

Autor: Luis Alberto Ángeles Hurtado

Desarrollo de un sistema de clasificación para plásticos reciclables  
de alta detección y diseño asequible respecto a sistemas actuales

Año 2023



Universidad Autónoma de Querétaro  
Facultad de Ingeniería

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE CLASIFICACIÓN  
PARA PLÁSTICOS RECICLABLES DE ALTA  
DETECCIÓN Y DISEÑO ASEQUIBLE RESPECTO A  
SISTEMAS ACTUALES

**Tesis**

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de  
Doctor en Ingeniería

**Presenta**

Luis Alberto Ángeles Hurtado

**Dirigido por:**

Juvenal Rodríguez Reséndiz

Querétaro, Qro. Agosto 2023



Dirección General de Bibliotecas y Servicios Digitales  
de Información



Desarrollo de un sistema de clasificación para  
plásticos reciclables de alta detección y diseño  
asequible respecto a sistemas actuales

**por**

Luis Alberto Ángeles Hurtado

se distribuye bajo una [Licencia Creative Commons  
Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0  
Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

**Clave RI:** IGDCC-126494



# Universidad Autónoma de Querétaro

## Facultad de Ingeniería

### Doctorado en Ingeniería

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE CLASIFICACIÓN PARA PLÁSTICOS  
RECICLABLES DE ALTA DETECCIÓN Y DISEÑO ASEQUIBLE RESPECTO A  
SISTEMAS ACTUALES

#### **Tesis**

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de  
Doctor en Ingeniería

#### **Presenta:**

Luis Alberto Ángeles Hurtado

#### **Dirigido por:**

Juvenal Rodríguez Reséndiz

Dr. Juvenal Rodríguez Reséndiz  
Presidente

Dr. Roberto Valentín Carrillo Serrano  
Secretario

Dra. Hilda Romero Zepeda  
Vocal

Dr. Sebastián Salazar Colores  
Suplente

Dr. Manuel Toledano Ayala  
Suplente

Centro Universitario, Querétaro, Qro.  
Agosto de 2023  
**México**

# **DEDICATORIAS**

**A mi familia por apoyarme y a las personas que me han rodeado a lo largo de toda mi vida.**

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a mis padres, hermanos, amigos a la Universidad Autónoma de Querétaro y sinodales por apoyarme. En particular, a la Dra. Hilda Romero Zepeda que me apoyo desde la licenciatura cuando nadie creía en mí y que fue la primera en motivarme para terminar un doctorado. Gracias al financiamiento del CONAHCYT pude desarrollar este trabajo y publicaciones.

# ÍNDICE

<b>Dedicatorias</b>	<b>I</b>
<b>Agradecimientos</b>	<b>II</b>
<b>Índice de tablas</b>	<b>VIII</b>
<b>Índice de figuras</b>	<b>XI</b>
<b>Abreviaturas</b>	<b>XV</b>
<b>Resumen</b>	<b>XVIII</b>
<b>Abstract</b>	<b>XX</b>
<b>I. INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
<b>II. JUSTIFICACIÓN</b>	<b>4</b>
<b>III. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA</b>	<b>7</b>
<b>IV. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA</b>	<b>9</b>
.    Sistemas actuales de clasificación para botellas de plástico . . . . .	11
.    Tendencias recientes para mejorar la detección en los plásticos reci- clables . . . . .	14
.    Metodologías para el diseño y el desarrollo de tecnología . . . . .	18
.    Definición del mensurando para la medición de la iluminancia . . . . .	18
.    Sensores para la identificación de polímeros . . . . .	20
.    Sistema de acondicionamiento de señal . . . . .	22
.    Procesamiento de los datos de los sensores . . . . .	23
.    Análisis de componentes principales . . . . .	24
.    Regresión logística y clasificación . . . . .	25

·	Vectorización del gradiente . . . . .	26
·	Vectorizando regresión logística regularizada . . . . .	27
·	Maquina de soporte vectorial . . . . .	27
·	Premisas sobre los métodos y diseños utilizados en la clasificación de botellas de plástico . . . . .	29
	<b>V. HIPÓTESIS</b>	<b>32</b>
	<b>VI. OBJETIVO</b>	<b>33</b>
·	Objetivos específicos . . . . .	33
	<b>VII. METODOLOGÍA</b>	<b>34</b>
·	Categorización y obtención de los datos . . . . .	36
·	Hipótesis en la categorización y obtención de los datos . . . . .	36
·	Objetivo en la categorización y obtención de los datos . . . . .	36
·	Objetivos específicos en la categorización y obtención de los datos . . . . .	36
·	Estudio de las características físicas de botellas PET post-consumo . . . . .	37
·	Diseño y desarrollo del sistema mecánico y eléctrico del sistema de clasificación . . . . .	38
·	Identificación y configuraciones de diseño . . . . .	38
·	Identificación de las restricciones de diseño y opciones de fabricación . . . . .	39
·	Parámetros del diseño . . . . .	39
·	Montaje del diseño mecánico . . . . .	40
·	Interfaz web . . . . .	42
·	HTML + CSS . . . . .	42
·	Motores de plantilla . . . . .	42
·	Bases de datos . . . . .	42

. Validaciones (Back + Front) . . . . .	43
. Lanzamiento del sitio web . . . . .	43
. Diseño del sistema de adquisición de imágenes . . . . .	43
. Configuración del sistema de identificación y clasificación para obtener la longitud y deformación de las botellas . . . . .	45
. Desarrollo de espectrofotometría para identificar líquidos dentro de la botella . . . . .	46
. Diseño del sistema de acondicionamiento de señal para el diodo de InGaAs . . . . .	47
. Desarrollo de la experimentación . . . . .	47
. Análisis de los factores que interactúan con el mensurando . . . . .	47
. Diseño de experimentos para la posición de la cámara fotográfica . . . . .	49
. Diseño de experimentos para la posición e intensidad de la luz al interactuar con los sensores IR . . . . .	51
. Desarrollo del sistema de identificación con aprendizaje automático . . . . .	53
. Regresión logística con PCA para la clasificación de las imágenes . . . . .	54
. Entrenamiento para la clasificación por medio de regresión logística . . . . .	56
. Vectorización de los datos . . . . .	57

**VIII.RESULTADOS 59**

. Categorización y obtención de los datos . . . . .	59
. Determinación de las unidades de análisis-recolección de datos . . . . .	59
. Análisis del comportamiento de los datos recolectados . . . . .	60
. Variabilidad de las botellas PET . . . . .	63
. Cuantificación de los factores de las botellas PET que conservan sus características post-consumo . . . . .	65

. Diseño y desarrollo del sistema mecánico y eléctrico del sistema de clasificación . . . . .	79
.     . Parámetros del diseño mecánico . . . . .	81
.     . Propuestas del diseño mecánico . . . . .	82
.     . Evidencia del diseño mecánico . . . . .	82
.     . Diseño eléctrico del sistema de clasificación . . . . .	86
.     . Programa de arranque de motores . . . . .	88
. Interfaz web . . . . .	95
. Diseño del sistema de adquisición de imágenes . . . . .	98
.     . Identificación para el tamaño y forma de la botella . . . . .	98
. Desarrollo de espectrofotometría para identificar líquidos dentro de la botella . . . . .	99
.     . Magnitudes de influencia en la incertidumbre para la implementación del luxómetro . . . . .	99
.     . Desarrollo del luxómetro y del sistema de identificación de líquidos . . . . .	101
.     . Funciones para estimar la iluminancia en el sensor . . . . .	101
.     . Luxómetro . . . . .	104
.     . Estimación del modelo del mensurando para cuantificar la incertidumbre del luxómetro . . . . .	106
.     . Cuantificación de las magnitudes de influencia en el estudio de la incertidumbre . . . . .	107
. Diseño del sistema de acondicionamiento de señal para el diodo de InGaAs . . . . .	110
.     . Definición del mensurando para la medición de la longitud de onda en el diodo InGaAs . . . . .	110
.     . Comprobación del comportamiento del diodo InGaAs con los distintos elementos eléctricos y electrónicos del sistema . . . . .	111

.	Configuración del sistema por espectroscopia para la identificación y clasificación del PET . . . . .	111
.	Desarrollo de la experimentación . . . . .	112
.	Diseño de experimentos para determinar la distancia y rango de trabajo del luxómetro . . . . .	112
.	Diseño de experimentos para identificar la cantidad mínima de líquidos dentro de la botella . . . . .	118
.	Diseño de experimentos para determinar la iluminancia en las etiquetas . . . . .	121
.	Desarrollo del sistema de identificación con aprendizaje automático .	123
.	Análisis de componentes principales . . . . .	123
.	Máquina de soporte vectorial . . . . .	124
.	Análisis fuerzas, oportunidades, debilidades y amenazas . . . . .	126
<b>IX.</b>	<b>DISCUSIÓN</b>	<b>129</b>
.	Cadena de medida para el sistema de clasificación en botellas de PET	130
.	Diseño de experimentos con la interacción de todos los factores a controlar . . . . .	131
<b>X.</b>	<b>CONCLUSIONES</b>	<b>132</b>
	<b>REFERENCIAS</b>	<b>133</b>
<b>A.</b>	<b>Apéndice mesa</b>	<b>140</b>
<b>B.</b>	<b>Apéndice caja</b>	<b>142</b>
<b>C.</b>	<b>Apéndice mesa y caja</b>	<b>144</b>
<b>D.</b>	<b>Apéndice soporte</b>	<b>146</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

1. Porcentaje de materiales reciclables que reciben los centros de acopio [cuentame.inegi.org.mx, 2020]. . . . .	10
2. Símbolos para identificar el tipo de plástico reciclado [Ramli Suzaimah et al., 2008]. . . . .	11
3. Sistemas comerciales para la clasificación de diferentes tipos de plásticos reciclables. . . . .	13
4. Comparación de los métodos actuales para la identificación de botellas de plástico utilizando varias técnicas de aprendizaje automático. . . . .	17
5. Sistemas comerciales para la clasificación de diferentes tipos de plásticos reciclables [Ángeles Hurtado et al., 2021]. . . . .	24
6. Parámetros del primer diseño . . . . .	39
7. Planteamiento de un diseño de experimentos con tres niveles y por lo menos tres replicas. . . . .	50
8. Planteamiento del diseño de experimentos para identificar la iluminación cuando hay líquidos dentro de la botella. . . . .	53
9. Discriminación de las botellas de plástico por medio de la extracción de sus características. . . . .	56
10. Resultados del una muestra de 100kg de PET post-consumo. . . . .	62
11. Información ampliada sobre las diferentes presentaciones en las botellas PET. . . . .	63
12. Información ampliada sobre las diferentes presentaciones de las botellas PET con tapas de diferentes colores. . . . .	66
13. Información ampliada sobre las diferentes presentaciones de las botellas PET sin tapas. . . . .	67

