ ;

$M_3$  Momento flector máximo del apoyo, en MPa.

Por medio del factor de seguridad como se puede observar en la ecuación (18) se puede encontrar el valor del módulo de resistencia como se observa a continuación.

$$f_{s2} = \frac{\sigma_{perm}}{\sigma_{max3}} \quad (18)$$

Donde:

$f_{s2}$  Factor de seguridad, adimensional;

$\sigma_{perm}$  Esfuerzo permisible, en MPa.

Remplazando (17) en (18) se obtiene lo siguiente.

$$f_{s2} = \frac{\sigma_{perm} \cdot S_3}{M_3} \quad (19)$$

Despejando  $S_3$ .

$$S_3 = \frac{f_{s2} \cdot M_3}{\sigma_{perm}} \quad (20)$$

Remplazando los datos (20).

$$S_3 = \frac{2 \cdot 12894,9\text{N/mm}}{300\text{MPa}}$$

$$S_3 = 85,966\text{mm}^3 = 0,086\text{cm}^3$$

En la Tabla 13 se puede observar que el tubo con un módulo de resistencia de la sección similar en este catálogo es de 12,70mm de diámetro exterior con un espesor de 0,95mm, [47].

**Tabla 13:** Catálogo ImportAcero, tubo mecánico redondo.

Espesos		Pesos		Propiedades	
Díámetro exterior	e	P	A	I	W
mm	mm	kg/6m	cm <sup>2</sup>	cm <sup>4</sup>	cm <sup>3</sup>
12,70	0,95	1,86	0,35	0,06	0,09
	1,10	2,10	0,40	0,07	0,11
	1,50	2,82	0,53	0,08	0,13
15,88	0,95	2,28	0,44	0,12	0,15
	1,10	2,64	0,51	0,14	0,18
	1,50	3,54	0,68	0,18	0,22
19,05	0,95	2,70	0,54	0,22	0,23
	1,10	3,18	0,62	0,25	0,26
	1,50	4,20	0,83	0,32	0,34
22,22	0,95	3,18	0,63	0,36	0,32
	1,10	3,66	0,73	0,41	0,37
	1,50	4,92	0,98	0,53	0,47
25,40	0,95	3,60	0,73	0,55	0,43
	1,10	4,20	0,84	0,62	0,49
	1,50	5,64	1,13	0,81	0,64

Dentro del diseño del tubo de los apoyos del carro de supermercado, uno de los factores que se debe tomar en consideración es el pandeo, debido a deformaciones que se pueden presentar al momento de soportar la carga máxima, además, se conoce que en una sección circular o circular hueca el pandeo es impredecible debido a que su valor de inercia es igual en todo los sentidos. Por lo que, para garantizar que no sufra una deformación por pandeo se calcula el factor de seguridad con los diámetros aprobados en el dimensionamiento de los apoyos del carro de supermercado.

Para analizar el pandeo es importante calcular la relación de esbeltez y la relación de esbeltez de transición con (21) y (23) respectivamente con el fin de conocer si se trata de una columna larga o corta, como se puede observar en (21), es importante encontrar el radio de giro con (22), en este caso se utiliza el radio de giro de un círculo hueco debido a que es la sección transversal de un tubo, [45].

$$R_{es} = \frac{K \cdot L}{r} \quad (21)$$

Donde:

$R_{es}$  Relación de esbeltez, adimensional;

$K$  Constante de fijación, adimensional;

$L$  Longitud del tubo, en mm;

$r$  Radio de giro, en mm.

$$r = \sqrt{\frac{D^2 + d^2}{4}} \quad (22)$$

$$K_c = \sqrt{\frac{2 \cdot \pi^2 \cdot E}{S_y}} \quad (23)$$

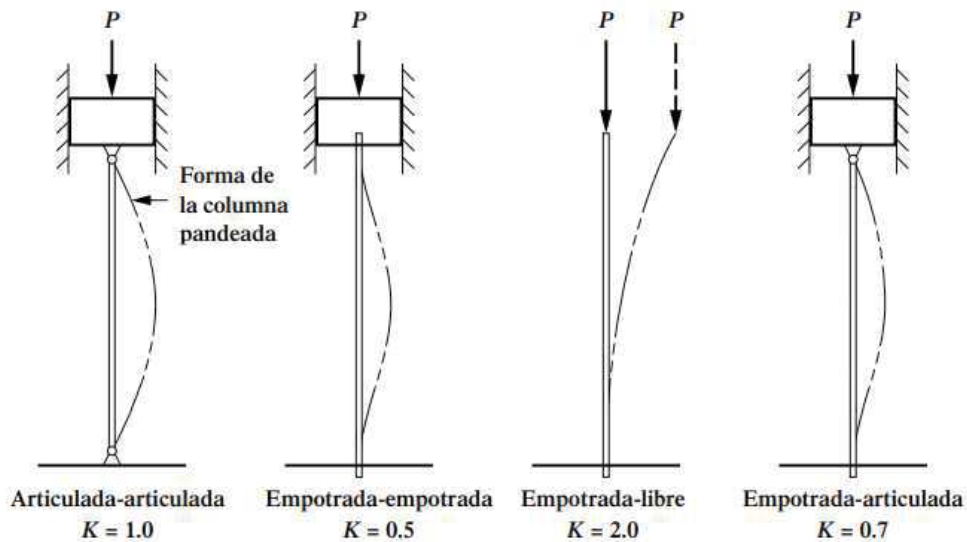
Donde:

$K_c$  Constante de columna, adimensional;

$E$  Módulo de elasticidad, en GPa;

$S_y$  Resistencia de fluencia del material, en MPa.

Por medio de la Tabla 14 y la comparación entre (21) y (23) se concluye que la relación de esbeltez es menor que la relación de esbeltez de transición por lo cual se debe de emplear la formula de J. B. Johnson que se describe en (24), [45], es importante recalcar que el módulo de elasticidad y la resistencia de fluencia dependen del material que en este caso es el acero A36, con la Figura 32 se puede encontrar la constante que depende de su fijación  $K$ , como el tubo esta soldado en las dos extremos se determino que la constante a usar es de 0.5, [45].



**Figura 32:** Valor de la constante de fijación, [45].

**Tabla 14:** Datos iniciales para análisis de pandeo en el tubo.

Designación	Variable	Valor
Longitud real del tubo	$L$	880,44mm
Módulo de elasticidad	$E$	200GPa
Constante que depende del extremo fijo	$K$	0,5
Resistencia de fluencia del material	$S_y$	500MPa
Peso que soporta la canasta	$P_{tub}$	392N
Diámetro exterior mínimo del tubo	$D$	19,05mm
Diámetro interior del tubo	$d$	16,05mm
Área de la sección transversal	$A$	35,07mm <sup>2</sup>

$$r = \sqrt{\frac{12,70^2 + 10,8^2}{4}} = 8,335\text{mm}$$

$$R_{esbeltez} = \frac{0,5 \cdot 880,44\text{mm}}{8,335\text{mm}} = 52,815$$

$$K_c = \sqrt{\frac{2 \cdot \pi^2 \cdot 200\text{GPa}}{500\text{MPa}}} = 88,85$$

Por último, se reemplaza los datos de la Tabla 14 en la fórmula de J. B. Johnson (24) para encontrar el factor de diseño con la carga máxima establecido.

$$P_{cr} = A \cdot S_y \cdot \left(1 - \frac{S_y(K \cdot L/r)^2}{4 \cdot \pi \cdot E}\right) \quad (24)$$

Donde:

$P_{cr}$  Fórmula de J.B. Johnson para columnas cortas, en KN;

$A$  Área de sección transversal, en mm<sup>2</sup>.

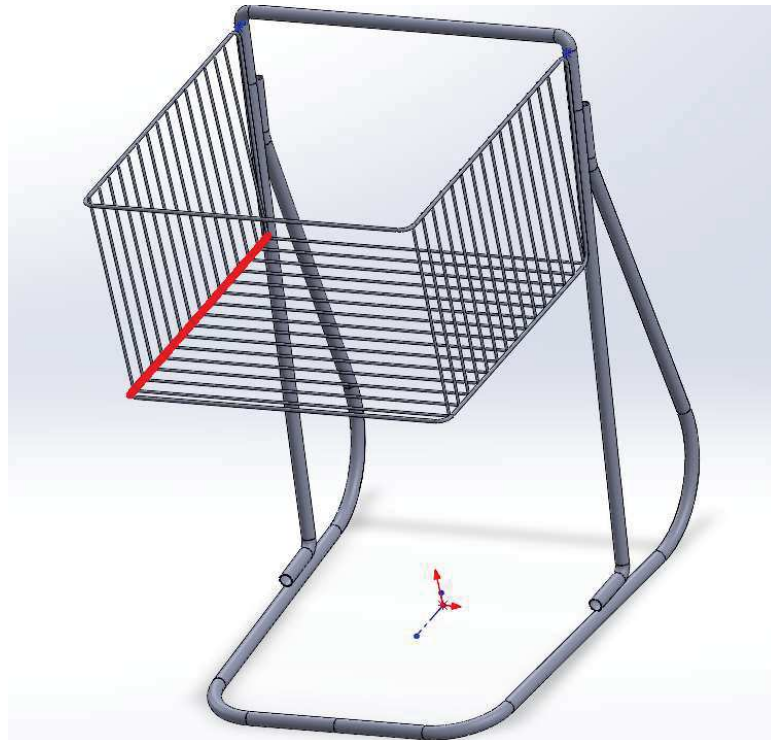
$$P_{cr} = 35,068\text{mm}^2 \cdot 500 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot \left(1 - \frac{500\text{MPa}(52,815)^2}{4 \cdot \pi^2 \cdot 200\text{GPa}}\right) = 14,43\text{kN}$$

$$f_s p = \frac{14,43\text{kN}}{392\text{N}} = 36,8$$

Como se puede observar los diámetros mínimos escogido para el tubo de apoyo del carro garantizan que no sufran ninguna falla al momento de soportan la carga máxima.

### Diseño de soldadura soporte y fondo de la canasta

El diseño de soldadura es uno de los factores que se debe analizar para comprobar los esfuerzos que resistirá las uniones de una estructura, en este caso se analiza la soldadura sujeta a flexión debido a la presencia de una carga perpendicular en el eje como se observa en la Figura 33.



**Figura 33:** Uniones soldadas sujetas a flexión.

Por tratarse de un esfuerzo de una soldadura a filete las cargas directas o fuerza cortante generan esfuerzos cortantes primarios cabe recalcar que todos los esfuerzos cortantes primarios son iguales en todos los puntos del cordón de soldadura por su sección trasversal circular, además, las fuerzas cortantes generan momentos y los momentos producen esfuerzos cortantes secundarios, [46].

Con (25) se calcula el esfuerzo cortante primario y con (26) el esfuerzo cortante secundario.

$$\tau' = \frac{Vc}{Ac} \quad (25)$$

Donde:

$\tau'$  Esfuerzos cortantes primario en el cordón de soldadura, en MPa;



$V_c$  Carga en la soldadura, en N;

$A_c$  Área del cordón de soldadura o área de la garganta, en  $\text{mm}^2$ .

$$\tau'' = \frac{M_c \cdot c_2}{I_s} \quad (26)$$

Donde:

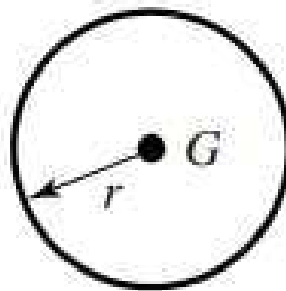
$\tau''$  Esfuerzos cortantes secundario en el cordón de soldadura, en MPa;

$M_c$  Reacción de momento producido por la fuerza, en  $\text{N} \cdot \text{mm}$ ;

$c_2$  Distancia desde el centroide del perfil hasta el punto crítico, en mm;

$I_s$  Segundo momento de área del cordón de soldadura, en  $\text{mm}^4$ .

Como primer punto se debe seleccionar la geometría correspondiente o el patrón de soldadura como se puede observar en la Figura 34.



**Figura 34:** Patrón de soldadura circular, [46].

En (13) se conoce que el diámetro mínimo para las varillas de la canasta es de 1,61mm por lo que se decide utilizar un diámetro de 3mm debido a que es un diámetro aceptado en el mercado por lo que su radio es de 1,5mm, con lo que se puede encontrar el área de la garganta (27) y el segundo momento unitario del área del cordón (28), [46].

$$A_c = 1,41 \cdot \pi \cdot h \cdot r_c \quad (27)$$

Donde:

$h$  Tamaño de soldadura, en mm;

$r_c$  Radio del área transversal, en mm.

Remplazando el radio con  $h$  de incógnita en (27) se tiene lo siguiente:

$$A = 1,41 \cdot \pi \cdot h \cdot 1,5\text{mm} = h \cdot 6,66 \cdot \text{mm}$$

Se procede a encontrar el segundo momento unitario del área con (28).

$$I_u = \pi \cdot r^3 \quad (28)$$

Remplazando el radio en (28) se tiene lo siguiente:

$$I_u = \pi \cdot 1,5^3 = 10,60\text{mm}^3$$

Donde:

$I_u$  Segundo momento de unitario del área del cordón, en  $\text{mm}^3$ .

Por medio de (29) se procede a calcular el segundo momento de área del cordón de soldadura.

$$I_s = 0,71 \cdot h \cdot I_u \quad (29)$$

Remplazando los datos en (29) y  $h$  de incógnita se obtiene lo siguiente.

$$I_s = 0,71 \cdot 10,60\text{mm}^3 \cdot h = 7,49 \cdot h \cdot \text{mm}^3$$

Con todos los datos obtenidos se procede a remplazar en el esfuerzo cortante primario (25) como en el esfuerzo cortante secundario (26).

$$\tau' = \frac{31,36\text{N}}{6,66 \cdot h} = \frac{4,71 \text{ N}}{h \text{ mm}}$$

$$\tau'' = \frac{4360,1 \cdot 1,5}{7,49 \cdot h} = \frac{873,18 \text{ N}}{h \text{ mm}}$$

Por último, se combina vectorialmente la fuerza cortante primaria y la fuerza cortante

secundaria como se observa en (30) y se reemplaza los datos obtenidos.

$$\tau = (\tau'^2 + \tau''^2)^{\frac{1}{2}} \quad (30)$$

Donde:

$\tau$  Esfuerzo máximo sobre el cordón de soldadura, en MPa.

$$\tau = \left( \left( \frac{4,71}{h} \right)^2 + \left( \frac{873,18}{h} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} = \frac{873,19 \text{ N}}{h \text{ mm}}$$

Como se tenía previsto la fuerza cortante queda en función de  $h$ , por lo que por medio del factor de seguridad con (31) se encuentra el tamaño de la soldadura.

$$n = \frac{\tau_p}{\tau} \quad (31)$$

Donde:

$\tau_p$  Esfuerzo permisible del material de aporte, en MPa;

$n$  Factor de seguridad, adimensional.

Para encontrar el tamaño de la soldadura es importante elegir un correcto material de aporte en el proceso de soldadura, es decir, se debe elegir el electrodo a usar, es importante un electrodo con una resistencia a la fluencia mayor al material base, observado la Tabla 15, el cual, incluye los diferentes tipos de electrodos con sus diversas resistencias a la tensión y fluencia, se procede a seleccionar el electrodo E90xx con una resistencia a la fluencia de 531MPa, [46].