14. Información ampliada sobre las diferentes presentaciones de las botellas PET con tapas rojas. . . . .	68
15. Información ampliada sobre las diferentes presentaciones de las botellas PET con tapas naranja. . . . .	69
16. Información ampliada sobre las diferentes presentaciones de las botellas PET con tapas verdes. . . . .	70
17. Información ampliada sobre las diferentes presentaciones de las botellas PET con tapas azules. . . . .	71
18. Información ampliada sobre las diferentes presentaciones de las botellas PET con tapas amarillas. . . . .	72
19. Información ampliada sobre las diferentes presentaciones de las botellas PET con tapas negras. . . . .	73
20. Información ampliada sobre las diferentes presentaciones de las botellas PET con tapas blancas. . . . .	74
21. Información ampliada sobre las diferentes presentaciones de las botellas PET con tapas rosa. . . . .	75
22. Información ampliada sobre las diferentes presentaciones de las botellas PET transparentes. . . . .	76
23. Información ampliada sobre las diferentes presentaciones de las botellas PET azules. . . . .	77
24. Información ampliada sobre las diferentes presentaciones de las botellas PET verdes. . . . .	78
25. Información ampliada sobre las diferentes presentaciones de las botellas PET aplastadas. . . . .	79
26. Parámetros del segundo diseño . . . . .	81
27. motor_DB[DB1] y motor_DB_Dos[DB3] . . . . .	89
28. <i>TestDB</i> [DB2] . . . . .	90
29. Datos para obtener las ecuaciones de funcionamiento del fotodiodo. .	102

30.	Cuantificación y asignación de valores a la variabilidad de cada fuente de incertidumbre [Semiconductors, 2006]. . . . .	108
31.	Contribución de las fuentes de incertidumbre . . . . .	109
32.	Información del primer ANOVA de dos factores. . . . .	114
33.	ANOVA del primer experimento. . . . .	115
34.	Información del segundo ANOVA de dos vías. . . . .	119
35.	Resultados del ANOVA del segundo experimento. . . . .	120
36.	Resultados diseño de experimentos para identificar la variabilidad con las etiquetas. . . . .	121
37.	ANOVA unidireccional del tercer experimento. . . . .	122
38.	Datos y resultados de la PCA. El tamaño de la botella es en mililitros. . . . .	123
39.	Clases para analizar SVM. . . . .	125
40.	Análisis de Oportunidades y Amenazas para implementarse a corto plazo. . . . .	127
41.	Análisis de Oportunidades y Amenazas para implementarse a corto plazo . . . . .	128

## ÍNDICE DE FIGURAS

1.	Ejemplo de un diagrama de flujo del proceso de clasificación de botellas de plástico [the Environment et al., 2006]. . . . .	12
2.	Espectroscopia para identificar cinco clases diferentes de plásticos [Masoumi, 2012]. . . . .	14
3.	Cámara fotográfica para la detección de botellas de color [Wang et al., 2019b]. . . . .	15
4.	Histograma con datos normalizados para identificar PET [P. Inrawong, 2016]. . . . .	16
5.	Foto-diodo en modo de operación de lectura de voltaje con un amplificador de voltaje [Semiconductors, 2008]. . . . .	19
6.	Comportamiento del diodo de silicio PN BPW21R. Corriente de corto circuito vs Iluminancia [Semiconductors, 2006]. . . . .	20
7.	Rango de operación de los fotodiodos InGaAs [KK, 2015]. . . . .	21
8.	Rangos de detección de diodos construidos de InGaAs [KK, 2015]. . . . .	22
9.	Procedimiento para desarrollar la metodología e implementación de la herramienta de Componentes principales. . . . .	24
10.	Ilustración del hiper-plano óptimo para clases de datos linealmente separables [Kumar, 2011]. . . . .	28
11.	Cinco clases de plástico utilizando espectroscopia [Rani et al., 2019]. . . . .	30
12.	Representación del espectro infrarrojo considerando el color de la botella [Rani et al., 2019]. . . . .	31
13.	Propuesta del sistema de clasificación y sus diferentes etapas (Elaboración propia). . . . .	35
14.	Diagrama de la metodología para la sección del desarrollo del sistema de clasificación (Elaboración propia). . . . .	35
15.	Diferentes presentaciones de botellas PET en el mercado Mexicano. . . . .	37

16.	Estructura que soportara los sensores y las tarjetas de desarrollo. . . . .	40
17.	Diseño de la base de la banda transportadora. . . . .	41
18.	Primer propuesta para construir el sistema mecánico de identificación de las botellas PET post-consumo. . . . .	41
19.	Flujo de diseño para la programación en la tarjeta de desarrollo. . . . .	44
20.	Tarjeta de desarrollo y cámara de 8 MP. . . . .	44
21.	Ilustración del procesamiento de las imágenes que se realizaran por <i>Matlab</i> [P. Inrawong, 2016]. . . . .	45
22.	Sistema de discriminación por medio de la detección de PET por su longitud de onda. . . . .	46
23.	Factores y variables en la clasificación en envases de plástico. El mensurando consiste en la longitud de onda del espectro infrarrojo. . . . .	49
24.	Factores y variables en la posición de la cámara. . . . .	50
25.	Factores y variables en el diseño de experimentos considerando todas las variables posibles para la experimentación. . . . .	51
26.	Sistema de detección de líquidos en botellas PET por su iluminancia. . . . .	52
27.	Factores y variables en el diseño de experimentos para determinar la posición del luxómetro. . . . .	53
28.	Datos que permitirán visualizar la zona de decisión. . . . .	57
29.	Procedimiento que se realizara para obtener los datos que permitan clasificar e identificar las botellas de PET. . . . .	58
30.	Histogramas que representan los posibles resultados al recolectar los datos de las botellas de plástico. . . . .	61
31.	Gráfico de Pareto para identificar causas comunes en la variación de las botellas. . . . .	62
32.	Diferentes presentaciones de botellas PET en el mercado Mexicano, de veintitrés presentaciones de botellas solo 14 se identificaron. . . . .	64

33. Diagrama de flujo del proceso manual de clasificación para las botellas PET. . . . .	64
34. Relación de botellas PET sin tapas. . . . .	65
35. Relación de botellas PET con tapas. . . . .	66
36. Relación de botellas PET con tapas rojas. . . . .	67
37. Relación de botellas PET con tapas naranja. . . . .	68
38. Relación de botellas PET con tapas verdes. . . . .	69
39. Relación de botellas PET con tapas azules. . . . .	70
40. Relación de botellas PET con tapas amarillas. . . . .	71
41. Relación de botellas PET con tapas negras. . . . .	72
42. Relación de botellas PET con tapas blancas. . . . .	73
43. Relación de botellas PET con tapas rosa. . . . .	74
44. Relación de botellas PET transparentes. . . . .	75
45. Relación de botellas PET azules. . . . .	76
46. Relación de botellas PET verdes. . . . .	77
47. Relación de botellas PET aplastadas. . . . .	78
48. Recipiente donde se depositará el PET que no está clasificado y su accionamiento es por un motor. . . . .	80
49. El sistema llevará las botellas por el tornillo de Arquímedes y por medio de unas aberturas que se abrirán automáticamente clasificarán el PET. . . . .	80
50. Primer prueba con todo el sistema conectado. . . . .	83
51. Fotografías con la cámara y el FPGA proyectadas en una pantalla. . .	83
52. Panorama general, (Elaboración propia). . . . .	84
53. Diseño mecánico. . . . .	85
54. Diseño mecánico de otro ángulo. . . . .	85
55. Moto-reductor en el sistema mecánico. . . . .	86
56. Pruebas de las conexiones en la etapa de potencia. . . . .	87

57.	Conexión del moto-reductor al sistema de potencia. . . . .	87
58.	Pruebas por separado de la banda transportadora. . . . .	88
59.	Descripción los bloques de código que controlan los motores. . . . .	91
60.	Red 3, Esta función de bloque inicializa el servidor web de la CPU. . .	91
61.	Red 1 del bloque de función del motor. . . . .	92
62.	Red 2 Acción paso cero si esta en alto indica que el motor esta listo para arrancar. . . . .	93
63.	Red 3 Transición del paso cero, la cual indica que si el botón de inicio esta activado todos los botones se habilitan para el accionamiento del motor. . . . .	93
64.	Red 4 Acción paso uno, con dos botones se acciona el motor para adelante o para atrás. . . . .	94
65.	Red 5 Acción uno, con dos botones se puede activar el motor con pulsos. . . . .	94
66.	Red 6 Transición paso uno, con esta red se define un botón de paro total o mejor conocido como paro de emergencia. . . . .	95
67.	Servidor web con el PLC para controlar la velocidad de la banda trans- portadora. . . . .	96
69.	Página web para controlar los dos motores. . . . .	96
68.	Diagrama de bloques de la comunicación del servidor con el PLC. . .	97
70.	Página web para controlar los dos motores. . . . .	97
71.	Cadena de medida para posibles fuentes de incertidumbre al aumen- tar el número de transductores (Elaboración propia). . . . .	98
72.	Diagrama de árbol que muestra las interacciones en el método del mensurando . . . . .	100
73.	Diagrama del principio de causalidad donde se consideran las varia- bles de influencia y magnitudes de entrada del proceso de medición. .	100

74.	Diagrama de bloques del sistema de adquisición de datos del medidor de lux. . . . .	101
75.	Circuito del sistema de lectura de datos del sensor. . . . .	102
76.	Diagrama de circuito y adquisición de datos. . . . .	105
77.	Banda transportadora. . . . .	106
78.	Determinación de la Iluminancia por electro voltio. . . . .	107
79.	Distribución uniforme para la resolución de la conversión de analógico a digital. . . . .	108
80.	Diagrama de flujo con posibles fuentes de incertidumbre (Elaboración propia). . . . .	108
81.	Intervalo de confianza para estimar la incertidumbre expandida con un coeficiente k. . . . .	110
82.	Sistema de discriminación por medio de la detección de PET por su longitud de onda. . . . .	112
83.	Gráfico de respuesta con la interacción de los factores A y B. . . . .	117
84.	Sistema de discriminación por detección de líquidos. . . . .	118
85.	Gráfico de respuesta con la interacción del segundo experimento. . .	120
86.	Gráfica de respuesta del tercer experimento. . . . .	122
87.	La gráfica de puntos para los dos componentes principales. . . . .	124
88.	Gráfico SVM para identificar el número de líquidos en botellas de PET.	126
89.	Cadena de medida para posibles fuentes de incertidumbre. . . . .	130
90.	Factores y variables en el diseño de experimentos para la interacción de todo el sistema. . . . .	131

# ABREVIATURAS

1

ANOVA	Análisis de variación
CC	Centros de acopio
$CO_2$	Dióxido de carbono
DIL40	40 PINS dual-in-line package
DOE	Diseño de experimentos
F	F Relación
FPGA	Arreglos de compuertas lógicas programables en sitio
gl	Grados de libertad
HDPE	Polietileno de alta densidad
IMER	Industria Mexicana de Reciclaje S.A. de C.V.
JPG	Grupo Conjunto de Expertos Fotográficos
LCD	Pantalla de cristal líquido
2 LDA	Análisis discriminante lineal
LDPE	Polietileno de baja densidad
LED	Diodo emisor de luz
MS	Cuadrado medio
mL	Mililitros
NC	Normalmente cerrada
NIRS	Espectroscopia de infrarrojo cercano
No.	Número
PC1	Primer componente principal
PC2	Segundo componente principal
PCA	Análisis de componentes principales
PCB	placa de circuito impreso
PET	Tereftalato de polietileno

PIC	Controlador de interfaz de periféricos
PIB	Producto Interno Bruto
PLC	Controlador lógico programable
PP	Polipropileno
PVC	Cloruro de polivinilo
<sup>3</sup> PS	Poliestireno
RGB	Rojo verde azul
SVM	Máquinas de vectores soporte
SS	Suma de cuadrados
USE	Universal serial bus

## RESUMEN

4

5           Esta tesis busca fortalecer esfuerzos en desarrollos tecnológicos basados  
6 en la clasificación del plástico PET y e impactar en el desarrollo sustentable para  
7 implementar soluciones aplicables en centros de acopio de México. Se desarrolla-  
8 ron diversos experimentos, así como herramientas de aprendizaje automático para  
9 el procesamiento de los datos. Para la experimentación se consideraron el mayor  
10 número de variables que interactúan con el sistema de clasificación. El tamaño de  
11 la botella, la cantidad de líquidos dentro de la botella, y el tipo de etiqueta de la  
12 botella. Resultaron ser factores significativos de acuerdo a los resultados obtenidos.  
13 Porque limitan la velocidad de clasificación por la diversidad de botellas que existen  
14 en el mercado mexicano. Por otro lado, se determinaron diferentes distancias de  
15 los sensores para su óptimo funcionamiento. También se cuantifico la capacidad de  
16 detección con diferentes niveles de líquidos dentro de las botellas, y con etiquetas  
17 en botella post-consumo. Las experimentaciones y los materiales se obtuvieron de  
18 un centro de acopio en la ciudad de Querétaro de nombre materiales reciclables  
19 Ángeles. El banco de pruebas se construyó con diversos materiales y con dispo-  
20 sitivos para implementar la automatización como microcontroladores, FPGA, PLC  
21 y diseño web para vincular dichas tecnologías. Se desarrollo un luxómetro digital  
22 se detecta la iluminancia en el plástico PET post-consumo cuando presenta líquido  
23 mientras pasa por una banda transportadora para ser procesado a una tasa media  
24 de tres botellas por segundo. Con la metodología implementada se detectó satisfac-  
25 toriamente líquidos dentro de las botellas de PET transparente cuando presentaban  
26 líquidos entre 25 %-100 % de su capacidad. Resaltamos que es posible implemen-  
27 tar un sistema para identificar botellas con líquidos para centros de acopio con un  
28 diseño asequible. Así como estimar el peso extra que tienen las botellas PET por  
29 los líquidos dentro de la botella. A modo de conclusión es posible implementar tec-  
30 nologías con diseño asequible para centros de acopio que ayuden a clasificar en un

31 menor tiempo botellas PET post-consumo.

32

33 (**Palabras clave:** Automatización, PET, reciclaje)

## ABSTRACT

34

35 This thesis seeks to strengthen efforts in technological developments ba-  
36 sed on the classification of PET plastic and its impact on sustainable development to  
37 implement applicable solutions in collection centers in Mexico. Various experiments  
38 and machine learning tools for data processing were developed. The most signifi-  
39 cant number of variables interacting with the classification system were considered  
40 for the experimentation. The size of the bottle, the amount of liquid inside the bottle,  
41 and the type of label on the bottle. They turned out to be significant factors accor-  
42 ding to the results obtained. Because they limit the speed of classification due to  
43 the diversity of bottles in the Mexican market. On the other hand, different distances  
44 of the sensors were determined for their optimal operation. The detection capacity  
45 was also quantified with different levels of liquids inside the bottles and with post-  
46 consumer bottle labels. The experiments and the materials were obtained from a  
47 collection center in the city of Querétaro named recyclable materials Ángeles. To link  
48 these technologies, the test bench was built with various materials and devices to  
49 implement automation, such as microcontrollers, FPGA, PLC, and web design. A di-  
50 gital lux meter was developed to detect the illuminance in post-consumer PET plastic  
51 when it contains liquid as it passes through a conveyor belt to be processed at an  
52 average rate of three bottles per second. With the implemented methodology, liquids  
53 were satisfactorily detected inside the transparent PET bottles when they had liquids  
54 between 25 %-100 % of their capacity. We highlight that it is possible to implement  
55 an affordable design to identify bottles with liquids for collection centers. As well as  
56 estimating the extra weight that PET bottles have due to the liquids inside the bottle.  
57 In conclusion, it is possible to implement technologies with an affordable design for  
58 collection centers that help to classify post-consumer PET bottles in less time.

59

60 **(Key words:** Automation, PET, recycling)

# I. INTRODUCCIÓN

61

62 Sistema es un conjunto de reglas o principios sobre una materia racional-  
63 mente enlazados entre sí [RAE, 2022]. En otras palabras es un conjunto de partes  
64 coordinadas y en interacción para alcanzar un conjunto de objetivos. Por ejemplo  
65 para la Teoría General de Sistemas, se considera a la realidad como un sistema y  
66 que esta a su vez hubiese sido dividida en un cierto número de subsistemas (inde-  
67 pendientes, interdependientes, traslapados, etc). Así la Teoría General de Sistemas,  
68 la Ingeniería de Sistemas y el Análisis de Sistemas buscan explicar y predecir los  
69 principios de la realidad. Los sistemas de clasificación se definen como sistemas de  
70 organización temática que se utilizan para asignarles una determinada etiqueta a  
71 una característica y así poder identificarla [Johansen, 1975].

72 Clasificar es ordenar o disponer por clases algo [RAE, 2022], extendiendo  
73 esta definición se puede decir que es el reconocimiento de similitudes y el agrupa-  
74 miento de organismos u objetos en función de esas similitudes. El motivo de estudio  
75 de las clasificaciones son los objetos y organismos a clasificar [Crisci, 1977]. Es  
76 importante señalar que la taxonomía es la disciplina que su motivo de estudio es  
77 tratar de explicar cómo se realiza la clasificación, cómo se determina, incluyendo  
78 sus bases, principios, procedimientos y reglas [RAE, 2022, Crisci, 1977].

79 Los plásticos reciclables (termoplásticos) se definen como polímeros que  
80 se pueden fundir y moldear casi indefinidamente. Se derriten cuando se calientan,  
81 se endurecen cuando se enfrían, sin embargo, si se congelan, los termoplásticos  
82 se pueden romper, igual que el vidrio. Esas características, a las que deben su  
83 nombre, son reversibles, por lo que el material se puede calentar, moldear y congelar  
84 muchas veces. Existen más de 100 tipos de plásticos, siendo seis los más usados  
85 [Peláez Lenis et al., 2018] y los que más se reciclan: polipropileno, el polietileno,  
86 el policloruro de vinilo, el poliestireno, el tereftalato de polietileno y el policarbonato  
87 [Garraín et al., 2008]. Se identifican por un número dentro de un triángulo que facilita

88 su identificación, y fueron codificados por la Sociedad industrial del plástico en 1980  
89 [Ramli Suzaimah et al., 2008], ver Tabla 2.

90 Detección es la acción y efecto de descubrir la existencia de algo que no  
91 era perceptible [RAE, 2022]. La alta detección de un proceso: es la acción y efecto  
92 sujeto a reglas o pautas recurrentes que ayudan a que un sistema a nivel hardware  
93 y software sean más eficientes. Diseño es la concepción original de un objeto u  
94 obra destinados a diferentes objetivos como por ejemplo la producción en serie.  
95 Asequible se refiere a lo que se puede alcanzar, obtener o lograr, lo que se pretenda  
96 o desea [RAE, 2022].

97 Comercialmente existen empresas que fabrican y distribuyen sistemas de  
98 clasificación, ver Tabla 5, como el sistema de *BottleSort*. Este sistema es capaz  
99 de identificar el PET transparente del PET verde [Milgrom, 1994, Bruno, 2000]. El  
100 sistema *Poly-Sort*, es similar a *BottleSort*, comienza separando las botellas en or-  
101 den individualmente [Bruno, 2000, the Environment et al., 2006]. Otro sistema au-  
102 tomático para la separación de resinas de plástico es la espectroscopia de re-  
103 flectancia en el infrarrojo cercano, es un método de identificación de dos filtros  
104 [Scott, 1995, Masoumi, 2012]. Otra sistema radica en el campo del reflejo y transmi-  
105 sión de rayos-x, es similar al método de espectroscopia infrarroja y al sistema VS-2,  
106 que tiene una capacidad eficiente [Bruno, 2000, Foundation et al., 2015].

107 Las ultimas investigaciones plantean nuevos métodos como el principio  
108 del procesamiento de imágenes utilizando combinaciones de varias técnicas como  
109 análisis de componentes principales, espectroscopia [Rani et al., 2019] y transfor-  
110 mada *Hough* [Duda, 1972, Prasad, 2012]. Otra técnica usada para clasificar bote-  
111 llas de plástico por extracción de sus características en la intensidad de la imagen  
112 es la máquina de vectores de soporte o SVM [Nawrocky, 2010]. También se pue-  
113 de encontrar una aproximación de los envases con operaciones morfológicas para  
114 describir la estructura o forma de la imagen [Shahbudin et al., 2010]. Así como un  
115 sistema que clasifica las botellas en tiempo real utilizando FPGA y fue propuesto en

116 [Capson et al., 2011]. Otros sistemas se basan en el uso de redes neuronales en  
117 conjunto con espectroscopia infrarroja para una eficiente identificación de los plásti-  
118 cos [T Huth-Fehre, 1995]. Cada uno de los métodos descritos utilizan aprendizaje  
119 automático y proporcionan ventajas y desventajas, ver Tabla 4, mismas que ayu-  
120 dan a diferenciar la mejor opción para implementar un sistema de alta velocidad de  
121 clasificación y de bajo costo.

122 Cada uno de los métodos de clasificación que existen y que se investigan  
123 tienen diferentes características y diseños. En este trabajo se plantea una combi-  
124 nación de los métodos y tecnologías [Wang et al., 2019a] para clasificar botellas de  
125 plástico recicladas con envases que tengan merma [the Environment et al., 2006].

## II. JUSTIFICACIÓN

126

127           En México se generan más de 44 millones de toneladas anuales de resi-  
128 duos, y se espera que la cifra se incremente a 65 millones para el año 2030. La  
129 mitad de nuestros residuos son orgánicos, y la otra mitad son sólidos, e incluyen  
130 plástico, papel, cartón, vidrio, aluminio. El 90 % de estos desperdicios se arrojan a  
131 tiraderos de cielo abierto o a rellenos sanitarios lo que provoca contaminación del  
132 aire y el suelo. Los plásticos reciclados son materiales muy utilizados a nivel global,  
133 en México de todos estos residuos que se producen solo el 5 % se recicla o valoriza  
134 lo que equivaldría a unas 2.2 millones de toneladas anuales [Josefa, 2019].

135           Los plásticos reciclados son materiales muy utilizados a nivel global uno  
136 de los grandes problemas es que solo se utilizan una vez. El PET, HDPE, PP, PS  
137 y otros son fuentes de grandes desperdicios sólidos que dañan el medio ambiente.  
138 Para resolver este problema, diversos programas de reciclaje se implementan en  
139 diferentes países y con diferentes estrategias.