**Tabla 15:** Propiedades mínimas del material de aporte.

Número de electrodo AWS	Resistencia a la tensión kpsi (MPa)	Resistencia a la fluencia kpsi (MPa)	Elongación porcentual
E60xx	62 (427)	50 (345)	17-25
E70xx	70 (482)	57 (393)	22
E80xx	80 (551)	67 (462)	19
E90xx	90 (620)	77 (531)	14-17
E100xx	100 (689)	87 (600)	13-16
E120xx	120 (827)	107 (737)	14

De acuerdo al Código AISC para el material de aporte, se puede escoger un factor de seguridad entre 1,52 a 1,67 como se observa en la Tabla 16 debido a que el tipo de carga es a flexión se decide utilizar un factor de seguridad intermedio de 1,60 y se reemplaza los datos en (31) con el fin de encontrar el tamaño de soldadura, [46].

**Tabla 16:** Código AISC para el material de aporte.

Tipo de carga	Tipo de soldadura	Esfuerzo permisible	n
Tensión	A tope	$0,60S_y$	1,67
Aplastamiento	A tope	$0,90S_y$	1,11
Flexión	A tope	$0,60 - 0,66S_y$	1,52-1,67
Compresión simple	A tope	$0,60S_y$	1,67
Cortante	A tope o de filete	$0,30S_u t$	

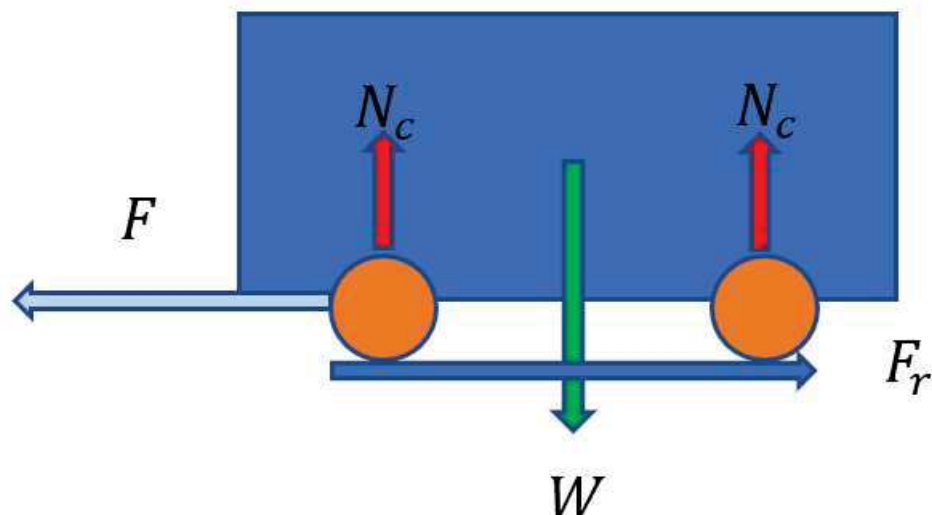
$$1,60 = \frac{531\text{MPa} \cdot h}{873,19}$$

$$h = 2,63\text{mm}$$

Como se observa en el resultado el tamaño de la soldadura debe ser mínimo de 2,63mm.

### 19.3. Dimensionamiento de motores

Para la selección de los motores es fundamental calcular la potencia y el torque en cada rueda, en la Figura 35 se muestra el diagrama de cuerpo libre donde se presenta las fuerzas en el sistema.



**Figura 35:** Diagrama de cuerpo libre de las fuerzas presentes en el sistema.

Donde:

$W$  Peso total del prototipo, en kg;

$F_r$  Fuerza de rozamiento a la rodadura, en N;

$F$  Fuerza total necesaria para mover el carro de supermercado, en N ;

$N_c$  Fuerza normal de reacción, en N.

Es importante encontrar los valores iniciales para el dimensionamiento del motor como se describe a continuación: la velocidad máxima para este prototipo es de 0,83m/s como fue descrita en la sección 12.1 donde se analiza que la velocidad promedio de las personas es de 0,83m/s y en la Tabla 1 se observa que el carro motorizado tiene una velocidad similar, la masa total del prototipo se basa en la combinación de los 40kg y el peso de la estructura y materiales electrónicos como se puede observar en la Tabla 17, el factor de seguridad se basa para dar mayor confiabilidad y compensar variables como el peso adicional, fricción entre los elementos, entre otros, el radio de las ruedas de los carros de supermercado rondan las 5” pero se decide utilizar un radio de 8” con el fin de reducir las revoluciones por minuto que debe tener el motor, por último el coeficiente de rozamiento en giro del caucho sobre el hormigón, todos los datos mencionados se muestra en la Tabla 18.

**Tabla 17:** Masa aproximada del carro de supermercado.

Elementos	Masa aproximada
Estructura	25kg
Baterias	2,5kg
Ruedas	0,5kg
Elementos electrónicos	2kg

**Tabla 18:** Condiciones iniciales para el dimensionamiento de los motores.

Condiciones iniciales	Variables	Valor
Velocidad maxima	$v_m$	0,83m/s
Masa total	$mt$	70kg
Factor de seguridad	$f_m$	2
Coeficiente de rozamiento a la rodadura	$\mu_r$	0,035, [48].
Radio de las ruedas	$r_d$	$10,16e^{-2}m$
Gravedad	$g$	$9,81m/s^2$

$$F_r = \mu_r \cdot N = \mu_r \cdot m \cdot g \quad (32)$$

Donde:

$F_r$  Fuerza de rozamiento a la rodadura, en N;

$\mu_r$  Coeficiente de rozamiento de giro del caucho sobre el hormigón, adimensional;

$N$  Fuerza normal de reacción, en N;

$m$  Masa total del carro de supermercado, en kg;

$g$  Gravedad en la tierra, en  $m/s^2$ .

$$F_r = 0,035 \cdot 70\text{kg} \cdot 9,81\text{m/s}^2 = 24,04\text{N}$$

A continuación, se calcula la velocidad angular por medio (33).

$$\omega = \frac{v_m}{r_d} \quad (33)$$

Donde:

$\omega$  Velocidad angular, en rad/s;

$v_m$  Velocidad máxima, en m/s;

$r_d$  Radio de las ruedas, en m.

$$\omega = \frac{0,83\text{m/s}}{10,16e^{-2}\text{m}} = 8,17\text{rad/s}$$

Dentro del presente proyecto es importante tomar en cuenta el sistema de locomoción por ruedas para conocer cual es el más efectivo para el propósito de este proyecto, por lo que a continuación se presenta una tabla con las características más importantes que se deben tomar en cuenta para la elección de varios sistemas de locomoción para carros de supermarket, [49].

**Tabla 19:** Análisis de sistemas de locomoción.

Sistema de Locomoción	Fácil Implementación	Fácil Control	Número de motores
Locomoción diferencial	X	X	2
Locomoción Ackerman	-	X	3
Locomoción síncrona	-	-	3
Ruedas omnidireccionales	X	-	3
Triciclo clasico	X	X	2

Como se puede observar en la Tabla 19, el sistema de locomoción diferencial tiene una mayor ventaja frente a las demás opciones, debido a tener un mayor control y una básica implementación en el carro de supermarket además cuenta con un número equilibrado de motores para su movimiento y dirección.

Entonces, encontrando la fuerza total (32) se calcula el torque y la potencia de los motores mediante (34) y (35) respectivamente, cabe recalcar que todo el tiempo se va a trabajar con dos motores en simultáneo, por lo que, se debe dividir el torque entre los dos motores, además, como es un diseño de máquinas se define un factor de seguridad como se lo indica en la Tabla 18.

$$T = \frac{F \cdot r_d \cdot f_m}{2} \quad (34)$$

Donde:

$T$  Torque del motor, en  $N \cdot m$ ;

$f_m$  Factor de seguridad del motor, adimensional.

$$T = \frac{24,04N \cdot 10,16e^{-2}m \cdot 2}{2} = 2,45N \cdot m$$

$$T = 2,45N.m = 25kgf \cdot cm$$

$$P = T \cdot \omega \quad (35)$$

Donde:

$P$  Potencia necesaria para la masa de la carga y de la estructura, en W.

$$P = 2,45\text{N} \cdot \text{m} \cdot 8,1693\text{rad/s} = 20,01\text{W}$$

Por último es importante tener en cuenta las RPM (Revoluciones por minuto) que debe tener el motor debido a la condición inicial de la velocidad máxima que debe desplazarse el prototipo, con (36) se calcula las RPM máximas del motor.

$$RPM = \frac{v_m \cdot 60}{2 \cdot \pi \cdot r_d} \quad (36)$$

$$RPM = \frac{0,83 \cdot 60}{2 \cdot \pi \cdot 0,1016} = 78\text{RPM}$$

Remplazando los datos de la Tabla 18 en (36) se obtiene que el motor debe desplazarse a una velocidad máxima de 78RPM.

Una vez obtenido todas los requerimientos para la selección de los motores se decide utilizar el motor Senchuan SCD2-A debido a su bajo costo y su características que se puede observar en la Tabla 20.

**Tabla 20:** Características de motores a elegir.

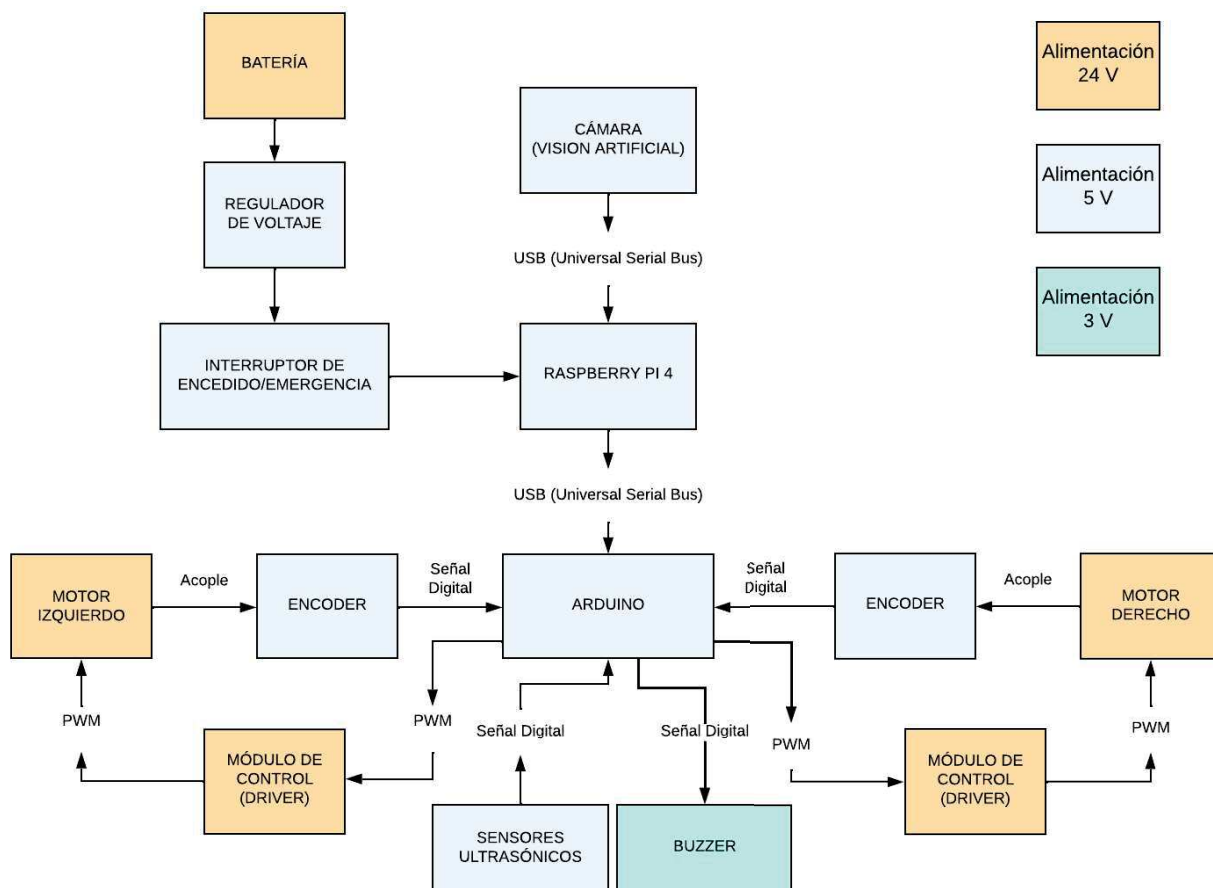
Modelo	Senchuan SCD2-A [50]
Torque máximo	16,95N · m
Alimentación	24V
Corriente de Carga	3,6A
Velocidad sin carga	150RPM
Potencia	250W
Precio	\$100c/u

Como se puede apreciar en la Tabla 20 el motor de la empresa Senchuan cumple con todos los requisitos para este prototipo y su facilidad de compra en el mercado ecuatoriano.

## 20. Diseño electrónico

En esta sección se presenta el dimensionamiento y selección de los componentes electrónicos para satisfacer con el correcto funcionamiento de los motores y control, en la Figura 36 se presenta el diagrama de bloques del circuito electrónico.





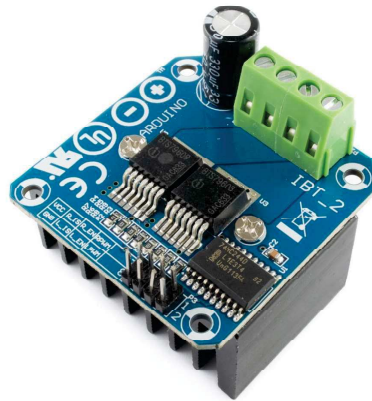
**Figura 36:** Diagrama de bloques del circuito electrónico.

## 20.1. Dimensionamiento de driver

Para el manejo de los motores es importante controlar su voltaje y corriente y se requiere el uso de driver o módulo de control, utiliza una señal PWM (Modulación por Ancho de Pulso) y con ello un voltaje y corriente de control, en el mercado existen diferentes tipos de drivers con diversas características y que sea compatible con el motor que presenta una alimentación de 24V a 3,6A . En este caso existe el módulo BTS7960 como se puede apreciar en la Figura 37, cumple con todas las características para el control de motores como se puede observar en la Tabla 21 .

**Tabla 21:** Alternativas drivers de motores.

Modelo	Módulo BTS7960 [51]
Tensión a nivel lógico	5V
Voltaje máximo	5 – 27V
Corriente máxima	43A
Precio	\$10



**Figura 37:** Módulo BTS7960, [51].

## 20.2. Dimensionamiento de la batería

En los objetivos del prototipo se detalla que el robot móvil debe cumplir con una hora de autonomía, como se observa en la Figura 36 la batería debe ser capaz de alimentar los motores y el controlador en dicho tiempo, para dimensionar la batería se debe encontrar el consumo de voltaje y corriente de los componentes como se observa en la Tabla 22.

**Tabla 22:** Consumo de voltaje y corriente del prototipo.

Componente	Voltaje	Corriente	Cantidad	Total
Raspberry Pi 4	5V	3,5A	1	3,5A
Motor DC	24V	3,6A	2	7,2A
Total de corriente				10,7A

Como se puede observar en la Tabla 22 el consumo máximo de voltaje es de 24V y la corriente de consumo es de 10,7A, como se menciono anteriormente la batería debe alimentar el prototipo por un periodo de una hora, con (37) se determina la potencia de la batería.

$$P_b = V_b \cdot I_b \quad (37)$$

Donde:

$P_b$  Potencia de la batería, en W;

$v_b$  Consumo de voltaje del prototipo, en V;

$I_b$  Corriente total consumida, en A.

$$P_b = 24V \cdot 10,7A$$

$$P_b = 256,8W$$

Se conoce que la batería debe ser de 24V debido al consumo que requiere la corriente con (39) se va a calcular la corriente para que la batería dure una hora de uso con la relación de su potencia.

$$T_b = \frac{P_n}{P_b} \quad (38)$$

Donde:

$T_b$  Tiempo de uso de la batería, en h;

$P_n$  Potencia necesaria de la batería, en W.

$$1h = \frac{24V \cdot I}{256,8W} \quad (39)$$

Donde:

$I$  Corriente necesaria, en A.

$$I = 10,7A \quad (40)$$

Gracias al resultado en (40) se conoce que la batería debe tener un mínimo de 10,7Ah y un voltaje de 24V, como se puede apreciar en la Tabla 22 utiliza un regulador de voltaje para el Raspberry como se detalla en la siguiente sección 17.3.