140           El crecimiento de la población a nivel mundial contribuye al aumento de  
141 materiales sólidos tanto de los que se pueden reciclar así como los que no se pue-  
142 den reciclar. La adecuada clasificación de los plásticos representa una actividad  
143 económica para personas físicas y morales que contribuyen en la recolección, tras-  
144 lado y proceso de los diferentes materiales. Existen dos empresas que son líderes  
145 en México y América Latina estas procesan el PET, sus nombres comerciales son  
146 *PetStar* e *IMER* dan empleo directo alrededor de 98 mil personas y generan más  
147 de un millón de puestos de trabajo indirecto [de Coca-Cola (IMCC), 2019]. A lo largo  
148 del territorio Mexicano existen centros de acopio donde se compran resinas recicla-  
149 das y metales, vidrio etc, Querétaro es una de las entidades con más centros de  
150 acopio [cuentame.inegi.org.mx, 2020].

151           Las empresas y principalmente la ciudadanía deben seguir contribuyendo  
152 a que se recolecten el mayor número de materiales sólidos a través de los centros

153 de acopio, solo para México se procesan 85 mil toneladas al año de plástico PET,  
154 el equivalente a 4,100 millones de botellas. Con la adecuada recolección se puede  
155 evitar el 87 % de emisiones de gases de efecto invernadero frente a la producción de  
156 resina virgen, lo que equivale a 101,350 toneladas anuales de dióxido de carbono  
157 ( $CO_2$ ) cantidad equivalente a la de todos los automóviles de la ciudad de México si  
158 dejaran de circular durante dos días [Josefa, 2019].

159         A largo plazo, la prohibición de los desechos extranjeros puede ayudar a  
160 estimular el reciclaje de los desechos sólidos domésticos. Algunas pequeñas em-  
161 presas sin un abastecimiento de material diversificado probablemente enfrentarán  
162 desafíos importantes debido al aumento del costo del material. Se espera que la in-  
163 dustria del reciclaje nacional crezca con un gran potencial. Eventualmente, hablan-  
164 do únicamente de los desechos sólidos domésticos existe evidencia que se pueden  
165 utilizar de manera más eficiente y China lo ha demostrado. Además, China puede  
166 incluso convertirse en un exportador de desechos sólidos en el futuro, como suce-  
167 dió con Japón en la década de 1980. En términos más generales, la prohibición  
168 de los desechos extranjeros es parte del esfuerzo más considerable de China para  
169 ascender en la cadena de valor global, buscan especializarse en la fabricación de  
170 bajo consumo, utilizando su propia mano de obra y recursos, para transformarlos a  
171 productos industrias de alto valor y alto nivel [Qu et al., 2019].

172         Un ejemplo de contaminación a cielo abierto, es el caso del PET y el PVC;  
173 los cuales son materiales que no se distinguen a primera vista si son transparentes,  
174 estos dos materiales son contaminantes uno del otro, la combinación de las resinas  
175 puede provocar la liberación de gases clorhídricos. La resina de PET se contamina  
176 con solo unas pocas partes por millón de resina de PVC lo que provoca que ya no  
177 se puedan volver a procesar [Bruno, 2000].

178         En México y en el mundo se necesitan tecnologías que sean accesibles e  
179 incrementen la velocidad de clasificar la mayor cantidad de materiales. Los residuos  
180 plásticos generan contaminación y son difíciles de manejar. De todas las toneladas

181 producidas de residuos, los plásticos solo representan entre el 7% al 9% en peso  
182 y del 20% al 30% en volumen, respectivamente [Sahin O., 2018]. La clasificación  
183 manual no es una opción rentable para separar en grandes cantidades. Existen  
184 presentaciones de plásticos que se comercializan cada día, las cuales no tienen la  
185 nomenclatura que las identifique. Las micro empresas se enfrentan diariamente a  
186 las pérdidas que ocasiona comprar en grandes cantidades botellas de PET, dichas  
187 pérdidas llegan a ser de hasta un 20% al momento de estar realizando la compra  
188 por la dificultad de detectar botellas de plástico que tengan agua, refresco, basura u  
189 otros tipos de plástico. Por lo que minimizar los costos de recolección y clasificación  
190 es primordial para tener una mayor utilidad para el crecimiento de esta actividad.  
191 También se ha observado que la alta rotación entre los trabajadores de centros  
192 de acopio causa retrasos incrementando los costos de separación y tiempos de  
193 entrega. Por lo que minimizar los costos de recolección y clasificación es primordial  
194 para tener una mayor utilidad de lo contrario, no es rentable comprar materiales  
195 reciclados.

196 Cabe enfatizar que el uso de materiales sólidos y orgánicos va en aumen-  
197 to, se estima que aumentara a 21 millones de toneladas en los próximos 10 años  
198 [Josefa, 2019]. Por consiguiente al incrementar la capacidad de clasificar estos resi-  
199 duos en menos tiempo, se podría tener un impacto económico, tecnológico y en el  
200 medio ambiente. Por esta razón, la tecnificación de los centros de acopio puede ser  
201 una buena manera de monitorear y aplicar herramientas tecnológicas de bajo costo  
202 que les ayuden a ser más productivas y sean generadores de empleos. Por añadi-  
203 dura las herramientas estadísticas de aprendizaje autónomo pueden ser muy útiles  
204 para aplicarlas en este sector donde el principal problema se resuelve al clasificar  
205 correctamente en menos tiempo.

### III. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

206

207 Los centros de acopio que abastecen de material a diversas empresas en  
208 todo el mundo se encuentran con la falta de maquinaria y métodos que les permitan  
209 tener resultados más favorables en los precios y costes; Por lo que se han implemen-  
210 tado varias técnicas manuales que dependen de la interpretación del observador. El  
211 material en la mayoría de los casos se encuentra revuelto y se almacena en super-  
212 sacos o contenedores de manera que manualmente se clasifican al 100 % debido a  
213 que estos materiales suelen estar contaminadas con líquidos dentro de las botellas,  
214 materiales orgánicos, pintura, etiquetas de PVC, aceites etc. Por ejemplo: separar  
215 1,800 kg de PET entre dos personas tarda hasta 16 horas [Ángeles Hurtado, 2021].  
216 Existen presentaciones de plásticos que se comercializan cada día las cuales no  
217 tienen la nomenclatura que las identifique, en consecuencia se opta por:

- 218 1. Raspar el plástico para comprobar su dureza así como observar si no existen  
219 otros plásticos mezclados.
- 220 2. Se muerde el plástico para determinar la dureza del material.
- 221 3. Se dan pequeños golpes con la mano al plástico para escuchar que sonido  
222 emite.
- 223 4. Se quema el plástico, para observar si emite humo de color blanco y si tiene  
224 un olor muy parecido a cera de una veladora.

225 Comercialmente existen sistemas automatizados para clasificar grandes  
226 cantidades de residuos sólidos los principales son *BottleSort*, *Poly-Sort*, espectros-  
227 copia infrarrojo y VS-2, ver Tabla 5, estos sistemas consideran como factores prin-  
228 cipales el tamaño de la botella, color y ordenan las botellas antes de separarlas.  
229 En la Figura 1 se muestra el proceso completo de clasificación con un sistema de  
230 retroalimentación [the Environment et al., 2006] otros sistemas son diferentes pero

231 en su mayoría siguen el mismo proceso [Bruno, 2000]. Los sistemas con mayor ve-  
232 locidad de clasificación son los que tienen retroalimentación de las botellas lo que  
233 implica que requieren que las botellas pasen más de una ocasión por el sistema de  
234 medición [Scott, 1995].

235 Cada uno de los sistemas utiliza diferentes métodos para la identificación  
236 y proporcionan ventajas y desventajas, una de ellas es que no son capaces de  
237 distinguir si las botellas presentan algún tipo de contaminación dentro o fuera de  
238 la botella, ver Tabla 4. Por otra parte estos sistemas automatizados su grado de  
239 inversión es muy alto, la implementación de estos sistemas automatizados rondan  
240 entre los 186,000 y 230,000 dólares [the Environment et al., 2006].

241 Se debe tener un sistema automatizado que sea capaz de distinguir entre  
242 diferentes diseños de botellas de plástico como el color, tipo de etiqueta, tamaño,  
243 deformación y merma dentro de la botella. Se debe tener un sistema que detecte  
244 esas propiedades y descarte otros materiales a una alta velocidad sin la retroali-  
245 mentación de botellas, asimismo el costo de la implementación debe ser accesible,  
246 así como mantener la exactitud y precisión, es necesario incidir en que debe ser  
247 accesible para centros de acopio [Ángeles Hurtado et al., 2021].

248 Por lo anterior, se propone un diseño asequible, ver Figura 13, merece la  
249 pena subrayar que se enfocaría para centros de acopio que en promedio recolectan  
250 entre una tonelada a dos toneladas semanalmente. Por esta razón se propone una  
251 velocidad de tres botellas por segundo, lo que es igual a reducir la mitad del tiempo  
252 cuando se realiza manualmente. De esta forma se implementarían diferentes técni-  
253 cas estadísticas de aprendizaje automático y sensores así tomando de referencia  
254 los sistemas que ya existen. Por lo tanto la incógnita científica es determinar si al  
255 combinar diferentes métodos con espectroscopia infrarroja y aprendizaje automáti-  
256 co se puede incrementar la detección utilizando foto diodos [Masoumi, 2012] (como  
257 el *Indium-Gallium-Arsenide*).

## IV. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

258

259 Partiendo del concepto de sistema como un conjunto de partes coordina-  
260 das de reglas o principios sobre una materia racionalmente enlazados entre sí y en  
261 interacción para alcanzar un conjunto de objetivos [Johansen, 1975, RAE, 2022]. Se  
262 puede afirmar que el conjunto de partes de un sistema es fundamental para que se  
263 alcancen sus metas más aun si se trata de sistemas de medición. Para evaluar el  
264 conjunto de partes de un sistema se utiliza estadística con la finalidad de recolec-  
265 tar datos que representen el comportamiento de los componentes. Los datos son  
266 representaciones simbólicas de los eventos que se presentan en cualquier siste-  
267 ma y se pueden obtener por medio de la observación, por transductores, sensores  
268 y modelos matemáticos [Crisci, 1983]. En el mundo existe una gran diversidad de  
269 materiales con diferentes composiciones, por esta razón, las personas tienen la ne-  
270 cesidad de agruparlos [Crisci, 1977]. El agrupamiento de objetos en clases, sobre  
271 la base de sus atributos que poseen en común, es el objetivo en un sistema de cla-  
272 sificación. Por consiguiente si se diseñan componentes que realicen una detección  
273 de dichos atributos eficientemente y que puedan distinguir entre otro tipo de mate-  
274 riales considerando la naturaleza del mensurando nos llevaría a la obtención de un  
275 sistema ideal.

276 En la república mexicana se recolectan diariamente más de 86,343 tone-  
277 ladas de desechos solidos y orgánicos generados en viviendas, edificios, calles,  
278 avenidas, parques y jardines. Más de la mitad de estos materiales que se generan  
279 en todo el país se recolecta en siete estados. En México se separa diariamente  
280 menos del 11 % de la basura recolectada [Ángeles Hurtado et al., 2021]. En el país  
281 existen centros de acopio de residuos sólidos urbanos y en algunos compran es-  
282 tos materiales para ser separados, clasificados o bien darles un tratamiento para  
283 reutilizarse, ver Tabla 1. Actualmente se tiene el registro de 241 centros de aco-  
284 pio que recolectan diariamente materiales diversos, de los cuales 75 % es papel,

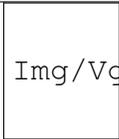
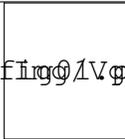
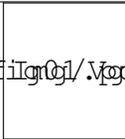
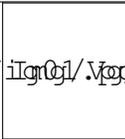
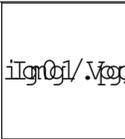
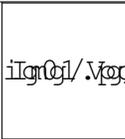
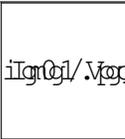
285 cartón, PET y vidrio. Las entidades federativas con más centros de acopio son:  
286 Querétaro con 51, Jalisco 45, Estado de México 43, y Michoacán de Ocampo con  
25 [cuentame.inegi.org.mx, 2020]. En México, 87 de cada 100 personas entre los

Tabla 1: Porcentaje de materiales reciclables que reciben los centros de acopio [cuentame.inegi.org.mx, 2020].

Tipo de material	Porcentaje
Papel y cartón	39
PET	23
Vidrio	13
Fierro, lámina y acero	9
Plástico	7
Aluminio	3
Electrónicos y electrodomésticos	3
Otros materiales	2
Cobre, bronce y plomo	1

287  
288 18 a los 65 años de edad les interesa el cuidado del medio ambiente, pero solo  
289 31 lo practican [cuentame.inegi.org.mx, 2020]. El material que más presencia tiene  
290 por sus diversos usos en toda la industria es el plástico. Existen diferentes tipos de  
291 plásticos y la correcta clasificación de los diversos tipos de resinas plásticas es muy  
292 importante; existen diversas compañías en el mundo que compran resinas recicla-  
293 das y buscan que estas resinas recicladas tengan las mismas características que  
294 tiene una resina virgen. De lo contrario, no es rentable comprar materiales recicla-  
295 dos. Estas resinas tienen numerosas aplicaciones por ello es necesario tener siste-  
296 mas y métodos que ayuden a separar las resinas en grandes cantidades y menor  
297 tiempo. Es difícil diferenciar entre los tipos de resinas que se utilizan y las diferentes  
298 presentaciones que circulan en el mercado mundial, ver Tabla 2; esta fue una de las  
299 razones para que la Sociedad industrial del plástico instituyera un sistema de etique-  
300 tado en 1980 [Ramli Suzaimah et al., 2008]. El sistema crea un conjunto de códigos  
301 para cada uno de los siete tipos de resinas más comunes. Estos códigos se pueden  
302 encontrar en la mayoría de las presentaciones bajo las botellas [Rotheiser, 2009].

Tabla 2: Símbolos para identificar el tipo de plástico reciclado [Ramli Suzaimah et al., 2008].

						
PET	HDPE	PVC	LDPE	PP	PS	OTROS
PET: <i>Polyethylene Terephthalate</i>			HDPE: <i>High Density Polyethylene</i>			
PVC: <i>Polyvinyl Chloride</i>			LDPE: <i>Low Density Polyethylene</i>			
PP: <i>Polypropylene</i>			PS: <i>Polystyrene</i>			

303 . **Sistemas actuales de clasificación para botellas de plástico**

304 La clasificación correcta de las diferentes resinas plásticas mantiene un alto  
 305 valor en el mercado por esta razón es un tema de investigación a nivel mundial y se  
 306 han propuesto métodos automáticos para clasificar las botellas de plástico. En los  
 307 últimos nueve años se ha utilizado aprendizaje automático, siendo este un conjunto  
 308 de algoritmos de clasificación basado en la teoría del aprendizaje estadístico, esta  
 309 modalidad se puede entender como algoritmos que aprenden de los datos ingresa-  
 310 dos por una persona [Yi Tan, 2005], y son implementados en diversas aplicaciones.  
 311 En la Figura 1 se muestra el proceso completo de clasificación de polímeros con  
 312 un sistema de retroalimentación [the Environment et al., 2006], y existen diversos  
 313 sistemas que difieren del que se muestra en la Figura 1.



Figura 1: Ejemplo de un diagrama de flujo del proceso de clasificación de botellas de plástico [the Environment et al., 2006].

314           La gran cantidad de botellas de plástico que se generan todos los días re-  
315 quieren de sistemas que detecten las propiedades de los envases y descarten otros  
316 materiales a una alta velocidad. Comercialmente existen empresas que fabrican y  
317 distribuyen sistemas de clasificación, ver Tabla 3, como el sistema de *BottleSort*  
318 que detecta cualquier material que no cumpla con un tamaño en específico. El sis-  
319 tema remueve contaminantes en su primera etapa, después un sistema neumáti-  
320 co se activa para separar las botellas y colocarlas en una banda transportadora  
321 de alta velocidad. La banda transportadora lleva las botellas a una unidad de de-  
322 tección de 16 rayos infrarrojos y procesan más de 5,000 lecturas por segundo. La  
323 clasificación de las resinas se hace en menos de 5 milisegundos. Después de la  
324 identificación, la botella se transporta hasta alcanzar la ubicación donde se colo-  
325 ca en un contenedor, la botella es impulsada por aire. Este sistema es capaz de  
326 identificar el PET transparente del PET verde [Milgrom, 1994, Bruno, 2000]. El

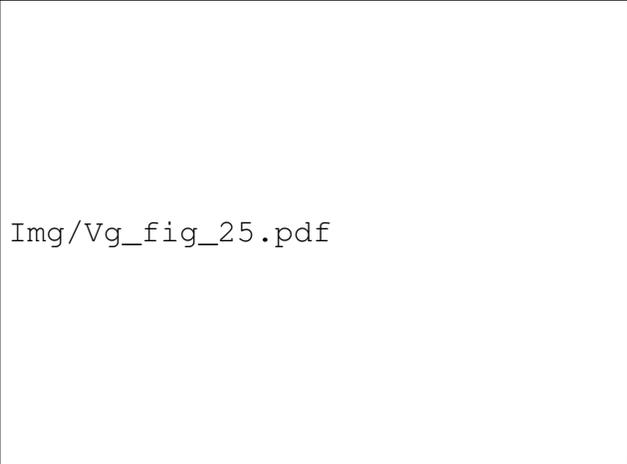
Tabla 3: Sistemas comerciales para la clasificación de diferentes tipos de plásticos reciclables.

Sistema	Ventajas
1	Considera el tamaño de la botella, remueve contaminantes, trabaja con 16 sensores de rayos infrarrojos, clasificación en 5 milisegundos, identifica color, utiliza un sistema neumático expulsando las botellas.
2	Utiliza una cámara de color, separa las botellas en orden individual, remueve contaminantes, velocidad de detección de 15 veces por segundo e identificación de 19 milisegundos, identifica tipos de colores en las botellas.
3	Alta detección al utilizar el reflejo de rayos x y de sensores infrarrojos por medio de espectroscopia este método es recomendado para detectar PCV. Análisis en 200 veces por segundo, separa 2 a 3 botellas por segundo.

1 - *BottleSort*, 2- *Poly-Sort*, 3- *Near infrared spectroscopic* y *VS-2*

327 sistema *Poly-Sort*, es similar a *BottleSort*, comienza separando las botellas en or-  
 328 den individual. En este caso las botellas pasan por un sistema de vibración que  
 329 remueve contaminantes, con sensores *near*-infrarrojos y hace la lectura de cada  
 330 botella con una velocidad de 15 veces por segundo, en menos de 19 milisegundos.  
 331 Una cámara de color y una luz estroboscópica permite la identificación del color.  
 332 Si un material no es identificado es llevado a un contenedor al final de la banda  
 333 [Bruno, 2000, the Environment et al., 2006].

334 Otro sistema automático para la separación de resinas de plástico es por  
 335 espectroscopia de reflectancia en el infrarrojo cercano con un método de identi-  
 336 ficación de dos filtros y es capaz de distinguir entre PET, HDPE, PVC, PP y PS  
 337 [Scott, 1995]. Los filtros permiten distinguir entre las etiquetas y tapas, pero no es  
 338 adecuado para la identificación de colores oscuros, ver Figura 2. El más grande pro-  
 339 blema con el método de los dos filtros es limitar la región de longitud de onda de  
 340 la luz, así como la adquisición de los datos que se obtienen por medio de dos foto  
 341 diodos [Masoumi, 2012], como los *Indium-Gallium-Arsenide*.



Img/Vg\_fig\_25.pdf

Figura 2: Espectroscopia para identificar cinco clases diferentes de plásticos [Masoumi, 2012].

342 Otra opción de clasificación radica en el campo del reflejo y transmisión de  
343 rayos-x, es similar al método de espectroscopia infrarroja. La separación consiste en  
344 el ingreso de plástico y por medio de ondas se estudia la respuesta del objeto. En es-  
345 te caso la transmisión y reflexión considera el espectro de los rayos-x. Este método  
346 es muy recomendado si se quiere detectar PVC. Del mismo modo el sistema VS-2  
347 tiene una capacidad de 200 análisis por segundo y clasifica de dos a tres botellas  
348 por segundo [Bruno, 2000, Foundation et al., 2015]. La mayoría de las técnicas que  
349 prevalecen para la clasificación de plásticos confían en el método de espectroscopia  
350 de infrarrojo cercano, debido a que cada tipo de plástico tiene una longitud de  
351 onda que es absorbida en sus espectros, los cuales pueden ser analizados para  
352 determinar el tipo de plástico [S.M. et al., 2010, Capson et al., 2011].

### 353 . **Tendencias recientes para mejorar la detección en los plásti-** 354 **cos reciclables**

355 Las investigaciones recientes plantean nuevos métodos como el principio  
356 del procesamiento de imágenes, ver Figura 3, utilizando combinaciones de varias

357 técnicas como análisis de componentes principales, espectroscopia y transformada  
358 *Hough* [Duda, 1972, Rani et al., 2019]. Una de las limitantes de este método son  
359 las condiciones al momento de tomar la fotografía, la variación en la luz, resolu-  
360 ción, fondo y la distancia de la cámara para obtener una precisión mayor a 95 %  
361 [Prasad, 2012].



Figura 3: Cámara fotográfica para la detección de botellas de color [Wang et al., 2019b].

362 Algunos de estos sistemas se basan en el método de múltiple correlación  
363 para la clasificación de botellas de PET y no PET. Se toman fotos y la correlación de  
364 cada imagen de la botella de PET se calcula a partir de histogramas de los colores  
365 rojo, verde y azul de cada botella, ver Figura 4. La prueba utiliza 200 imágenes de  
366 botellas de plástico, 100 imágenes de botellas de PET y 100 imágenes de botellas  
367 diferentes al PET, con resultados de identificación 93.33 % [P. Inrawong, 2016]. En  
368 [Ramli Suzaimah et al., 2008] se plantea convertir las imágenes a escala de grises,  
369 después se extraen las características principales de la imagen terminando con el  
370 método de Análisis discriminante lineal, o por sus siglas en ingles (LDA) obteniendo  
371 una presión de 97.5 %. Estos métodos permiten discriminar las botellas que tienen  
372 diferente color [Scavino et al., 2009, P. Inrawong, 2016, Wang et al., 2019b].