### 20.3. Modelo matemático motor DC

El modelo matemático de un motor DC posee características eléctricas que se incluyen en la parte del rotor y la bobina y características mecánicas en el comportamiento dinámico, en la Figura 38 se puede observar sus diferentes variables dentro de un motor DC, [52].

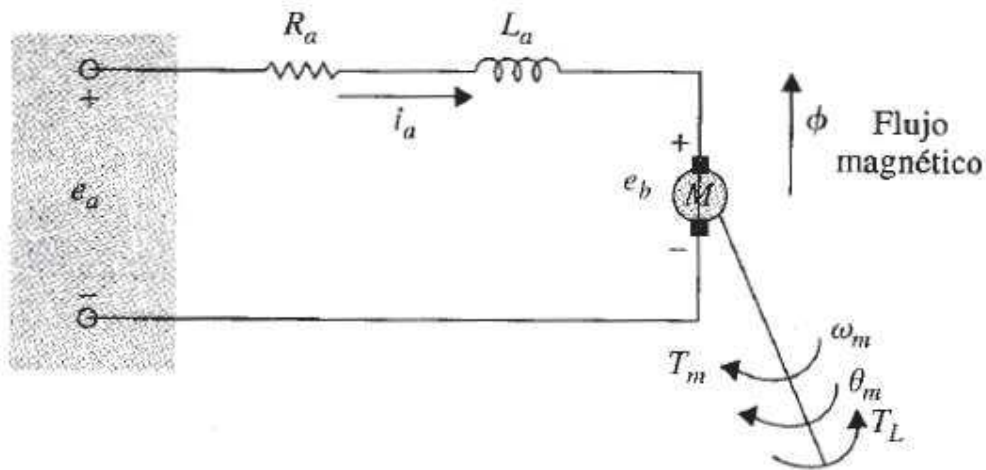


Figura 38: Esquema motor DC, [52].

Como se puede observar en la Figura 38 el rotor es representado por una resistencia y la bobina con una inductancia, basado en la ley de Kirchhoff se puede establecer la ecuación (41).

$$e_a(t) = R_a \cdot i(t) + L_a \frac{di(t)}{dt} + e_b \quad (41)$$

Donde:

$e_a$  Voltaje de alimentación del motor, en V;

$R_a$  Resistencia del rotor, en  $\Omega$ ;

$L_a$  Inductancia del bobinado en el rotor, en H;

$e_b$  Fuerza contra electromotriz, en V.

Transformado en función de transferencia y reduciendo la expresión se obtiene lo siguiente.

$$e_a(s) = (R_a + L_a s) \cdot i(s) + e_b(s) \quad (42)$$

Como se explicó anteriormente debido al comportamiento dinámico del motor el modelo del motor DC incluye características mecánicas producidas por el movimiento que realiza el rotor, por lo que, se establece (43).

$$T_m(t) = J \frac{dw(t)}{dt} + Bw(t) \quad (43)$$

Donde:

$T_m$  Torque del motor, en  $N \cdot m$ ;

$J$  Momento de inercia de rotor, en  $Kg \cdot m^2$  ;

$B$  Coeficiente de rozamiento viscoso, en  $N \cdot m \cdot s$ ;

$w$  Velocidad angular del motor, en  $rad/s$ .

Transformado en función de transferencia se obtiene lo siguiente.

$$T_m(s) = Js \cdot w(s) + B \cdot w(s) \quad (44)$$

Es importante recalcar que hay una relación entre las características mecánicas y eléctricas como se puede apreciar en (45) y (46).

$$e_b(t) = K_v \cdot w \quad (45)$$

Donde:

$K_v$  Constante de fuerza electromotriz , en  $V/rpm$ .

$$T_m = K_t \cdot i(t) \quad (46)$$

Donde:

$K_t$  Constante de torque electromagnético , en  $N \cdot m/A$ ;

$i$  Corriente de armadura, en  $A$ .

Transformado en función de transferencia se obtiene lo siguiente.

$$e_b(s) = K_v \cdot w(s) \quad (47)$$

$$T_m(s) = K_t \cdot i(s) \quad (48)$$

Para facilitar las operaciones se procede a despejar  $i(s)$  en (48)

$$i(s) = \frac{T_m(s)}{K_t} \quad (49)$$

Por último, se debe encontrar una función de transferencia que tenga como salida la velocidad angular y la entrada la alimentación al motor, se procede a remplazar las relaciones entre las características mecánicas y eléctricas, es decir, las ecuaciones (47) y (49) en (42) teniendo como resultado (50).

$$e_a(s) = (R_a + L_a s) \frac{T_m(s)}{K_t} + K_v \cdot w(s) \quad (50)$$

Se remplaza en (44) en (50).

$$e_a(s) = (R_a + L_a s) \frac{J s \cdot w(s) + B \cdot w(s)}{K_t} + K_v \cdot w(s) \quad (51)$$

Simplificando y desarrollando en (51) se obtiene la función de transferencia para la el control del motor.

$$\frac{w(s)}{e_a(s)} = \frac{K_t}{(L_a \cdot J)s^2 + (R_a \cdot J + L_a \cdot B)s + R_a \cdot B + K_v \cdot K_t} \quad (52)$$

## 21. Desarrollo del control DC

Como se explicó en la sección 9 el controlador PID reúne todas las características de cada controlador P, D e I, se decide utilizarlo en el control de velocidad de los motores del carro de compras, en (52) se observa que se necesita encontrar los valores de las características eléctricas y mecánicas del motor, es importante recalcar que debido a los motores implementados son reutilizados no se puede obtener todas las características, por lo que, se deberá obtener de forma experimental.

### 21.1. Variables del motor DC

Debido a que los motores implementados en el carro de compras son reutilizados no se puede obtener sus parámetros eléctricos y mecánicos, en este caso por medio de instru-

mentos de medición como el multímetro y osciloscopio se encontró los siguientes parámetros como se observar en la Tabla 23 y Tabla 24, [53].

**Tabla 23:** Parametrización constantes electromotriz.

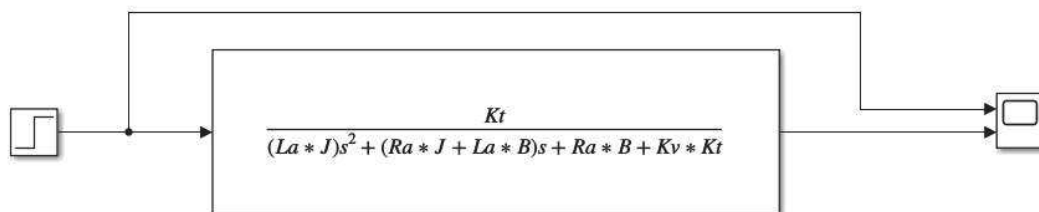
Constante Electromotriz			
Va (V)	Ia (A)	W (RPM)	W (rad/s)
24,76	2,6	150	15,71

**Tabla 24:** Características del motor DC.

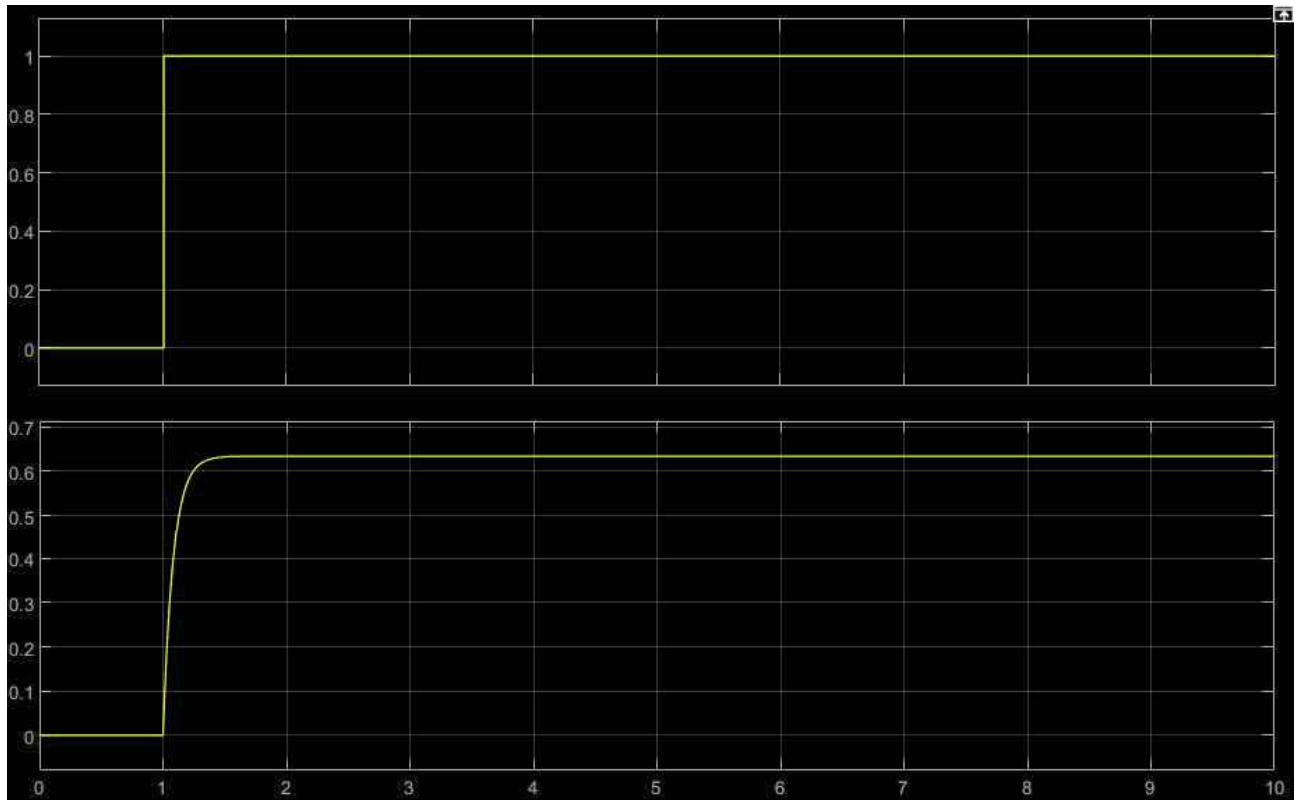
Variable	Valor	Unidad
Resistencia de armadura	0,4	$\Omega$
Inductancia de armadura	$1e^{-4}$	H
Constante electromotriz	1,51	$V \cdot s/\text{rad}$
Momento de Inercia	0,5	$\text{Kgm}^2$
Constante de fricción	0,25	$N \cdot m \cdot s$

## 21.2. Controlador PID

Como se mencionó en la sección 9 el controlador PID reúne la mayoría de propiedades en comparación de los otros controladores, se realiza una simulación en el software Simulink con el fin de observar el comportamiento de los diferentes controladores y seleccionar el controlador más seguro en este tipo de motores, la simulación se realiza por medio de (52) y el valor de las variables obtenidas en la Tabla 24, en la Figura 39 se visualiza el sistema en lazo abierto con el objetivo de comparar con las respuestas de los controladores.

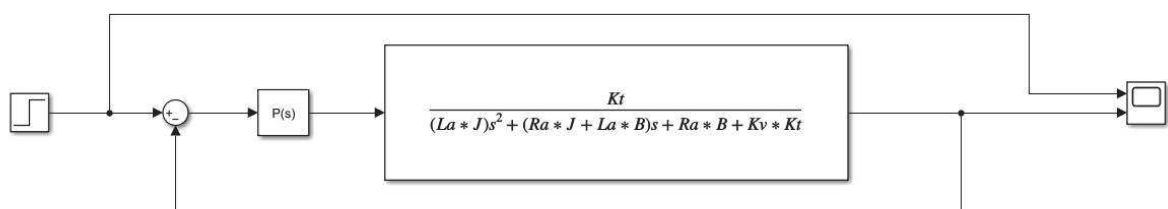


**Figura 39:** Sistema motor DC en lazo abierto.



**Figura 40:** Resultado del sistema motor DC en lazo abierto.

Para realizar los diferentes controladores P, D e I se utiliza la herramienta “Controlador PID” del software Simulink, en este caso se procede a simular el comportamiento del controlador P como se puede observar en la Figura 41.



**Figura 41:** Sistema motor DC Controlador P.

En este caso por medio de la herramienta PID de Simulink se puede variar el comportamiento del sistema, en la Figura 42 se observa la interfaz que se usa para ajustar la salida.



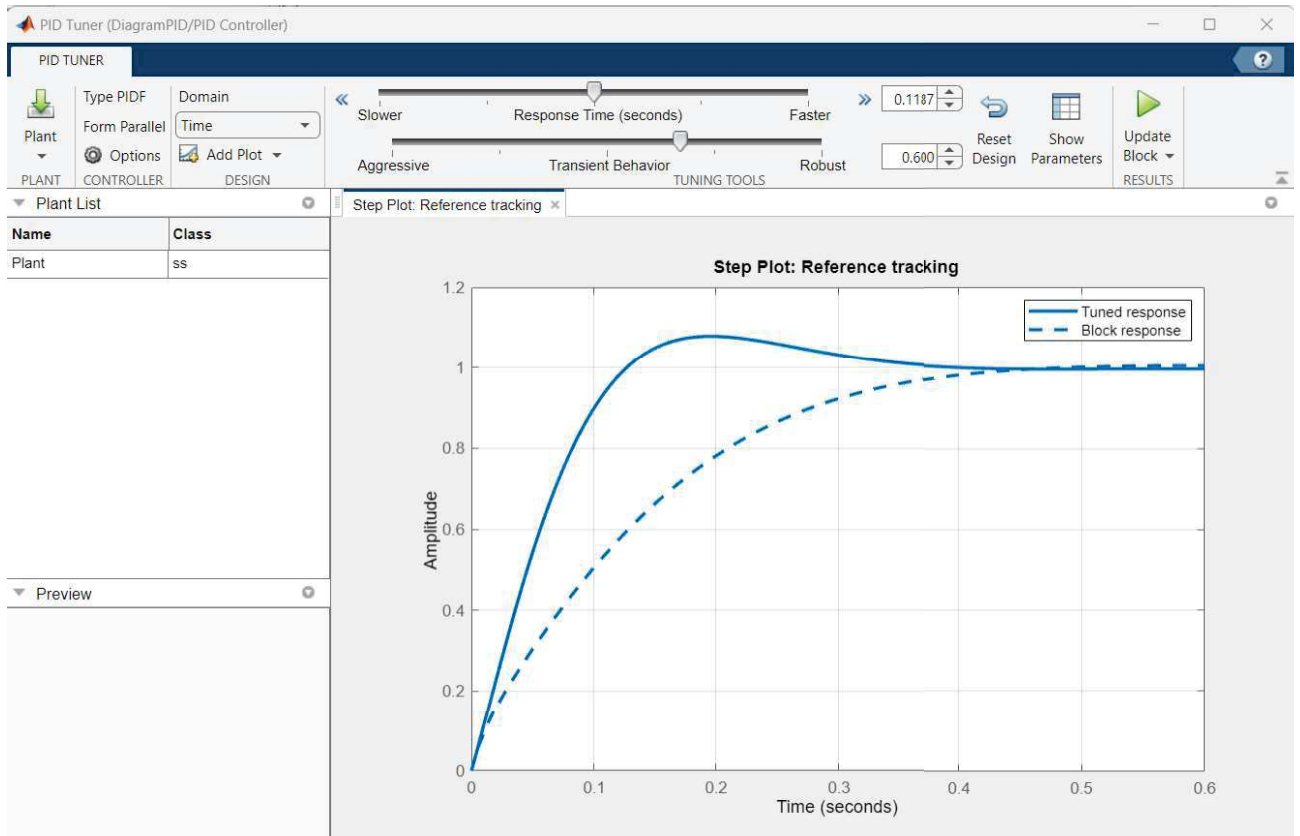


Figura 42: Herramienta PID de Simulink.

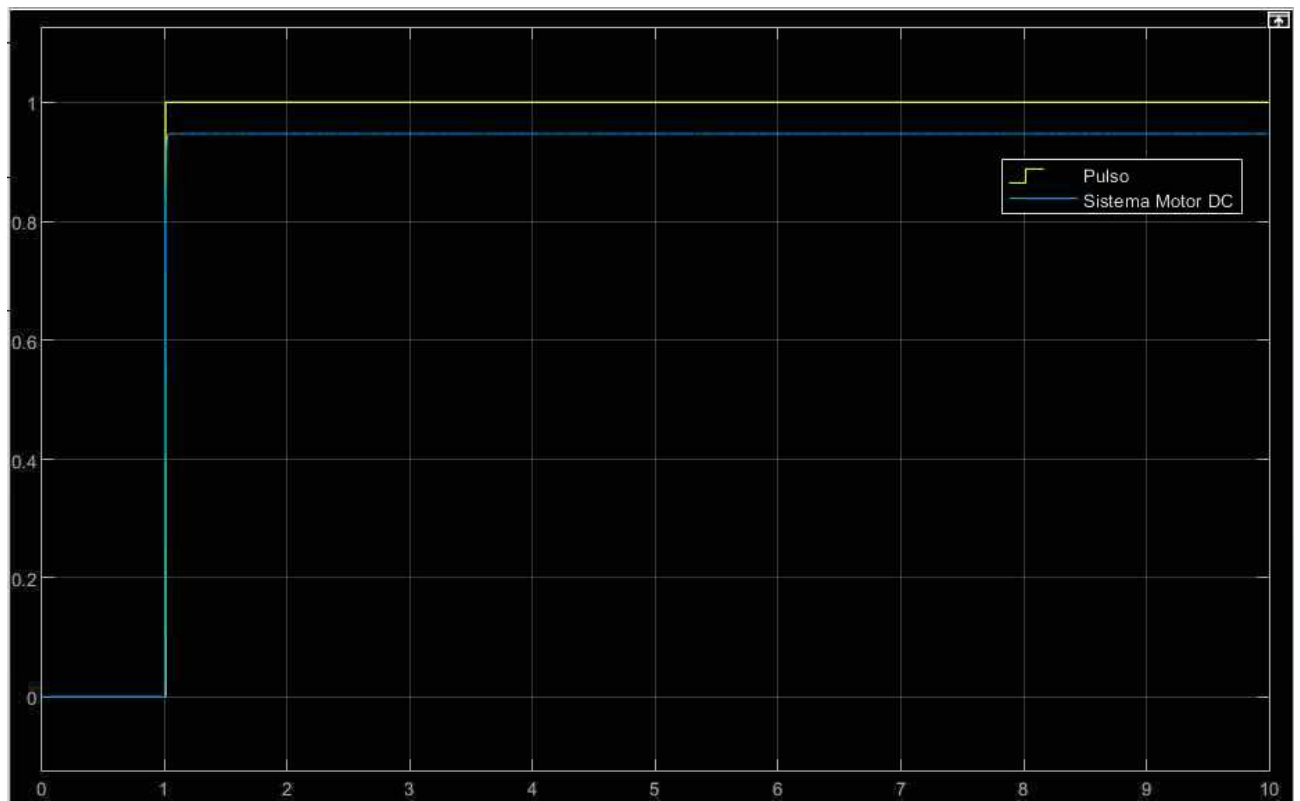
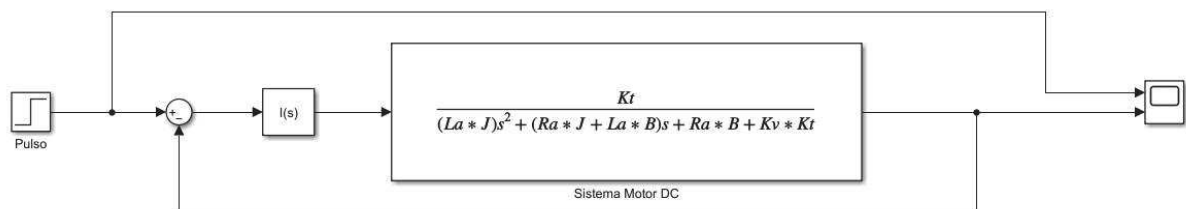


Figura 43: Resultado del sistema motor DC Controlador P.

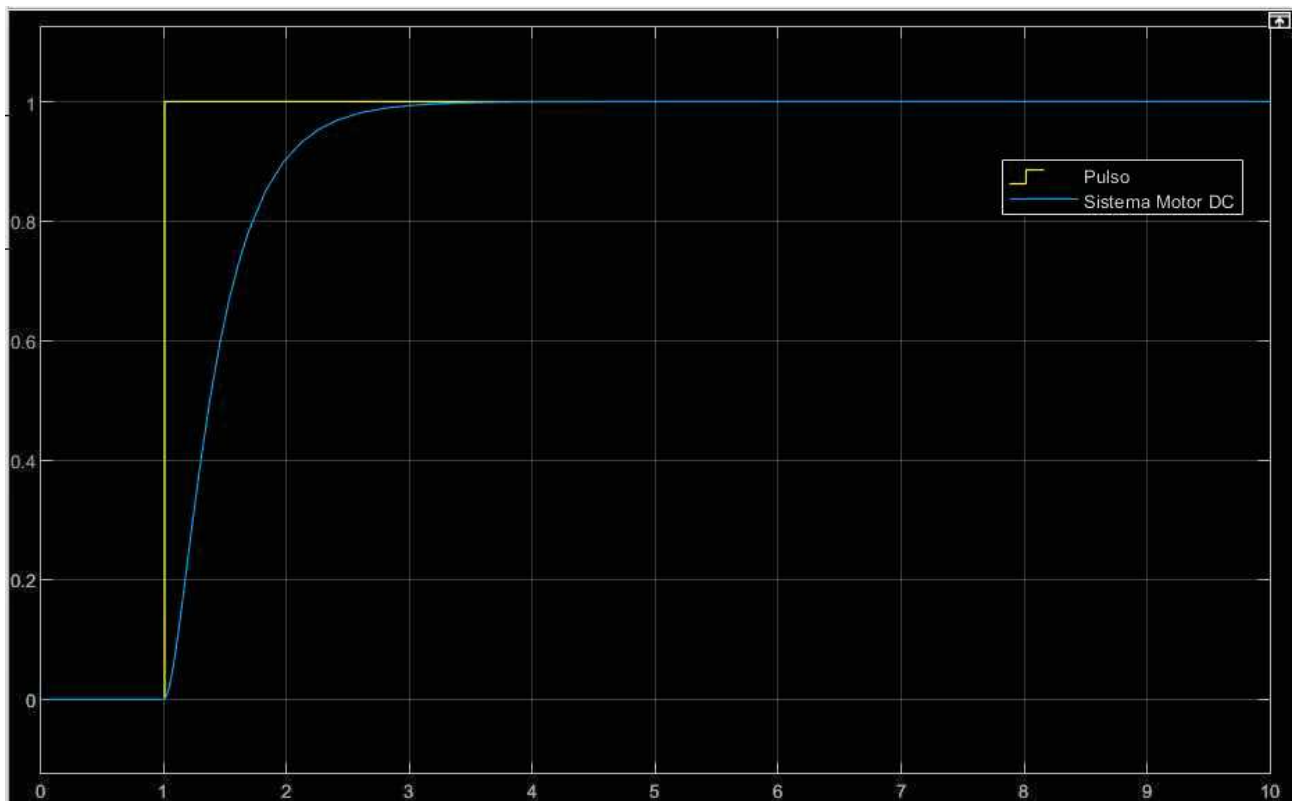
Como se puede observar en la Figura 43 la respuesta es muy rápida como se tenía

previsto, sin embargo, no alcanza su punto de ajuste por lo que no es recomendable para la aplicación del prototipo.

A continuación, se analiza el comportamiento del controlador I, se conoce que a diferencia del controlador P el controlador I elimina cualquier desviación o desplazamiento del punto de ajuste, sin embargo, este controlador requiere de una respuesta más lenta como se muestra en la Figura 45, resultando que este no es apto para este tipo de sistema, aunque el controlador no debe responder con una máxima rapidez se considera que la respuesta llegue a su punto de ajuste en un tiempo máximo de 2s con el fin de evitar una salida brusca del carro de supermercado.

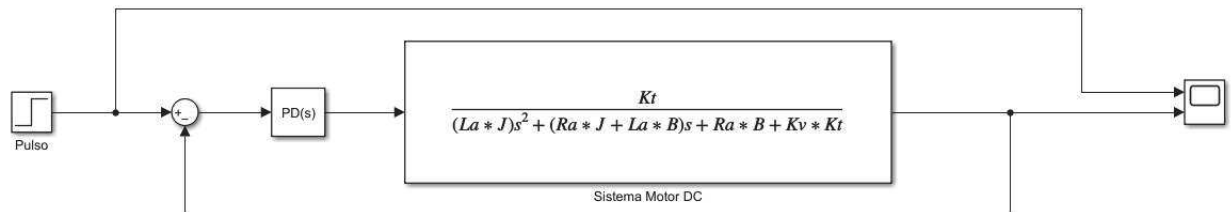


**Figura 44:** Sistema motor DC Controlador I.

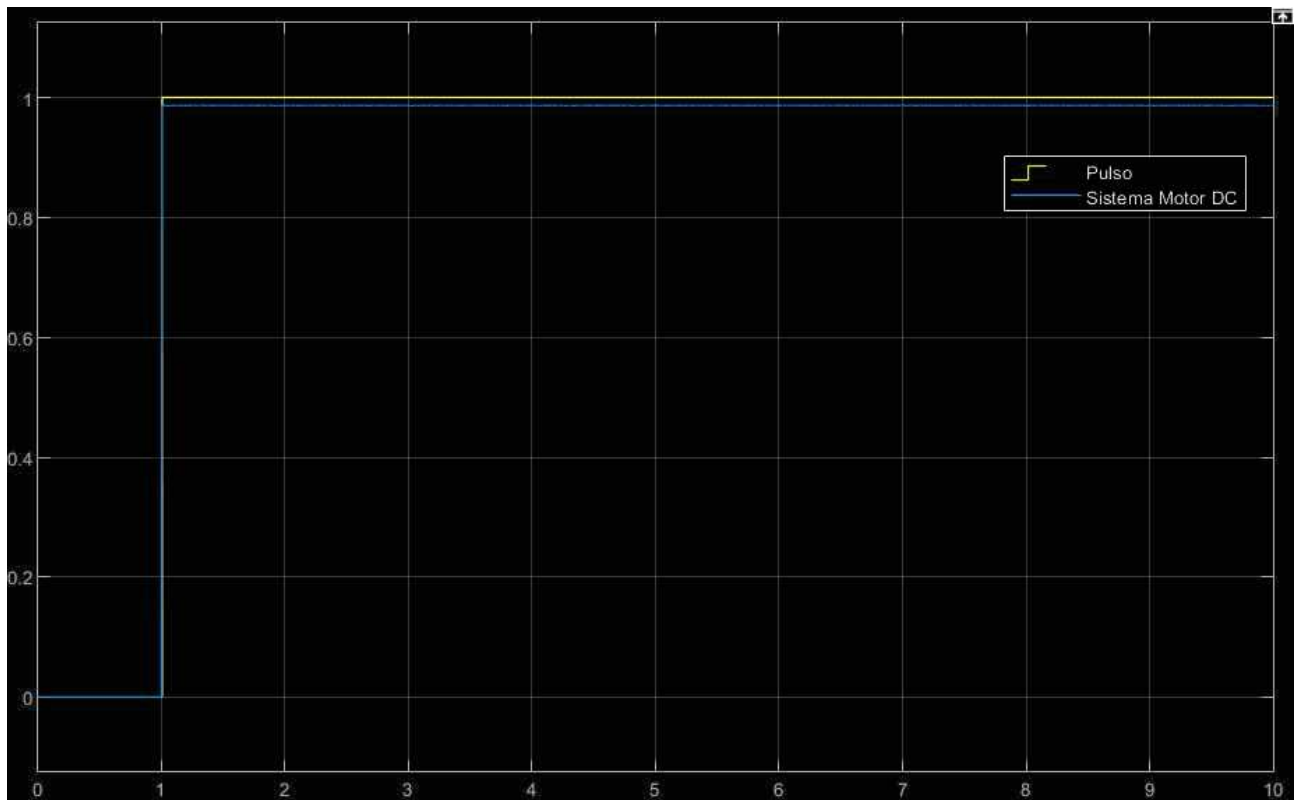


**Figura 45:** Resultado del sistema motor DC Controlador I.

El siguiente controlador que se analiza es el controlador PD en este caso se tiene una combinación del controlador P y D, es decir, su salida tiene una combinación lineal de la señal de error y su derivada, como observa en la Figura 47 todavía se obtiene un pequeño desplazamiento en su salida.

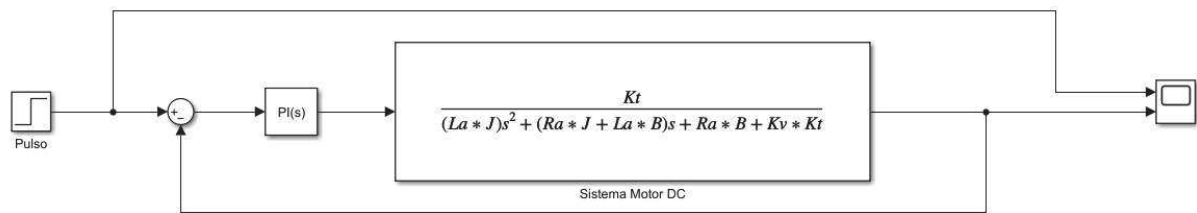


**Figura 46:** Sistema motor DC Controlador PD.

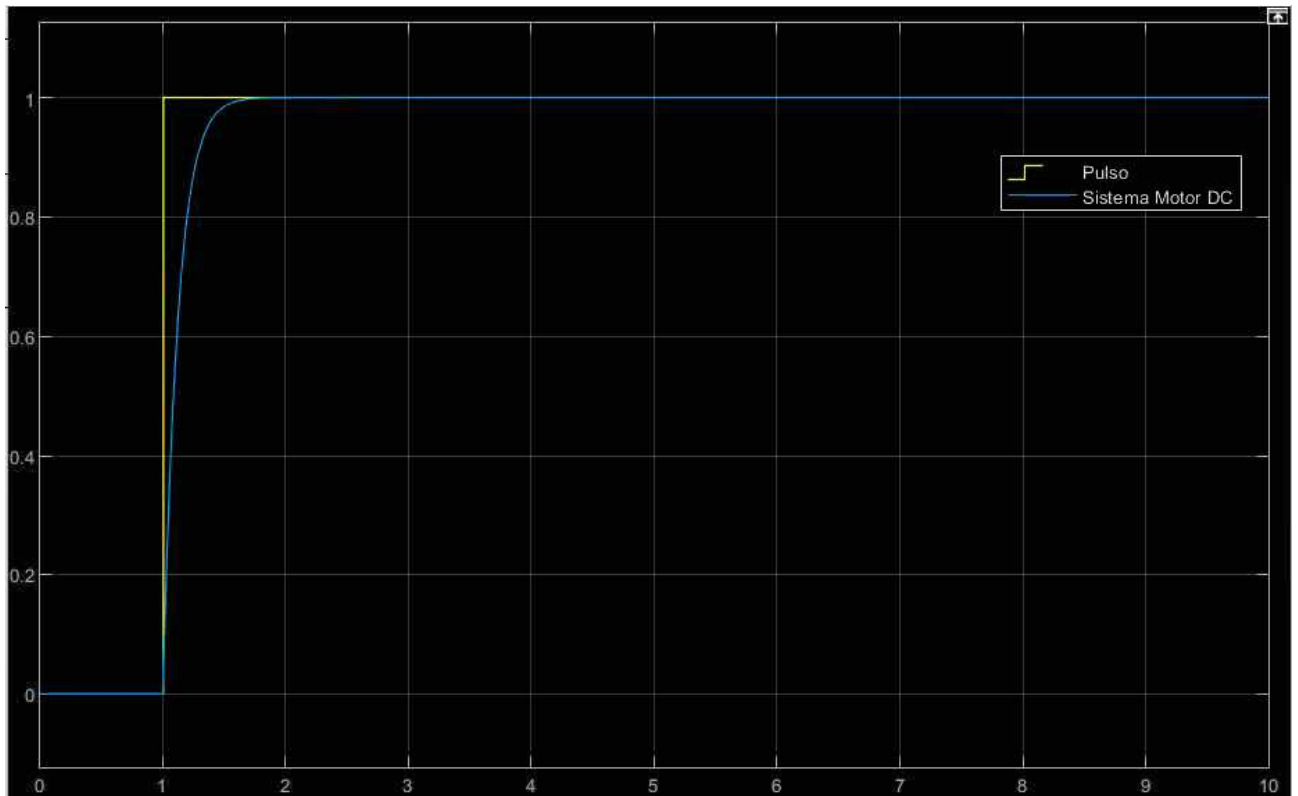


**Figura 47:** Resultado del sistema motor DC Controlador PD.

El controlador PI es siguiente en ser analizado, como se observa en la Figura 49, este tipo de controlador reúne las propiedades del controlador P e I, es decir, su tiempo de respuesta es más rápida por parte del controlador P y es más preciso por el controlador I, este caso el controlador PI es una buena opción para este sistema.