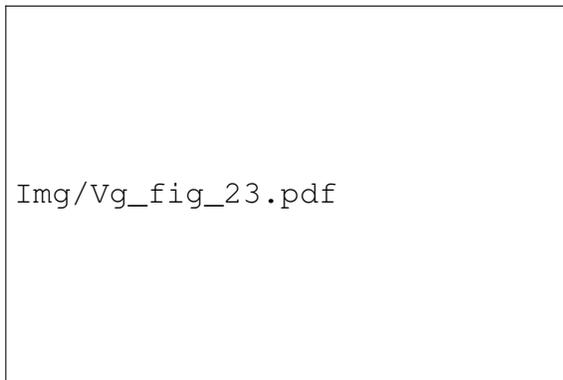


Figura 4: Histograma con datos normalizados para identificar PET [P. Inrawong, 2016].

373 Otra técnica usada para clasificar botellas de plástico es por extracción de  
374 sus características en la intensidad de la imagen y se detectan con las maquinas  
375 de soporte vectorial o SVM. Su enfoque es en la rotación, traslado y la escala inva-  
376 riable debido a que utiliza características derivadas de los histogramas de imagen.  
377 El método es robusto para los factores de tamaño de la botella, forma, tipos de eti-  
378 queta y deformación. El sistema logra una precisión por encima del 96 % utilizando  
379 imágenes a escala gris de la cámara [Nawrocky, 2010].

380 También se puede encontrar una aproximación de los envases con opera-  
381 ciones morfológicas para describir la estructura o forma de la imagen. Utilizando la  
382 descripción de dos dimensiones de la silueta de las botellas de plástico, la detección  
383 del borde de las siluetas de los objetos se desarrolla por el proceso de erosión, así  
384 como el proceso de extracción de características del vector y el proceso de SVM y  
385 se emplea para clasificar la imagen de dos grupos. Como resultado se obtiene un  
386 desempeño de más del 90 % de precisión [Shahbudin et al., 2010].

387 Un sistema que clasifica las botellas en tiempo real utilizando FPGA fue  
388 propuesto en [Capson et al., 2011]. El método propone identificar dos tipos de ma-  
389 terias el PET y botellas de *tetrapack* a una alta velocidad en tiempo real, automáti-  
390 camente localiza las regiones de mayor probabilidad que contenga estos materiales  
391 dentro de la imagen y remueve el fondo de la imagen. Se crea un histograma pa-

392 ra la extracción de las características de la imagen y fue usado para clasificar las  
 393 botellas usando SVM. El método tiene un 93% de reconocimiento y es capaz de  
 394 trabajar con velocidad. Otros sistemas se basan en el uso de redes neuronales en  
 395 conjunto con espectroscopia infrarroja para una eficiente identificación de los plásti-  
 396 cos [T Huth-Fehre, 1995]. Cada uno de los métodos descritos utilizan aprendizaje  
 397 automático del mismo modo proporcionan ventajas y desventajas, véase la Tabla 4,  
 398 mismas que ayudan a elegir la mejor opción para implementar un sistema de alta  
 399 velocidad de clasificación y asequible de costo.

Tabla 4: Comparación de los métodos actuales para la identificación de botellas de plástico utilizando varias técnicas de aprendizaje automático.

Método	Ventajas	Desventajas	
1	Precisión del 93.33 %, identifica la deformación y color	Se necesita de más de una cámara para incrementar la velocidad	[Ramli Suzaimah et al., 2008, Scavino et al., 2009, Nawrocky, 2010, Shahbudin et al., 2010, P. Inrawong, 2016, Wang et al., 2019b].
2	Rápida detección y precisión del 95 % distingue deformación y color	No identifica colores oscuros	[T Huth-Fehre, 1995, Scott, 1995, S.M. et al., 2010, Capson et al., 2011, Masoumi, 2012, Rani et al., 2019].
3	Precisión mayor al 95 %, identifica color, bajo costo de armado	Calibración en la cámara, variación en luz, resolución, distancia, baja capacidad para identificar deformación	[Capson et al., 2011, Prasad, 2012, Özkan et al., 2015, Wang et al., 2019a, Wang et al., 2019b]

1 - Método por histograma RGB, 2- Espectroscopia de reflectancia en el infrarrojo cercano

3- Principio de procesamiento de imágenes

## 400 . **Metodologías para el diseño y el desarrollo de tecnología**

401 La heurística es una técnica o procedimiento práctico, para resolver proble-  
402 mas. Alternativamente, *Lakatos* lo define como un conjunto de reglas metodológi-  
403 cas no necesariamente forzosas, positivas y negativas, que sugieren o establecen  
404 cómo proceder y qué problemas evitar a la hora de generar soluciones y elaborar  
405 hipótesis. La base de la heurística está en la experiencia de resolver problemas y  
406 en ver cómo otros lo hacen. Consecuentemente se dice que hay búsquedas cie-  
407 gas, búsquedas heurísticas (basadas en la experiencia) y búsquedas racionales.  
408 Dado que las heurísticas pueden equivocarse, es fundamental conocer los casos  
409 en los que son aplicables y los límites a su uso. En general, en la ingeniería deben  
410 considerarse como ayudas o apoyos para hacer estimaciones rápidas y diseños  
411 preliminares, pero no como justificaciones finales de un diseño o proyecto u otros  
412 [Beuchot, 1999, Breyer, 2011]. Para este trabajo consideramos a las *Core Tools* co-  
413 mo heurísticas y se definen como un conjunto de herramientas principalmente usa-  
414 das en el sector automotriz también conocidas como APQP, PPAP, AMEF, SPC y  
415 MSA. Estas herramientas son procesos para diseñar, desarrollar, prevenir, medir,  
416 controlar, registrar, analizar y aprobar productos y servicios de calidad que satisfa-  
417 gan las necesidades [Olmedo Méndez, 2017].

## 418 . **Definición del mensurando para la medición de la iluminancia**

419 Para la medición de la iluminancia se considera al mensurando como la  
420 corriente eléctrica que pasa por un foto-diodo de silicio [Semiconductors, 2006]. La  
421 medición es de manera indirecta debido a las propiedades del sensor que al variar  
422 la iluminancia en el foto-diodo su resistencia cambia. Para que circule  $I$  (corriente  
423 eléctrica) por un material, es necesario que se aplique un campo eléctrico o una  
424 diferencia de potencial  $V$  (Voltaje) entre dos puntos y que en el material existan  
425 cargas capaces de moverse, es decir que en su interior hayan cargas libres (elec-

426 trones o iones). Esta situación se presenta en los metales, semiconductores, etc.  
427 [de Ohm, 2023].

Al variar la resistencia del foto-diodo debido al cambio de la iluminancia y al V inducido, la I cambiará, dependiendo de esta variación se puede calcular la iluminancia, véase Figura 5. Si la relación entre V e I es lineal, decimos que estamos en presencia de un material o componente óhmico y la relación que describe este comportamiento se conoce como ley de Ohm, véase la ecuación 1. Para ilustrar el comportamiento del sensor el fabricante proporciona información que es representada en la Figura 6, se puede observar que la escala es logarítmica-logarítmica pero para fines prácticos se considerara lineal para el calculo de la incertidumbre.

$$I = \frac{V}{R} \quad (1)$$

428

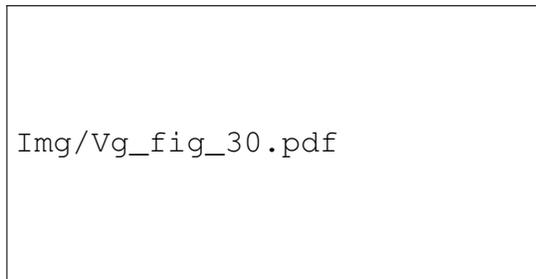


Figura 5: Foto-diodo en modo de operación de lectura de voltaje con un amplificador de voltaje [Semiconductors, 2008].

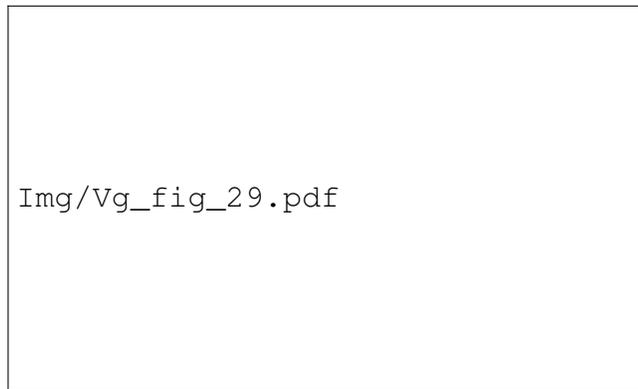


Figura 6: Comportamiento del diodo de silicio PN BPW21R. Corriente de corto circuito vs Iluminancia [Semiconductors, 2006].

## 429 . **Sensores para la identificación de polímeros**

430 La implementación de sensores basados en espectroscopia permite tener  
431 una gran ventaja al momento de clasificar los diferentes plásticos que se manejan en  
432 la industria puesto que permiten realizar esta tarea sin ser invasivo con los plásticos,  
433 sin emitir contaminantes. Tienen muy pocas limitaciones para el tamaño del mate-  
434 rial que se va a separar y permiten hacerlo en grandes cantidades [Wu et al., 2020].  
435 Algunas de las tecnologías de espectroscopia que pueden ser aplicadas para la  
436 separación de plásticos son, por ejemplo, la espectroscopia de infrarrojo cercano  
437 o *near-infrared spectroscopy* NIR; Espectroscopia de *Raman*; Espectroscopia de  
438 ruptura inducida por láser o *laser induced breakdown spectroscopy* LIBS y fluores-  
439 cencia de rayos-X o *X-ray fluorescence* XRF [Wu et al., 2020]. En este caso como  
440 únicamente se busca separar botellas de PET se puede recurrir únicamente a los  
441 sensores basados en la espectroscopia de infrarrojo cercano dado que trabaja en  
442 la región entre  $800\text{ nm}$  y  $2500\text{ nm}$  aunque un rango de entre  $800\text{ nm}$  y  $1100\text{ nm}$  es  
443 más que suficiente para la detección y diferenciación entre el PET transparente y el  
444 de color. Esta tecnología en conjunto con una cámara que pueda generar imágenes  
445 hiper-espectrales y contenga un dispositivo de carga acoplada puede ser más que

446 suficiente para realizar la clasificación de las botellas de PET [Wu et al., 2020].

447 Los sensores infrarrojos se basan en fotodiodos que pueden estar construi-  
448 dos a partir de cuatro elementos químicos como el silicio Si, el indio In, el galio Ga o  
449 el arsénico As, sin embargo, cabe aclarar que se pueden adquirir fotodiodos hechos  
450 a partir de únicamente silicio y fotodiodos construidos a partir arseniuro de indio y  
451 galio InGaAs. Cada material y fotodiodo tiene un distinto rango de operación, ver  
452 Figura 7, lo cual nos permite decidir que tipo de diodo es el ideal para la tarea que  
453 se desea realizar.



Figura 7: Rango de operación de los fotodiodos InGaAs [KK, 2015].

454 Basándonos en la gráfica de la Figura 7 y en el hecho de que el rango nece-  
455 sario para detectar los colores del PET es de entre los 800 *nm* y 1100 *nm* podemos  
456 asumir que un fotodiodo de silicio correspondiente al tipo S1337-BR [KK, 2015] es  
457 suficiente para el sistema en cuestión, sin embargo, se debe considerar la frecuen-  
458 cia a la cual va a operar el sistema, el área fotosensible que ofrece el sensor y la

459 variedad de modelos que se disponen, considerando estos factores es más factible  
460 utilizar un diodo construido a base de arseniuro de indio y galio. Dada la Tabla en la  
461 Figura 8 podemos observar los diferentes modelos de diodos construidos a partir de  
462 InGaAs, sus modelos de referencia y el rango de detección que poseen, con esta  
463 información es sencillo seleccionar una serie de construcción.



Figura 8: Rangos de detección de diodos construidos de InGaAs [KK, 2015].

#### 464 . **Sistema de acondicionamiento de señal**

465 Los sistemas de acondicionamiento de señales usualmente consisten en  
466 circuitos electrónicos que ejercen funciones como amplificación, cambio de nivel  
467 (*level shifting*), filtrado, acople de impedancias y modulación [Pallas-Areny, 2012].  
468 Normalmente alguna de las etapas que componen al sistema de acondicionamiento  
469 consiste en la conversión de la señal analógica, proveniente del sensor, a una señal  
470 digital (ADC) por sus siglas en inglés [Pallas-Areny, 2012].

471 Se deben considerar también las características que se muestran a conti-

472 nuación:

- 473 ■ Configuración general de entrada y salida del sensor.
- 474 ■ Exactitud, precisión y sensibilidad.
- 475 ■ Linealidad y resolución.

476 En función de estas características se procede con el diseño particular del sistema  
477 de acondicionamiento para el sensor en cuestión [Pallas-Areny, 2012].

#### 478 . **Procesamiento de los datos de los sensores**

479 Existen varios métodos para la extracción y manejo de los datos prove-  
480 nientes de los sensores basados en espectroscopia infrarroja dado que es una ta-  
481 rea compleja. Algunos de estos métodos son; *Principal Component Analysis* (PCA)  
482 [Serranti et al., 2013], *Linear Discriminant Analysis* (LDA) [De Groot et al., 1999], y  
483 *Support Vector Machine* (SVM) [Noble, 2006]. Los métodos de arriba se conside-  
484 raran para identificar si los elementos que compondrán el sistema automatizado  
485 cumplen con criterios de diseño asequible.

Tabla 5: Sistemas comerciales para la clasificación de diferentes tipos de plásticos reciclables [Ángeles Hurtado et al., 2021].

Sistema	Ventajas
1	Considera el tamaño de la botella, remueve contaminantes, trabaja con 16 sensores de rayos infrarrojos, clasificación en 5 milisegundos, identifica color, utiliza un sistema neumático expulsando las botellas.
2	Utiliza una cámara de color, separa las botellas en orden individual, remueve contaminantes, velocidad de detección de 15 veces por segundo e identificación de 19 milisegundos, identifica tipos de colores en las botellas.
3	Alta detección al utilizar el reflejo de rayos x y de sensores infrarrojos por medio de espectroscopia este método es recomendado para detectar PCV. Analiza de 200 veces por segundo, separa 2 a 3 botellas por segundo.

1 - *BottleSort*, 2- *Poly-Sort*, 3- *Near infrared spectroscopic* y *VS-2*

## 486 . **Análisis de componentes principales**

487 PCA es un método de investigación numérico, su principal objetivo es expli-  
 488 car la cantidad máxima de varianza con el menor número de componentes, véase  
 489 la Figura 9.

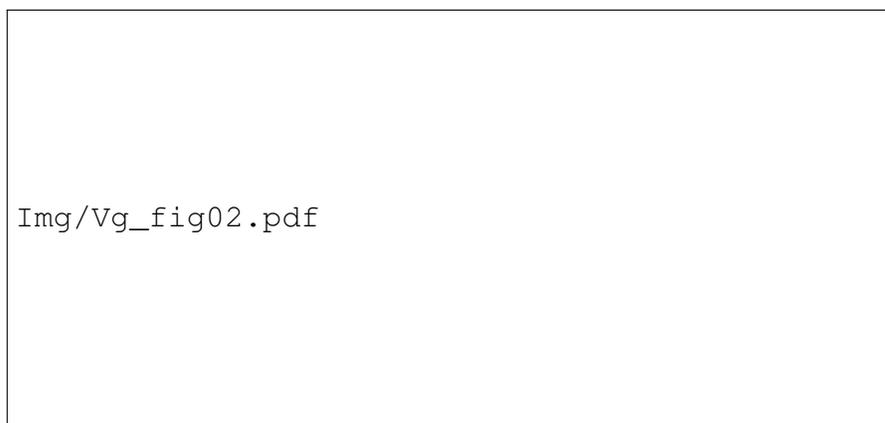


Figura 9: Procedimiento para desarrollar la metodología e implementación de la herramienta de Componentes principales.

490 El primer componente representa el mayor porcentaje de la variación total  
491 de los datos. El segundo componente representa el segundo mayor porcentaje de la  
492 variación total de datos, y así sucesivamente [Kumar, 2003, Rizanti, 2016]. PCA usa  
493 principios matemáticos para transformar variables correlacionadas en un número  
494 menor de variables. PCA también usa una transformación de espacio vectorial. El  
495 análisis de componentes principales se utilizará para describir la variación en los  
496 conjuntos de variables correlacionadas reduciendo la complejidad ayudando a la  
497 interpretación de los datos y la reducción del ruido o variables que se tienen que  
498 monitorear.

## 499 . **Regresión logística y clasificación**

Las funciones de clasificación son basadas en variables cuantitativas. Con la regresión logística se puede discutir una aproximación para clasificar datos donde algunos o todas las variables son cualitativas. Esta aproximación se le conoce como regresión logística. La variable de respuesta  $Y$  es restringida por dos valores. Por ejemplo,  $Y$  puede ser reconocida como “masculino” o “femenino” o “empleado” y “no empleado”. Luego entonces la probabilidad es un parámetro de interés que representa la proporción en la población. Las siguientes ecuaciones se utilizarán para implementar regresión logística por el método del gradiente y se definen como:

$$J(\theta) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \left[ -y^i \log \left( h_{\theta}(x^i) \right) (1 - y^i) \log \left( 1 - h_{\theta}(x^i) \right) \right] \quad (2)$$

Donde:

$$g(z) = \frac{1}{1 + e^{-z}}$$
$$h_{\theta}(x^i) = g(\theta^T x^i)$$

Las ecuaciones de arriba se pueden resolver por la multiplicación de matrices. Al definir las matrices  $x$  y  $\theta$ .

$$X = \begin{bmatrix} - & (x^1)^T & - \\ - & (x^2)^T & - \\ - & \vdots & - \\ - & (x^m)^T & - \end{bmatrix}; \theta = \begin{bmatrix} \theta_0 \\ \theta_1 \\ \vdots \\ \theta_n \end{bmatrix}$$

Ejecutando la multiplicación de las matrices  $X\theta$ .

$$X\theta = \begin{bmatrix} - & (x^1)^T\theta & - \\ - & (x^2)^T\theta & - \\ - & \vdots & - \\ - & (x^m)^T\theta & - \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} - & \theta^T(x^1) & - \\ - & \theta^T(x^2) & - \\ - & \vdots & - \\ - & \theta^T(x^m) & - \end{bmatrix}$$

## 500 . Vectorización del gradiente

501 El método del gradiente del costo de la regresión logística es un vector  
502 donde el elemento  $j^{th}$  es definido como:

$$\frac{\partial J}{\partial \theta_j} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \left[ \left( (h_{\theta}(x^i)) - y^i \right) x_j^i \right] \quad (3)$$

503 Para vectorizar esta operación sobre la base de datos, se escriben todas  
504 las derivadas parciales explicadas por  $\theta_j$ :

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial J}{\partial \theta_0} \\ \frac{\partial J}{\partial \theta_1} \\ \frac{\partial J}{\partial \theta_2} \\ \vdots \\ \frac{\partial J}{\partial \theta_n} \end{bmatrix} = \frac{1}{m} \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^m \left[ \left( (h_{\theta}(x^i)) - y^i \right) x_0^i \right] \\ \sum_{i=1}^m \left[ \left( (h_{\theta}(x^i)) - y^i \right) x_1^i \right] \\ \sum_{i=1}^m \left[ \left( (h_{\theta}(x^i)) - y^i \right) x_2^i \right] \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^m \left[ \left( (h_{\theta}(x^i)) - y^i \right) x_n^i \right] \end{bmatrix}$$

$$\frac{\partial J}{\partial \theta_j} = \frac{1}{m} X^T \left[ \left( h_\theta(x^i) - y^i \right) \right]$$

Donde:  $x^i$  es un vector, mientras que  $h_\theta(x^i) - y^i$  es un escalar. Se define  $\beta_i = h_\theta(x^i) - y^i$  luego entonces se observa que:

$$\sum \beta_i x^i = X^T \beta \quad (4)$$

## 505 . Vectorizando regresión logística regularizada

506 La regularización para la función de costo es muy importante para reducir el  
507 número de factores con los que se trabaja. La regresión logística regularizada está  
508 definida como:

$$J(\theta) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \left[ -y^i \log \left( h_\theta(x^i) \right) (1 - y^i) \log \left( 1 - h_\theta(x^i) \right) \right] + \frac{\lambda}{2m} \sum_{j=1}^n \theta_j^2 \quad (5)$$

509 Correspondientemente, las derivadas parciales de la regresión logística re-  
510 gularizada de la función de costo para  $\theta_0$  es definida como:

$$\frac{\partial J}{\partial \theta_j} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \left[ \left( h_\theta(x^i) - y^i \right) x_j^i \right]; \text{ para } : j = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial J}{\partial \theta_j} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \left[ \left( h_\theta(x^i) - y^i \right) x_j^i \right] + \left( \frac{\lambda}{m} \theta_j \right); \text{ para } : j \geq 1 \quad (7)$$

511 Estas dos ecuaciones son importantes para establecer las condiciones iniciales.

## 512 . Maquina de soporte vectorial

513 SVM tiene la capacidad robusta de clasificar considerando la teoría del  
514 aprendizaje estadístico y el principio del riesgo estructural mínimo, que soluciona  
515 efectivamente los problemas de aprendizaje con pequeñas muestras, de alta dimen-  
516 sión, no lineal y supera las deficiencias del aprendizaje de red neuronal artificial que

517 es difícil para determinar la estructura racional. SVM mejora la capacidad de gene-  
518 ralización de los métodos de aprendizaje [Kumar, 2003, Ashwini S. Shinde, 2016].

519 En general, SVM es un clasificador lineal para dos tipos de datos uno de  
520 ellos es etiquetado como se muestra:  $(x_1, y_1), \dots, (x_l, y_l)$  donde  $x_i \in R^N$  es un vector  
521 de características y  $y_i \in \{-1, 1\}$  es una etiqueta que pertenece a una clase. Un  
522 SVM construye un hiper-plano óptimo como una decisión de superficie para separar  
523 los puntos de datos de dos clases. El margen del hiper-plano es definido como la  
524 mínima distancia de los puntos de entrenamiento del hiper-plano [Vapnik, 1999]. El  
525 problema de aprendizaje de SVM es buscar el hiper-plano óptimo una vez obtenidos  
526 el conjunto de datos, encontrar los valores de  $w$  y  $b$  tal que satisfagan la condición:  
527  $y_i (w^t x_i + b) \geq 1; i=1, 2, \dots, l$  [Kumar, 2011].