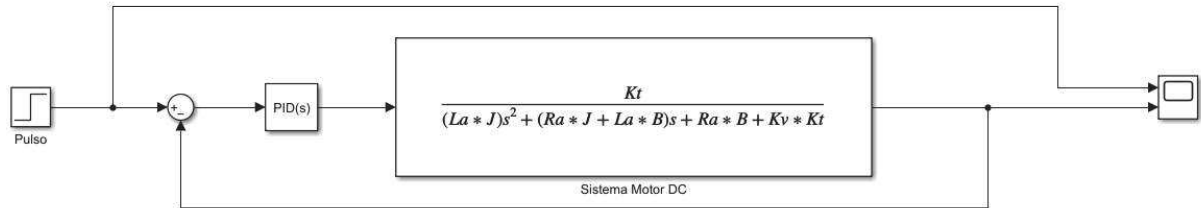


**Figura 48:** Sistema motor DC Controlador PI.

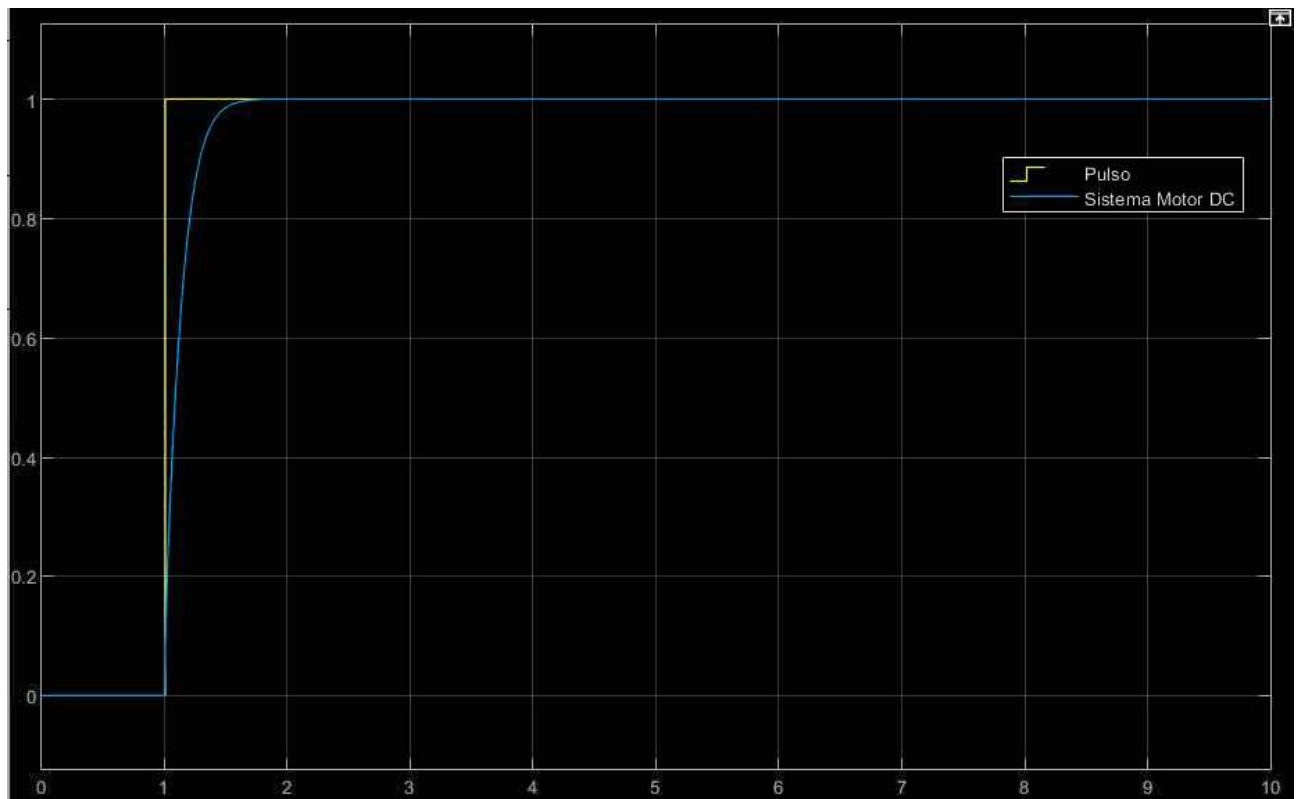


**Figura 49:** Resultado del sistema motor DC Controlador PI.

Por último, se tiene el controlador PID, como se explicó anteriormente este tipo de controlador reúne todas las características del controlador P, D e I, es decir, su accionar va hacer más rápido debido al control P, se elimina el desplazamiento por la adición del control I, y es más robusto a perturbaciones debido al control D, en la Figura 51 se observa una similitud con el controlador PI con la diferencias de la adición del control D y su resistencia a perturbaciones para el sistema.



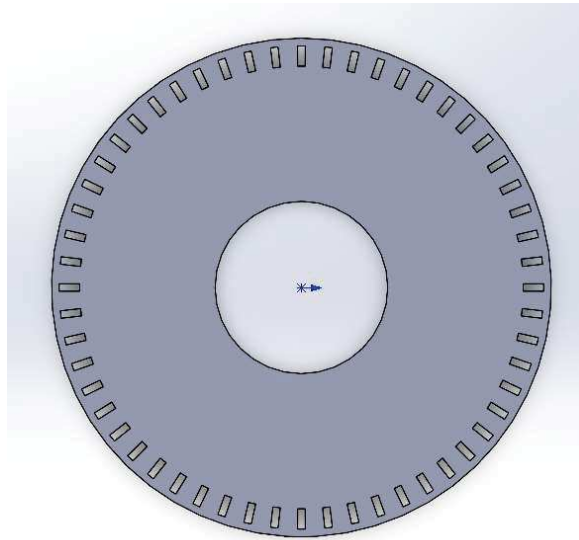
**Figura 50:** Sistema motor DC Controlador PID.



**Figura 51:** Resultado del sistema motor DC Controlador PID.

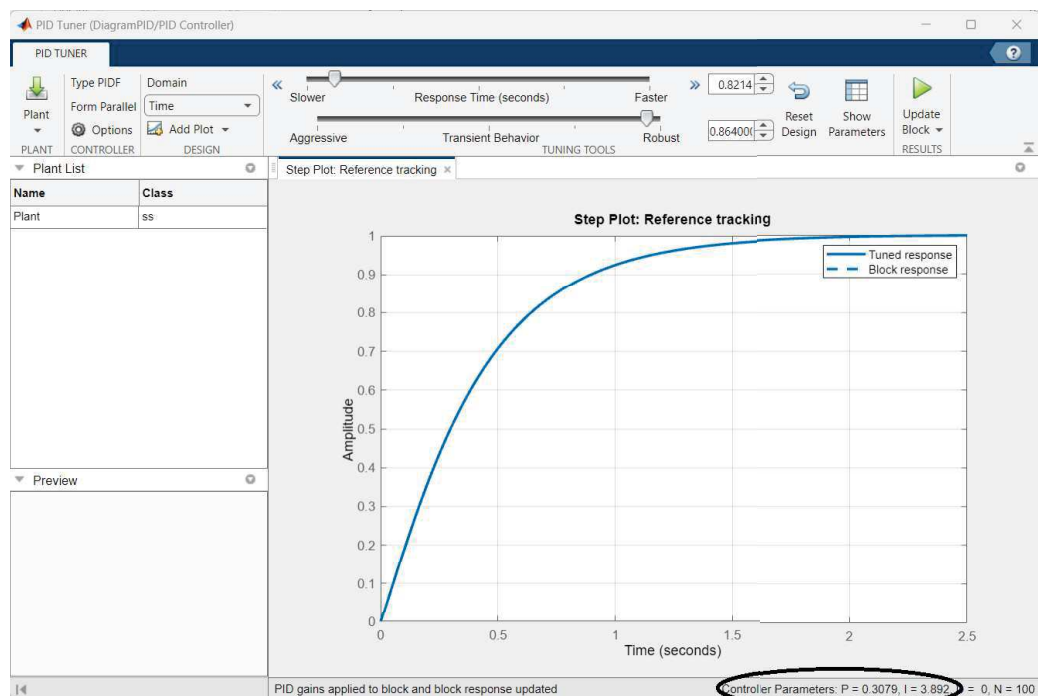
### 21.3. Implementación del controlador en los motores DC

Se decide utilizar el controlador PI debido a su rápido accionar y su eliminación de desplazamientos, no se emplea el controlador D debido a posibles sobreoscilación en la curva del sistema, es importante recordar que los elementos para la implementación del controlador PI son acoplados a los motores del carro de supermercado, por lo que, el encoder está acoplado al eje de la carga y no al eje del motor, la resolución del encoder es baja ya que no se multiplica con la relación de la caja reductora del motor, en la Figura 52 se observa el disco del encoder que se va a utilizar que en este caso tiene 56 agujeros los cuales traspasa la señal del emisor y receptor del sensor infrarrojo.



**Figura 52:** Disco implementado en el sistema de control.

Por medio de la herramienta de Simulink se obtiene los valores de  $K_p$  y  $K_i$  para obtener el mejor resultado, en este caso se requiere que el controlador sea lo más robusto posible y con una respuesta lenta debido a que se esta trabajando con un carro de supermercado que va a ir detrás de una persona y puede transportar productos delicados y no se requiere una respuesta rápida, en la Figura 53 se muestra los parámetros de las constantes que la herramienta utiliza.



**Figura 53:** Parámetros obtenidos por la herramienta control PID de simulink.

Por último, al momento de utilizar el controlador PI se realiza unos ajustes a las valores

de las constantes con el fin de obtener los mejores resultados, dando como respuesta las siguientes valores;  $K_p = 0,29$  y  $K_i = 3,38$ . Para utilizar el controlador es importante aplicar la ecuación de diferencias de un PID discreto como se observa en (53), [54].

$$C_v(n) = C_v(n - 1) + \left(k_p + \frac{k_d}{T_s}\right) e(n) + \left(-k_p + k_i \cdot T_s - 2\frac{k_d}{T_s}\right) e(n - 1) + \frac{k_d}{T_s} e(n - 2) \quad (53)$$

Donde:

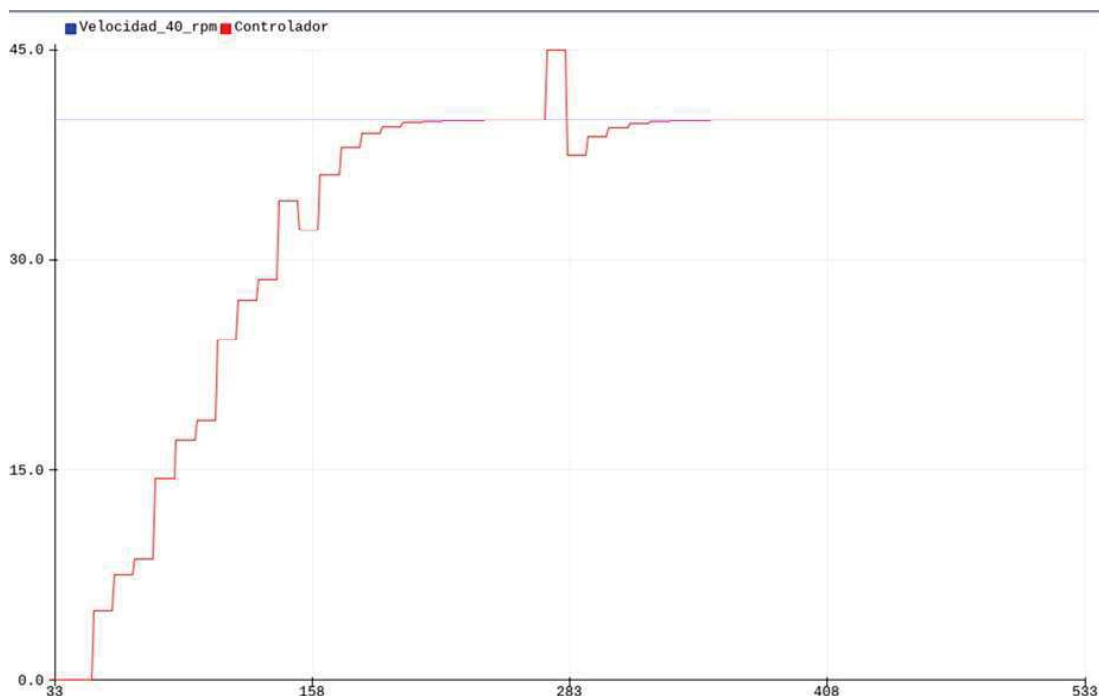
$C_v$  Salida del controlador, adimensional;

$n$  Muestra analizada, adimensional;

$T_s$  Tiempo de muestreo, adimensional;

$e$  Error, adimensional.

En la Figura 54 se muestra una pequeña variación entre un rango de 35 y 45 debido a la resolución del encoder en este caso se puede observar que tiene una poca cantidad de oscilaciones o picos que no afectan el rendimiento del motor.



**Figura 54:** Respuesta del sistema PI con  $K_p = 0,29$  y  $K_i = 3,38$ .

Por medio de (54) se determina el error porcentual del controlador con respecto a 40RPM.

$$E_p = \frac{V_v - V_a}{V_v} \cdot 100 \% \quad (54)$$

Donde:

$E_p$  Error porcentual, adimensional;

$V_v$  Valor real, adimensional;

$V_a$  Valor aproximado, adimensional.

$$E_p = \frac{40 - 45}{40} \cdot 100 \%$$

$$E_p = 12,5 \%$$

En este caso el error porcentual del controlador es de 12,5 %, este valor se da debido a la adaptación del encoder al motor, aunque en la Figura 54 se observa que a partir de dos los segundo no existe variación entre la velocidad deseada y la velocidad del controlador con un  $K_p = 0,29$  y  $K_i = 3,38$  .

## 22. Programación

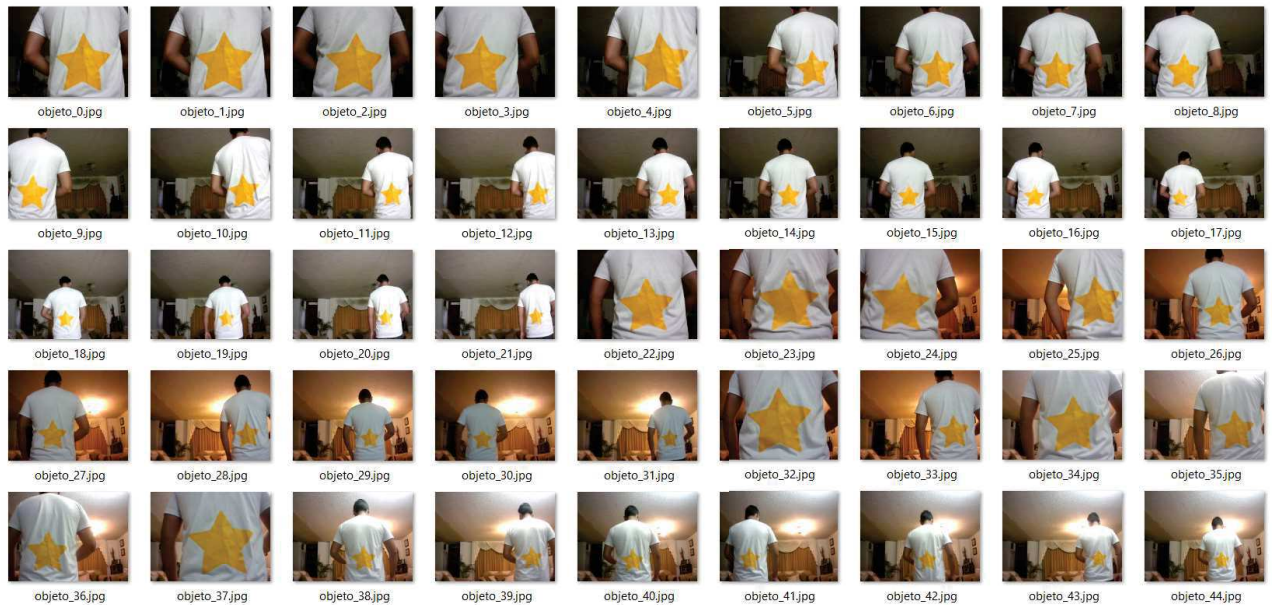
En esta sección se expone la forma y la lógica usada para la obtención de la distancia y la ubicación de la figura característica, los modos de operación de las diferentes detecciones de forma y color que el usuario puede hacer, las cuales son tres que se explican a continuación.

### 22.1. Detector de objetos Haar Cascade

Para determinar la distancia del carro de supermercado hasta el usuario es necesario reconocer la figura característica, en este caso se emplea la técnica de clasificación en cascada, esta se basa en la concatenación de varios clasificadores, es decir, cada clasificador analiza una parte diferente del frame debido a que se usa en un vídeo con el fin de unir todos estos clasificadores y formar un clasificador muy efectivo y potente, el objetivo de cada clasificador es encontrar características similares a las imágenes positivas previamente cargadas en el algoritmo, además, se debe cargar imágenes negativas que ayuden a la



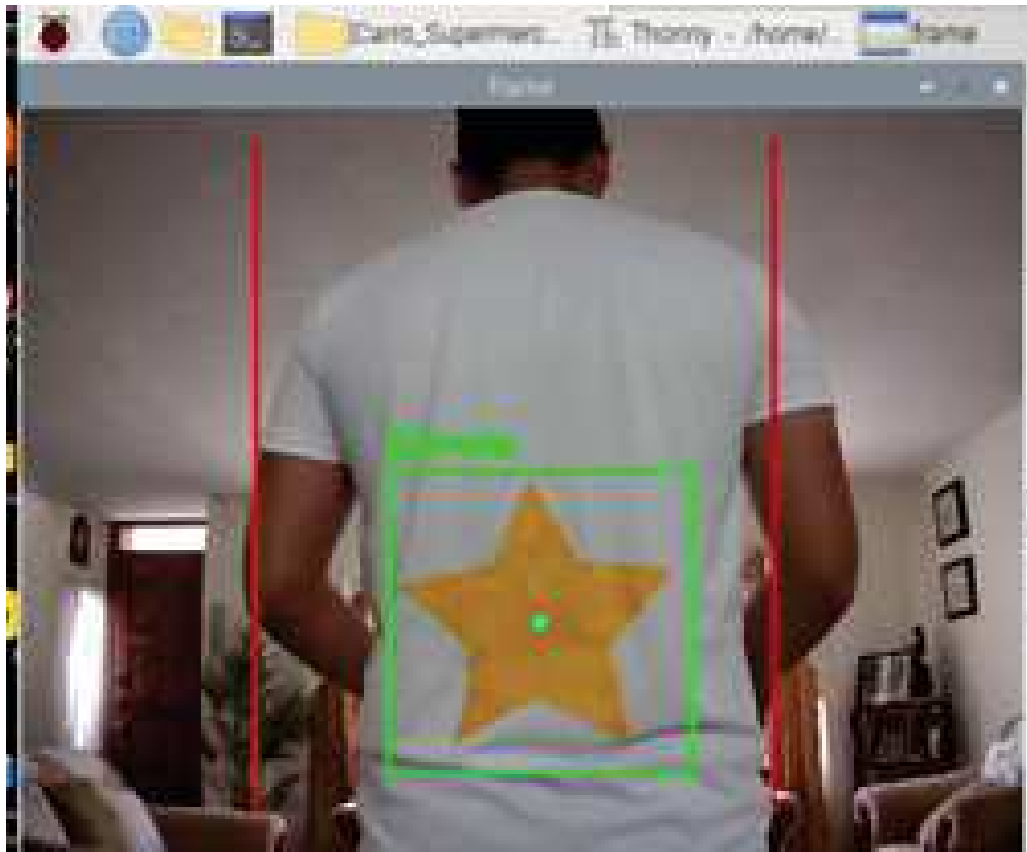
eficiencia del clasificador, por lo que, consiste en un aprendizaje automático en el que la función en cascada se entrena a partir de muchas imágenes positivas y negativas, en la Figura 55 se expone la base de datos de las imágenes positivas empleadas en este proyecto, [55].



**Figura 55:** Base de datos de la figura característica.

Se realizó un preprocesamiento de las imágenes con el fin de tener un correcto entrenamiento del clasificador Haar cascade, este preprocesamiento consiste en recortar las imágenes enfocando solo en la figura característica, además de un escalamiento con una dimensión de 24 x 24 píxeles, esta medida fue seleccionada debido a recomendaciones del mismo clasificador, [56].

Se utilizó una base de datos con 105 imágenes positivas recolectadas, y 261 imágenes negativas, en la Figura 56 se observa el frame generado con un rectángulo que identifica el objeto como ejemplo del resultado obtenido de este algoritmo.



**Figura 56:** Resultado del clasificador cascada.

### Matriz de confusión

Una matriz de confusión es una herramienta utilizada para evaluar el rendimiento de un modelo de clasificación, con el fin de conocer y evaluar la precisión del algoritmo ya sea para conocer si clasifica correctamente las imágenes positivas y negativas, evaluar la sensibilidad del clasificador de imágenes positivas y la especificidad de las imágenes negativas, en la Figura 57, se observa los valores de la matriz de confusión con sus resultados.

```

Matriz de confusión
[[32  3]
 [ 7 53]]
Presición
0.895
Sensibilidad
0.883
Especificidad
0.914
  
```

**Figura 57:** Resultado de la matriz de confusión.

Como se puede observar, la matriz de confusión determina que el modelo de clasificación tiene una precisión del 0.895, en este caso debido al número de imágenes positivas y negativas es un valor suficiente para la aplicación de este prototipo.

## 22.2. Distancia focal

Para encontrar la distancia entre el carro de supermercado y el usuario (por medio de la figura característica) es importante usar la distancia focal de una cámara con el fin de aprovechar al máximo las funciones que brinda la cámara colocada en la estructura del carro de supermercado, en este caso la distancia focal se determina por medio de la similitud de triángulos, es decir, en la Figura 58 se tiene un modelo del objeto proyectado en la imagen que se representa en la relación de triángulos de la Figura 59, [57].

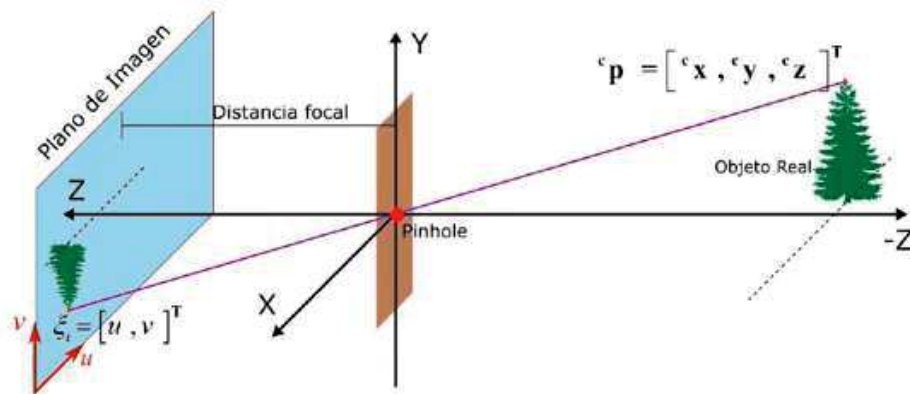


Figura 58: Representación del objeto proyectado en la imagen, [57].

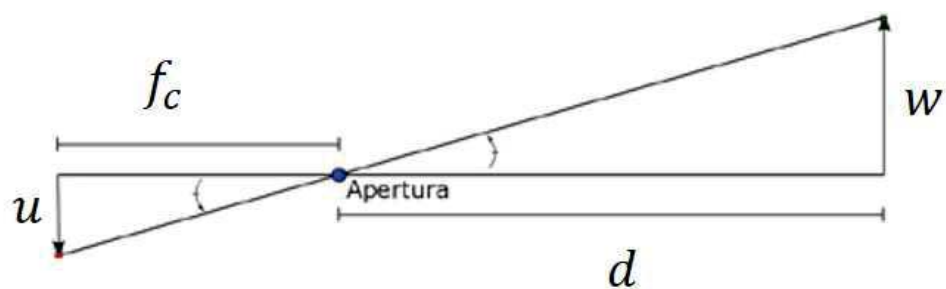


Figura 59: [Relación de triángulos distancia real, [57].

$$\frac{f_c}{d_f} = \frac{u_f}{w_f} \quad (55)$$

$$d_f = \frac{w_f \cdot f_c}{u_f} \quad (56)$$

Donde:

$d_f$  Distancia de la cámara, en m;

$f_c$  Distancia focal, adimensional;

$u_f$  Ancho del objeto proyectado en el plano de la imagen, en px;

$w_f$  Ancho del objeto, en m.

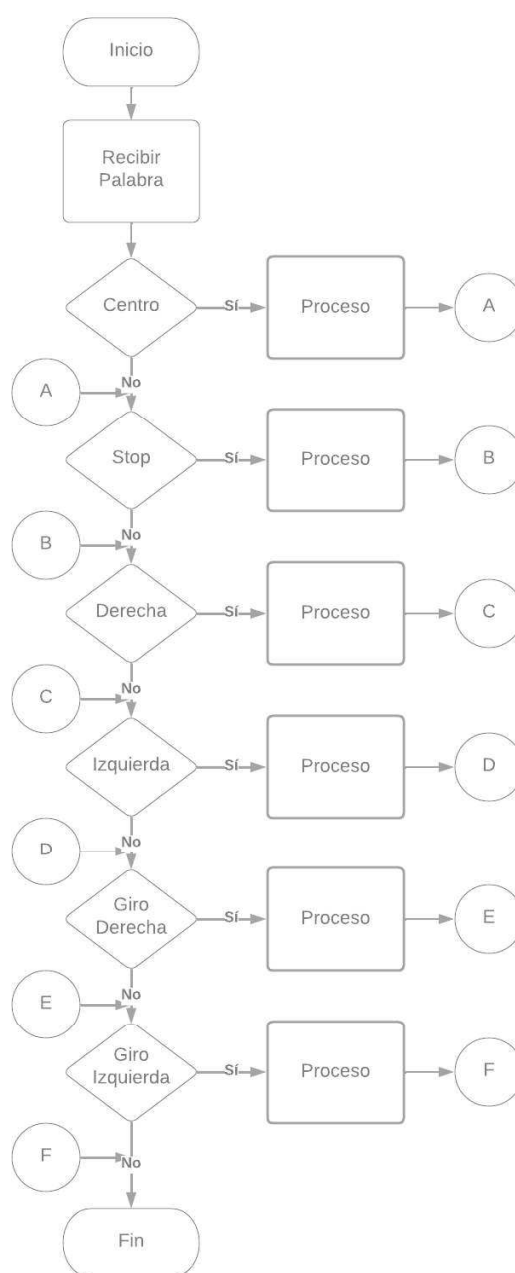
En la Figura 60 se expone un ejemplo del resultado de este algoritmo, cabe recalcar que se debe conocer previamente el ancho real de la figura que se desee medir su distancia.



**Figura 60:** Resultado del algoritmo de distancia focal.

### 22.3. Modo de funcionamiento

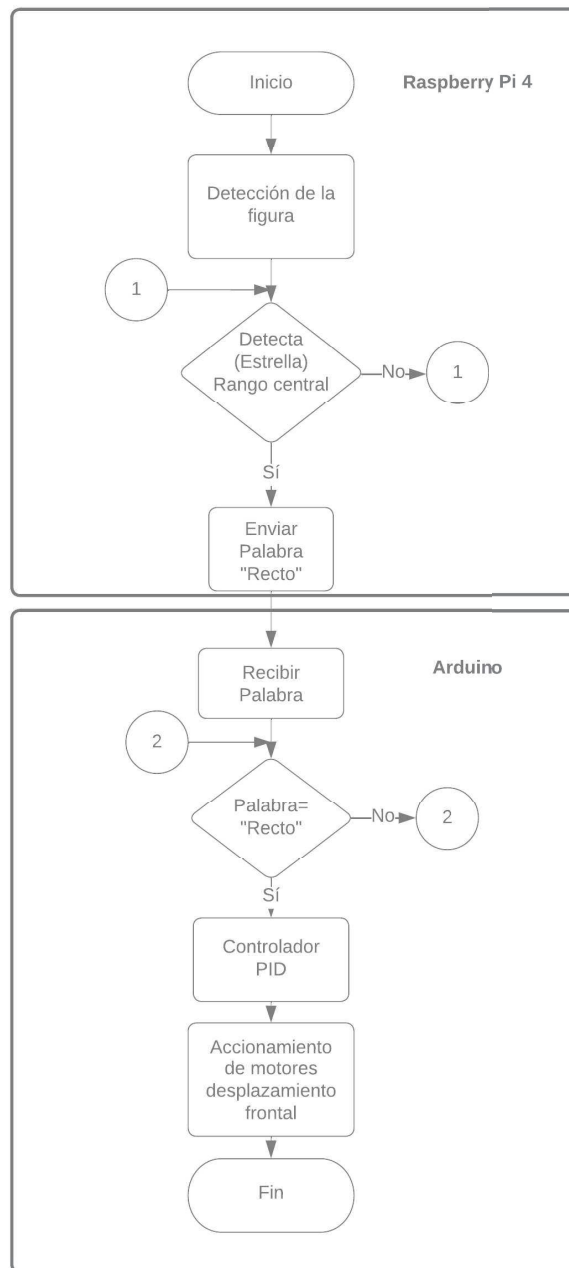
El Raspberry Pi es el encargado de transmitir las señales o gestos que realiza el usuario por medio de comunicación serial, el Arduino envía las señales a los actuadores (motores y buzzer) y recibe señales por medio de los sensores ultrasónicos, son 6 señales que el Raspberry Pi puede detectar y enviar al Arduino, en la Figura 61 se detalla el diagrama de bloques de las 6 señales recibidas.



**Figura 61:** Señales recibidas del Arduino por medio de comunicación serial.

### Modo de funcionamiento (Desplazamiento frontal)

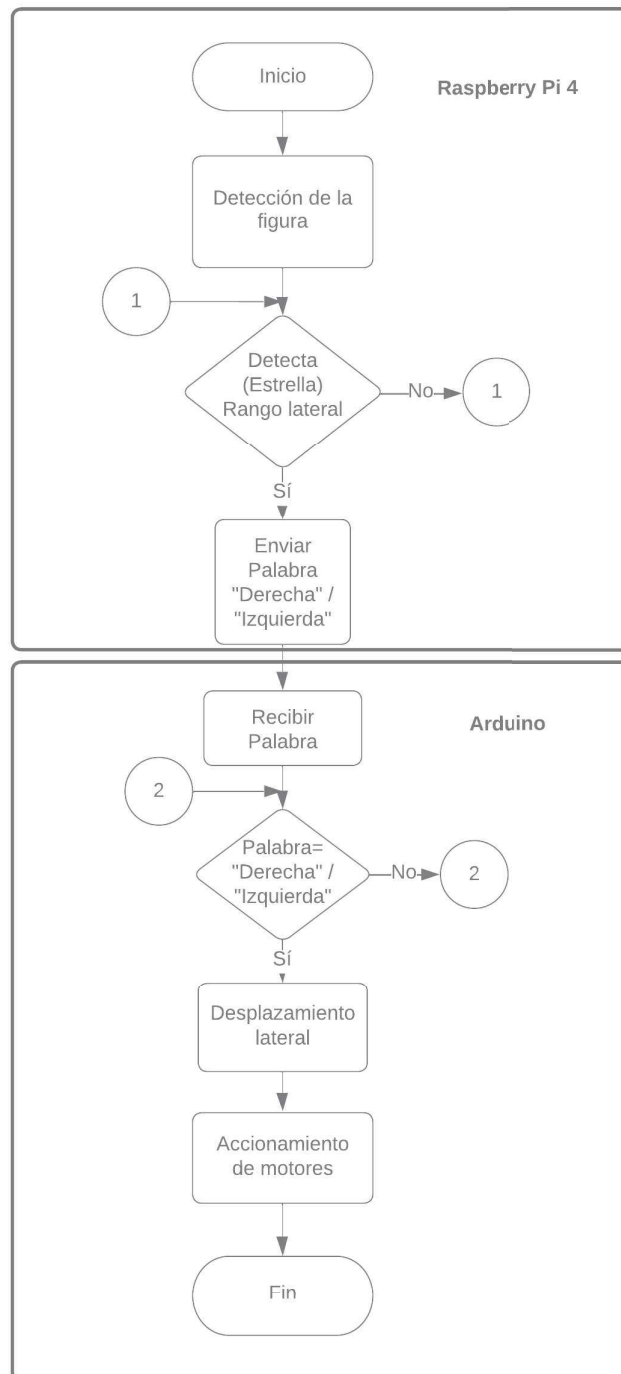
En este modo el usuario debe colocarse al frente del carro de supermercado con la camiseta de la figura característica a una distancia superior a 30cm con el fin de que el carro se desplace hacia el en sentido vertical, en la Figura 62 se observa el diagrama de flujo del modo de operación del Raspberry Pi 4 y el Arduino.



**Figura 62:** Lógica, desplazamiento frontal.

### Modo de funcionamiento (Desplazamiento lateral)

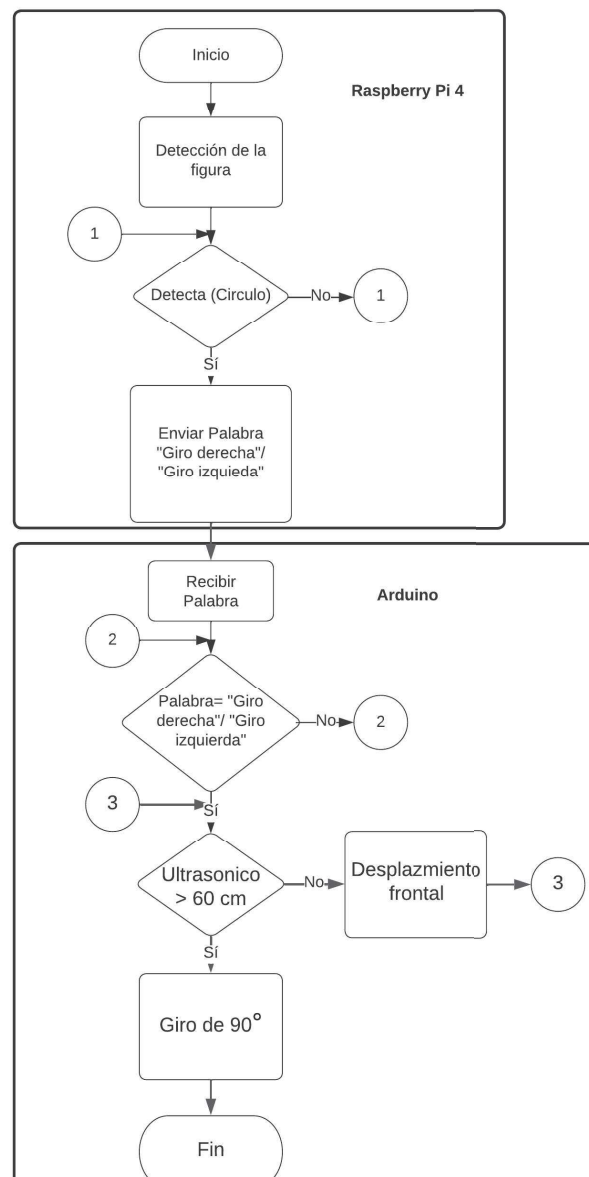
En este modo el usuario debe colocarse al frente del carro de supermercado similar al modo de funcionamiento frontal con la diferencia de que el centroide de la figura característica debe estar en la zona lateral con el fin de que el carro se desplace lateralmente, en la Figura 63 se observa el diagrama de flujo de este modo de operación.



**Figura 63:** Lógica, desplazamiento lateral.

### Modo de funcionamiento (Giro de 90°)

En este modo el usuario debe alzar la mano derecha o izquierda dependiendo el sentido de giro que desee desplazarse como se observa en la Figura 64 con el fin de que el carro de supermercado conozca las intenciones del usuario, una vez que el sensor no detecte ningún objeto (estanterías) a una distancia de 60cm, el carro de supermercado ejecutará un giro de 90°.



**Figura 64:** Lógica, Giro de 90°.



## 23. Pruebas y resultados

### 23.1. Pruebas de reconocimiento

En esta subsección se realiza dos tipos de pruebas de reconocimiento del objeto que porta el usuario, la primera prueba realizada consiste en el reconocimiento del objeto en diversas distancias entre el robot móvil y el usuario como se puede observar en la Tabla 25.

**Tabla 25:** Pruebas de reconocimiento por distancia.

Número de pruebas	Distancia real [m]	Distancia focal [m]
1	0,15	No reconocimiento
2	0,3	0,30
3	0,7	0,71
4	1	1,05
5	1,3	1,31
6	1,5	1,51
7	1,8	1,8
8	2	2,03
9	2,4	2,4
10	2,8	2,82
11	3	No reconocimiento

Como se puede analizar en la Tabla 25 el rango operativo del carro del supermercado es de 0,3 a 2,80m, el cual es un rango suficiente que tiene el usuario para desplazarse y que el prototipo lo siga, en la Figura 65 se observa un ejemplo de detección y la distancia focal calculada por el prototipo.



**Figura 65:** Distancia real = 1,5m; distancia focal = 1,51m.

La segunda prueba se realizó en diferentes tipos de posiciones que puede adoptar el usuario en el supermercado, con el fin de analizar hasta que grado de inclinación el objeto es detectado como se muestra en la Tabla 26.

**Tabla 26:** Pruebas de reconocimiento por inclinación del usuario.

Número de pruebas	Inclinación [°]	Reconocimiento
1	0	Si
2	30	Si
3	-30	Si
4	45	Si
5	-45	Si
6	60	No
7	-60	No
8	90	No
9	-90	No
10	180	No

En este caso, en la Tabla 26 indica que el grado de inclinación máxima que puede girar el usuario es de  $45^\circ$  a cada lado, siendo suficiente para que el prototipo no detecte falsos positivos, debido a que el usuario puede moverse y girar para tomar un producto y no para que el carro se desplace, en la Figura 66 se observa un ejemplo de detección con un ángulo de  $45^\circ$ .



**Figura 66:** Reconocimiento con inclinación.

### 23.2. Pruebas de desplazamiento

Terminado con las pruebas de reconocimiento, se ejecutó las pruebas de desplazamiento, que consiste en analizar el desplazamiento hacia adelante con diferentes tipos de masas y una velocidad constante, esta prueba se evalúa por medio de una rúbrica, donde 1 es excelente, es decir, se desplazó en velocidad constante y en línea recta, 2 es regular, es decir, cumplió con uno de los dos objetivos, desplazarse en línea recta o velocidad constante y 3 no cumplió con ningún objetivo, como se observa en el Tabla 27.

**Tabla 27:** Pruebas de desplazamiento.

Número de pruebas	Masas [kg]	Ponderación de evaluación
1	5	2
2	10	2
3	15	1
4	20	1
5	25	1
6	30	1
7	35	1
8	40	1

Como se observa en la Tabla 27, el prototipo presenta dificultades cuando la masa tiene valores entre 5 – 10kg, esto es debido a que uno de los dos motores alcanza la velocidad

deseada unos ms antes, por lo que, cambia un poco la trayectoria, en la Figura 67 se observa la desviación que el prototipo sigue con el rango de masa de 5 – 10kg, por medio de un análisis gráfico se detecta que la desviación del carro de supermercado es de 5°.



**Figura 67:** Desviación en la prueba de desplazamiento de 5 y 10kg.

### 23.3. Pruebas de giro de 90°

Al igual que las pruebas de desplazamiento, la prueba de giro de 90° se ejecutó por medio de diferentes masas con un la rúbrica de evaluación similar, como se muestra en el Tabla 28.

**Tabla 28:** Pruebas de giro.

Número de pruebas	Masas [kg]	Ponderación de evaluación
1	5	1
2	10	1
3	15	1
4	20	1
5	25	2
6	30	2
7	35	2
8	40	2

Como se aprecia en la Tabla 28, el prototipo tenía dificultad al momento de girar al lado

derecho o izquierdo, esta prueba permitió calibrar el tiempo de giro de 90°.

#### 23.4. Pruebas de precisión

Debido a que se usa un detector de objetos que utiliza un conjunto de características pre definidas es necesario evaluar el número de imágenes positivas y negativas de la base de datos, en este caso la precisión deseada del clasificador como el coste computacional esta relacionado con la cantidad de imágenes. En esta prueba se coloca la figura característica en diferentes posiciones de la cámara con el fin de evaluar el número de posiciones reconocidas por el clasificador.

**Tabla 29:** Pruebas de número de imágenes.

Número de imágenes	Número de reconocimientos	Error [%]
40	40	20
60	42	16
80	43	14
105	45	10

En este caso se evaluó 50 posiciones diferentes dentro del rango de la cámara, como se aprecia en la Tabla 29 existe una mayor presión de reconocimiento mientras más imágenes dispone la base de datos, aunque la base de datos de 105 imágenes no reconoce todas las posiciones es un error aceptable para la aplicaciones del prototipo, además, es importante recordar que el número de imágenes influye en el coste computacional al momento del entrenamiento y detección en tiempo real.

#### 23.5. Pruebas de iluminación

En esa prueba se decidió colocar dos tipos de iluminación, una con luz blanca con 800 lúmenes y una con luz cálida con 800 lúmenes, para verificar la funcionalidad con otro tipo de luz, es importante recordar que la base de datos se realizó con imágenes con luz blanca y la prueba se evaluó con 50 posiciones diferentes.

**Tabla 30:** Pruebas de iluminación.

	Luz blanca	Luz cálida
	45	37
Error [%]	10	26

Como se puede observar en la Tabla 30, el uso de la luz cálida afecta notablemente al reconocimiento de la figura característica, es así que se recomienda el uso del prototipo en un ambiente controlado.

### 23.6. Pruebas de distancia evasión de personas y estanterías

El carro de supermercado cuenta con dos sensores ultrasónicos en cada lado de la estructura, esto con el fin de calcular la distancia entre el carro de supermercado y las estanterías o personas, es importante indicar que la distancia máxima que va a detectar los sensores es de 60cm, el rango de pruebas fue desde 1 a 60cm, como se observa en la Tabla 31.

**Tabla 31:** Pruebas de distancia entre objetos.

Número de pruebas	Distancia real [cm]	Distancia medida [cm]	Error [%]
2	5	5	0
3	10	9	10
4	15	15	0
5	20	20	0
6	25	25	0
7	30	31	3,33
8	35	34	2,85
9	40	40	0
10	45	44	2,22
11	50	50	0
12	55	54	1,81
13	60	61	1,67

Como se puede apreciar en la Tabla 31 y con (54) el error porcentual máximo es de 3,33 %, en este caso en un error aceptable para reconocer la distancia entre estanterías o personas, cabe recalcar que el prototipo esquiva los obstáculos con una distancia menor a 15cm.

### 23.7. Prueba de estatura del usuario

Por último, se realizó pruebas de diferentes alturas con la figura característica para establecer un rango de estatura que el usuario pueda tener para el uso óptimo del prototipo, cabe recalcar que la altura medida en la Tabla 32 se da desde el suelo hasta la espalda baja del usuario debido a que la figura característica se coloca en esa posición.

**Tabla 32:** Pruebas de estatura.

Número de pruebas	Estatura [cm]	Reconocimiento
1	50	No
2	60	Si
3	70	Si
4	80	Si
5	90	Si
6	100	Si
7	110	Si
8	120	Si
9	130	Si
10	140	Si
11	150	No

Debido a que la cámara puede girar verticalmente el rango de operación de la estatura del usuario es muy amplio, como se observa en la Tabla 32.

### 23.8. Análisis de costo

En esta sección se analiza el costo de fabricación del prototipo de carro de supermercado.

**Tabla 33:** Costo total del prototipo.

Material	Cantidad	Precio	Precio total
Fabricación de la estructura	1	300	300
Ruedas de los motores	2	20	40
Ruedas locas delanteras	2	12	24
Impresión 3D (soporte sensores ultrasónicos)	2	5	10
Corte láser (Disco y soporte de encoder)	4	0,7	2,8
Caja de metal	1	19	19
Camiseta y guantes estampados	1	20	20
Motores DC	2	100	200
Acoples de motores	2	15	30
Drivers motores	2	12	24
Cámara	1	30	30
Sensor encoder	2	3	6
Sensores ultrasónicos	2	3	6
Baterías	2	70	140
Regulador de voltaje	1	5	5
Buzzer 5v	1	1,5	1,5
Raspberry Pi 4	1	120	120
Arduino nano	1	9	9
Circuito impreso	1	15	15
Varios (resistencias, comparadores, alambre, etc)	1	15	15
Subtotal			\$ 1017,3
Mano de obra	1	675	\$ 675
Total			\$ 1692,3

Como se puede apreciar en la Tabla 33 el costo total del prototipo es de \$1692,3 con el cual los beneficios que tiene la construcción del prototipo se detalla a continuación.

- El costo de carros de supermercado con características o funciones similares esta alrededor de \$900 hasta \$6000 por lo que el precio de este prototipo va acorde a la competencia del mercado.
- El usuario puede transportar una carga de 40kg sin la necesidad de realizar algún esfuerzo.
- El prototipo es capaz de desplazarse si esta cerca de una colisión con estanterías o personas.
- La capacitación del uso no es complejo, el usuario puede realizar todas las funciones que provee el prototipo.



## 24. Conclusiones

- Se investigó los diferentes tipos de carros de supermercado manuales e inteligentes con el fin de analizar sus características más importantes.
- El prototipo está diseñado para trabajar en un ambiente controlado y dimensiones acorde a normativas internacionales de construcción de supermercado.
- Las dimensiones del prototipo son 790mm x 760mm x 1030mm, con el fin de desplazarse dentro de los carriles de supermercado de derecha e izquierda sin inconvenientes, la estructura del prototipo está diseñada para que soporte una masa de 40kg.
- Se seleccionó los componentes para obtener una autonomía de duración de trabajo continuo de más de 1h con una velocidad de 0,83m/s.
- Se utilizó un clasificador Haar Cascade para la extracción de característica y detección con una base de datos de 105 imágenes positivas y 261 negativas.
- El prototipo puede reconocer al usuario (figura característica) entre una distancia de 0,3 a 2,8m, la altura de la figura característica en la espalda baja del usuario puede variar entre 60cm y 140cm.
- El prototipo puede reconocer la figura característica con un máximo de inclinación de 45°.
- El control PI implementado en los motores permite realizar un correcto desplazamiento por el carril de supermercado con un alcance de su velocidad de 60RPM en 2s.
- Los sensores implementados en las partes laterales del prototipo ayuda a la prevención de accidentes contra anaqueles o personas.

## 25. Recomendaciones

- El suelo debe ser totalmente plano sin ningún tipo de inclinación, además de trabajar en un ambiente controlado con un mismo tipo de luz.

- Cargar las baterías pasado los 23,8V que se indica en la pantalla de monitoreo de voltaje.
- No exceder la masa de 40kg con el fin de tener un mejor desempeño y una mayor duración de batería.
- Para trasladar el prototipo con el microcontrolador apagado es necesario colocar las palancas de los motores a neutro.
- Reemplazar los motores con características similares pero con un encoder integrado.
- Aumentar la memoria RAM del microcontrolador (Raspberry Pi 4) por su máxima capacidad de 8GB para un mejor desempeño.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] ¿quién inventó el carrito de la compra? [En línea]. Disponible: <https://www.muyhistoria.es/curiosidades/preguntas-respuestas/i quien-invento-el-carrito-de-la-compra-2744> [Fecha de consulta: Diciembre 2022]
- [2] Carros de supermercado – m180. [En línea]. Disponible: <https://carttec.com/retail/carros-de-supermercado/metal/m180/> [Fecha de consulta: Mayo 2023]
- [3] Carros de supermercado – p100. [En línea]. Disponible: <https://carttec.com/retail/carros-de-supermercado/plastico/p100/> [Fecha de consulta: Mayo 2023]
- [4] Carttec, “I180,” 2019. [En línea]. Disponible: <https://carttec.com/retail/carros-para-personas-con-movilidad-reducida/i180/>
- [5] Carro de compras plegable dmi: Carro de compras plegable, capacidad de carga de 90 lb, acero, con recubrimiento en polvo. [En línea]. Disponible: [https://www.grainger.com/product/DMI-Folding-Shopping-Cart-Folding-34KY56?opr=PDPRRDSPanalytics=dsrrItems\\_6PPZ9](https://www.grainger.com/product/DMI-Folding-Shopping-Cart-Folding-34KY56?opr=PDPRRDSPanalytics=dsrrItems_6PPZ9) [Fecha de consulta: Mayo 2023]
- [6] Sección 6.2. comercial. [En línea]. Disponible: <https://www.rosario.gob.ar/mr/normativa/reglamento-de-edificacion/seccion-6-de-las-prescripciones-especificas-para-cada-uso/seccion-6-2-comercial> [Fecha de consulta: Junio 2023]
- [7] R. Público, “Sección SI 3,” pp. 34–54. [En línea]. Disponible: [https://statics.solerpalau.com/media/import/documentation/CTE\\_DB\\_SI3\\_Seguridad\\_en\\_cas](https://statics.solerpalau.com/media/import/documentation/CTE_DB_SI3_Seguridad_en_cas)
- [8] Robots móviles: Tipos, funciones, ventajas y desventajas. [En línea]. Disponible: <https://www.beetrack.com/es/blog/robots-moviles> [Fecha de consulta: Diciembre 2022]
- [9] J. Garcia, *Análisis Cinemático, dinámico y Control en Tiempo Real de un Vehículo Guiado Automáticamente*, 2010.

- [10] Control de maquinaria: control en lazo abierto / cerrado. [En línea]. Disponible: <https://sinadrives.com/es/control-de-maquinaria-control-en-lazo-abierto-cerrado/>: :text=El %20control %20en %20lazo0abierto,los %20resultados %20de %20medicion [Fecha de consulta: Enero 2023]
- [11] E. Isaza Velásquez, “El modelo de control retroalimentado como paradigma en la administración del mantenimiento industrial.” *Scientia Et Technica*, vol. XII, no. 32, pp. 219–224, 2006.
- [12] Tipos de controladores. [En línea]. Disponible: <https://www.electronicafacil.top/ingenieria-control/tipos-de-controladores-controladores-proporcionales-integrales-y-derivados/> (2022)
- [13] V. Mazzone, “Controladores pid,” 2018. [En línea]. Disponible: <https://www.eng.newcastle.edu.au/~jhb519/teaching/caut1/Apuntes/PID.pdf>
- [14] C. Generales, “Visión artificial,” 2019.
- [15] A. Duque, “Sistema de atención visual para la detección de puntos topológicos de referencia,” 08 2022.
- [16] Infaimon, “Cámaras,” 2020. [En línea]. Disponible: <https://www.infaimon.com/categoria-producto/camaras/>
- [17] Campo de vision. [En línea]. Disponible: <https://www.bcnavision.es/blog-vision-artificial/opticas-para-vision-artificial/> [Fecha de consulta: Agosto 2022]
- [18] R. Wainschenker, “Procesamiento Digital de Imágenes Objetivos de la materia,” 2011.
- [19] Resolución de imagen impresa. [En línea]. Disponible: <https://helpx.adobe.com/es/photoshop/using/image-size-resolution> [Fecha de consulta: Agosto 2022]
- [20] N. A. DOBERNACK, “Procesamiento de imágenes,” pp. 42–72.
- [21] Rgb. [En línea]. Disponible: <https://grupoticc.com/2021/01/27/modelo-de-color-rgb/> [Fecha de consulta: Junio 2021]

- [22] Hsv. [En línea]. Disponible: [https://es.wikipedia.org/wiki/Modelo\\_de\\_color\\_HSV](https://es.wikipedia.org/wiki/Modelo_de_color_HSV) [Fecha de consulta: Junio 2021]
- [23] Hsi. [En línea]. Disponible: [https://www.researchgate.net/figure/Espacio-de-color-HSI-La-conversion-de-RGB-rango-de-0-1-a-HSI-con-rango-de-0-360\\_fig3\\_325229810](https://www.researchgate.net/figure/Espacio-de-color-HSI-La-conversion-de-RGB-rango-de-0-1-a-HSI-con-rango-de-0-360_fig3_325229810) [Fecha de consulta: Junio 2021]
- [24] J. V. Lozano, "Tema 5 : Morfología Primera parte Morfología," vol. 3, p. 53, 2016.
- [25] J. Hellbrück, S. Schlittmeier, y M. Klatte, "Ruido, ruido, ruido," *Mente y Cerebro*, vol. SEPTIEMBRE, no. 6, pp. 3,22, 2013.
- [26] A. R. I. Guzmán, "Reconocimiento de patrones e inteligencia artificial," 2020. [En línea]. Disponible: <https://revistaecys.github.io/17Edicion/articulo12.html>
- [27] D. G. S. Richard O. Duda, Peter E. Hart, *Pattern classification*, New York, 2001.
- [28] A. Oliva, "Desarrollo de una aplicación de reconocimiento en imágenes utilizando Deep Learning con OpenCV," *Repositorio de la Universidad Politecnica de Valencia*, p. 1 a 104, 2018. [En línea]. Disponible: <https://riunet.upv.es/handle/10251/107243>
- [29] B. Úbeda, "Apuntes de: Sistemas embebidos (2009)," *Universidad de Murcia*, pp. 1–30, 2009.
- [30] D. Garavito y G. Vargas, "DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE MOVILIDAD DE AUTÓNOMO PARA UN CARRO DE MERCADO ESTÁNDAR," Ph.D. dissertation, UNIVERSIDAD PILOTO DE COLOMBIA, 2017. [En línea]. Disponible: [https://docplayer.es/92407680-Diseno-e-implementacion-de-un-sistema-de-movilidad-autonomo-para-un-carro-de-mercado-estandar.html#show\\_full\\_text](https://docplayer.es/92407680-Diseno-e-implementacion-de-un-sistema-de-movilidad-autonomo-para-un-carro-de-mercado-estandar.html#show_full_text)
- [31] Disnaempa, "Carretilla de Compra," 2021. [En línea]. Disponible: <https://disnaempa.com/producto/carretilla-de-compra/>
- [32] Robotnik, "Carro de la compra autónomo ROBOT MÓVIL ELI," 2020. [En línea]. Disponible: <https://robotnik.eu/es/productos/customizacion/customizacion-eli/>

- [33] Astm a36 acero propiedades ficha tecnica: Fy, dureza, densidad. [En línea]. Disponible: <https://www.materialmundial.com/acero-astm-a36-propiedades-ficha-tecnica-estructural/> [Fecha de consulta: Diciembre 2022]
- [34] Arduino uno rev3. [En línea]. Disponible: <https://store.arduino.cc/products/arduino-uno-rev3> [Fecha de consulta: Noviembre 2022]
- [35] Raspberry pi zero 2 w. [En línea]. Disponible: <https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-zero-2-w/> [Fecha de consulta: Noviembre 2022]
- [36] Especificaciones técnicas de raspberry pi 4. [En línea]. Disponible: <https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-4-model-b/specifications/> [Fecha de consulta: Noviembre 2022]
- [37] Regulador dc step down modulo 6-24v a 5v 3a usb rye. [En línea]. Disponible: [https://articulo.mercadolibre.com.ec/MEC-516529920-regulador-dc-step-down-modulo-6-24v-a-5v-3a-usb-rye-\\_JMposition=23search\\_layout=stacktype=item&tracking\\_id=32628fe5-4638-412f-af38-b37b9b2b5b89](https://articulo.mercadolibre.com.ec/MEC-516529920-regulador-dc-step-down-modulo-6-24v-a-5v-3a-usb-rye-_JMposition=23search_layout=stacktype=item&tracking_id=32628fe5-4638-412f-af38-b37b9b2b5b89) [Fecha de consulta: Diciembre 2022]
- [38] Uctronics módulo convertidor de corriente continua de 6 v, 9 v, 12 v, 24 v a cc 5 v, 5 a, paso hacia abajo de 9 a 36 v a usb 5 v, placa reguladora de voltaje de salida dual [paquete de 2). [En línea]. Disponible: <https://a.co/d/dJetncr> [Fecha de consulta: Diciembre 2022]
- [39] Regulador de voltaje ajustable cc, convertidor drok buck boost 6.0v-36v 9v 12v a cc 0.6-36v 24v 5a, panel de fuente de alimentación, módulo de aumento de voltaje de corriente constante. [En línea]. Disponible: <https://a.co/d/4aolBZ4> [Fecha de consulta: Diciembre 2022]
- [40] Reductor de voltaje xl4015 5a + regulador corriente. [En línea]. Disponible: <https://roboticsec.com/producto/reductor-de-voltaje-xl4015-5a-regulador-corriente/> [Fecha de consulta: Enero 2023]

- [41] Hcsr04 sensor ultrasónico. [En línea]. Disponible: <https://novatronicec.com/index.php/product/hcsr04-sensor-ultrasonico/> [Fecha de consulta: Noviembre 2022]
- [42] Modulo infrarrojo proximidad. [En línea]. Disponible: <https://www.electronicasmd.com/productos/sensores/infrarrojo/> [Fecha de consulta: Noviembre 2022]
- [43] Sensor inductivo: Detector de metales con arduino. [En línea]. Disponible: <https://www.murkyrobot.com/guias/sensores/sensor-inductivo> [Fecha de consulta: Noviembre 2022]
- [44] Sensor detector de velocidad tipo herradura para encoder fc03. [En línea]. Disponible: <https://suconel.com/product/sensor-detector-de-velocidad-tipo-herradura-para-encoder-fc03/> [Fecha de consulta: Noviembre 2022]
- [45] R. L. Mott, *Diseño de elementos de máquinas*, 2004, vol. 4.
- [46] R. O. Budynas y J. K. Nisbett, *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*, 2012.
- [47] Tubo redondo mecánico. [En línea]. Disponible: <https://www.importaceros.com/ecuador-quito/tubo-redondo-mecanico/> [Fecha de consulta: Diciembre 2022]
- [48] X. A. Jódar, “DIFERENCIAS Y SIMILITUDES ENTRE EL ROZAMIENTO DESLIZANTE Y EL ROZAMIENTO EN GIRO,” pp. 1–8, 2018. [En línea]. Disponible: [https://nanopdf.com/download/fuerzas-de-rozamiento-en-giro-y-deslizante\\_pdf#modals](https://nanopdf.com/download/fuerzas-de-rozamiento-en-giro-y-deslizante_pdf#modals)
- [49] Anonimo, “Sistemas de Locomoción de robots móviles,” *Automatización y Robótica Industrial 5 Ing. Industrial*.
- [50] 250w electric wheelchair powertrain pm dc motor - scd2-a. [En línea]. Disponible: <https://robodo.in/products/250w-electric-wheelchair-powertrain-pm-dc-motor-scd2-a> [Fecha de consulta: Noviembre 2022]

- [51] Aitrip 2 unids bts7960 43a módulo de conductor de motor de alta potencia/módulo de conductor de coche inteligente para arduino límite de corriente. [En línea]. Disponible: <https://a.co/d/d5TLdwN> [Fecha de consulta: Diciembre 2022]
- [52] B. Kuo, “Sistemas de Control Automático,7ed,931p.pdf,” p. 931, 1996.
- [53] M. G. Quijano Ortega y C. G. Hernández Capacho, “Obtención experimental de los parámetros del motor que se utilizará en el sistema de locomocion de una esfera rodante,” vol. 2, pp. 1–48, 2009.
- [54] Controladores pid discreto. [En línea]. Disponible: <https://controlautomaticoeducacion.com/control-realimentado/controladores-pid-discreto/> [Fecha de consulta: Mayo 2023]
- [55] Ezequiel Ángel Jeremías, “Reconocimiento de objetos a través de lametodología Haar-Cascades,” pp. 1–7, 2020.
- [56] Cascade trainer gui. [En línea]. Disponible: <https://amin-ahmadi.com/cascade-trainer-gui/> [Fecha de consulta: Agosto 2022]
- [57] Teoría para estimar distancia focal de una cámara. [En línea]. Disponible: <https://roboticoss.com/temas/teoria-para-estimar-distancia-focal-de-una-camara/> [Fecha de consulta: Abril 2023]