Figura 10: Ilustración del hiper-plano óptimo para clases de datos linealmente separables [Kumar, 2011].

528 La superficie de decisión no es creada en el espacio de las entradas, si no  
529 que es un espacio de características de alta dimensión. El modelo resultante no es  
530 lineal y se logra aplicando la función *kernel*. La función *kernel*, donde  $k$  indica la  
531 similitud de las medidas entre la muestra  $x_i$ , y el patrón  $x_j$ , del conjunto de datos de  
532 entrenamiento. Usando *kernel*, el problema dual QP en términos de los multiplica-

533 dores de *Lagrange*,  $\alpha_i$  en el espacio de características es dado en la ecuación (8)  
 534 [Shahbudin et al., 2010].

$$\omega(\alpha) = \sum_{i=1}^l \alpha_i - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^l \alpha_i \alpha_j y_i y_j K(x_i, x_j) \quad (8)$$

$$K(x_i, x_j) = e^{-\frac{\|x-x_i\|^2}{C}}$$

Sujeto a las condiciones :

$$\sum_{i=1}^l \alpha_i y_i = 0; 0 \leq \alpha_i \leq C$$

535 Donde;  $i = 1, \dots, l$  Después de encontrar el valor óptimo para  $\alpha_i$ , la función de deci-  
 536 sión es construida de la forma:

$$f(x) = \sum_{\alpha_i \neq 0}^l y_i \alpha_i K(x_i, x_j) + b \quad (9)$$

537 Donde la clase de  $x$  es determinada de la señal de  $f(x)$ . Las  $x_i$  correspon-  
 538 den  $\alpha_{i \neq 0}$  es llamado vector de soporte. El valor de  $b$  es el umbral del límite de la  
 539 decisión del origen. El parámetro de regulación,  $C$ , es el parámetro de margen que  
 540 determina la compensación entre el margen máximo y mínimo del error de clasifica-  
 541 ción y es elegida por la media de la variación establecida [Osuna, 1998]. Para una  
 542 solución dual debe involucrar solo el cálculo de productos internos: esto se logra  
 543 expresando el vector de peso  $w$  como una combinación lineal.

## 544 . Premisas sobre los métodos y diseños utilizados en la clasifi- 545 cación de botellas de plástico

546 Al incrementar la detección de variables y al trabajar con espectroscopia in-  
 547 frarroja con foto diodos como el *Indium-Gallium-Arsenide*, radica que al hacer la ad-  
 548 quisición de los datos [Masoumi, 2012], se debe incrementar la capacidad del filtra-  
 549 do en la región de la longitud de onda [Wang et al., 2013, Asheri Arnon et al., 2019].

550 Por lo tanto si se combina espectrofotometría, procesamiento de imágenes y apren-  
551 dizaje automático [Hou et al., 2014], podríamos incrementar la capacidad de detec-  
552 ción y no depender de la capacidad del filtrado en la región de la longitud de onda  
553 de los sensores infrarrojos.

554 Para simplificar podríamos decir que actualmente existen dos maneras de  
555 clasificar los diferentes tipos de plásticos: sistemas de alimentación individualizados  
556 que requieren que los objetos se alimenten a un sistema de sensores que pasen uno  
557 por uno, y sistemas de alimentación masiva que requieren que el flujo de solidos  
558 se extienda en una banda transportadora. Estos dos sistemas requieren que las  
559 botellas pasen más de una ocasión por el sistema de medición. Cada uno de los  
560 métodos de clasificación que se investigan tienen diferentes capacidades y costos.

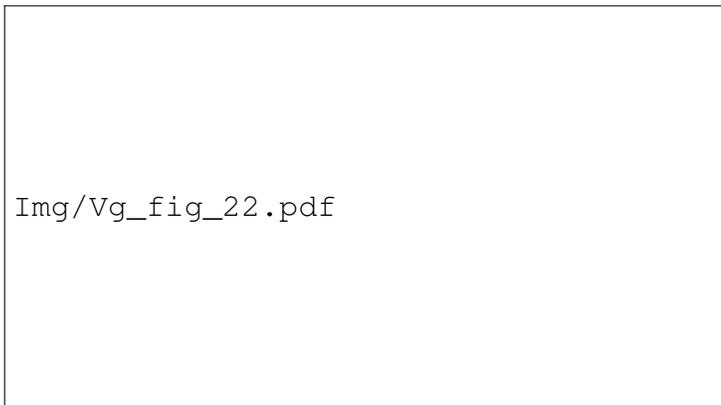


Figura 11: Cinco clases de plástico utilizando espectroscopia [Rani et al., 2019].

561 Los sistemas que detecta tamaño de la botella y que tienen las mayores  
562 velocidades utilizan un mayor número de sensores infrarrojos pero no detectan el  
563 tipo de etiqueta, tapa, merma dentro de la botella. Los sistemas que si consideran  
564 el tipo de color de la botella las ordenan individualmente lo que hace que el sistema  
565 sea más lento, dichos sistemas utilizan sensores infrarrojos y algunos dependen de  
566 la frecuencia de una luz estrobo. Al trabajar con rayos-x se obtiene mayor veloci-  
567 dades pero solo es recomendado para materiales como el PVC. Los sistemas que  
568 utilizan el método de espectroscopia infrarroja, ver Figura 11, tienen la capacidad

569 de detectar diferentes plásticos y la adecuada lectura de los datos ayuda a poder  
570 limitar la región de trabajo de la longitud de onda. En la Figura 12 se puede ver, que  
571 cuando se considera el tipo de color las longitudes de onda tienden a ser lineales lo  
572 que hace más difícil detectar, de ahí que se considera el procesamiento de imágenes.  
573 Del mismo modo cuando dentro de la botella existan líquidos oscuros o merma,  
574 afectaría la velocidad de detección.

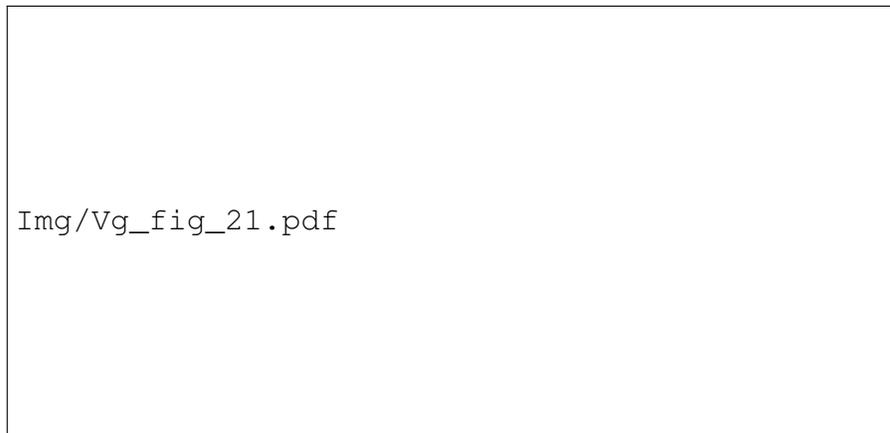


Figura 12: Representación del espectro infrarrojo considerando el color de la botella [Rani et al., 2019].

575 Dado que para hablar de diseño asequible en esta investigación se requiere  
576 que sea accesible de costo para centros de acopio en comparación con sistemas ac-  
577 tuales [the Environment et al., 2006]. Se trabajó en una combinación de tecnología  
578 y para hacerlo más rentable [Wang et al., 2019a].

579 En este trabajo se planteó una aproximación para clasificar botellas de  
580 plástico recicladas aplicando espectroscopia, así como espectro-fotometría para  
581 identificar líquidos dentro de las botellas [Wang et al., 2013, Asheri Arnon et al., 2019],  
582 aplicando procesamiento de imágenes y aprendizaje automático [Hou et al., 2014].

## V. HIPÓTESIS

583

584 Al combinar las señales de los sensores infrarrojos con herramientas de  
585 aprendizaje automático se incrementa la capacidad de detección en botellas de  
586 plástico PET al no depender de la capacidad de filtrado en los sensores, por lo tanto,  
587 se puede clasificar el 90 % de 1,800 kilogramos de envases PET post-consumo en  
588 cuatro horas a una tasa media de tres botellas por segundo.

## VI. OBJETIVO

589

590           Desarrollar un sistema de clasificación automático con diseño asequible  
591 para detectar botellas PET post-consumo utilizando diferentes sensores así como  
592 aprendizaje automático para obtener una alta detección buscando identificar líqui-  
593 dos dentro de las botellas considerando los factores de tamaño, etiqueta, y color  
594 alcanzando una tasa media de tres botellas por segundo.

### 595 . **Objetivos específicos**

- 596       ■ Categorizar las diferentes presentaciones de PET que existen en el mercado  
597       para estimar la variabilidad de los factores a controlar.
- 598       ■ Diseñar el sistema mecánico y eléctrico para detallar el accionamiento así co-  
599       mo determinar las causas que limiten la velocidad de detección.
- 600       ■ Desarrollar herramientas de aprendizaje automático para el sistema de clasi-  
601       ficación, y el sistema de medición; extraer las características a discriminar y  
602       estimar la velocidad para detectar botellas PET.

## VII. METODOLOGÍA

603

604 Por el método de la observación y el análisis estadístico se llevo a cabo  
605 este trabajo de investigación. El estudio y la recolección de los datos se realizo en  
606 la ciudad de Querétaro, en las instalaciones de la facultad de ingeniería UAQ y en  
607 el centro de acopio Materiales Reciclables Ángeles. El período de experimentación  
608 se realizo desde febrero de 2021 a Julio de 2023. Se realizo una descomposición  
609 jerárquica de los diferentes elementos que componen el sistema de clasificación.  
610 Como por ejemplo la tarjeta electrónica utilizando software de diseño asistido por  
611 computadora, definiendo la estructura de todos los niveles, estableciendo los lími-  
612 tes de potencia y control para desarrollar la arquitectura necesaria, y finalmente,  
613 seleccionar la mejor opción para implementarse. Para este trabajo se consideraron  
614 como no deseados polímeros diferentes al PET. A manera de resumen se utilizo  
615 una banda transportadora de un metro y 30 centímetros por donde pasaron bote-  
616 llas de PET post-consumo para que el sistema identifique y mediante software se  
617 determino qué tipo de plástico se compone la botella. Posteriormente al llegar al  
618 final de la banda transportadora se propuso activar un sistema que pudiera activar  
619 válvulas neumáticas que expulsaran las botellas dependiendo del tipo de polímero  
620 que se halla identificado previamente. En la Figura 13 se ilustra un esquema sobre  
621 la propuesta ideal basándose en los sistemas actuales. Se planteo que el sistema  
622 de identificación elimine la retroalimentación lo que implica que solo detecten las bo-  
623 tellas en una sola ocasión buscando no afectar la velocidad y tiempo de separación.  
624 En la primer etapa de la experimentación la entrada de material se realizo de forma  
625 manual, con botellas de PET sin clasificar, posteriormente el sistema de detección  
626 se encarga de discriminar el tipo de plástico y merma que puedan tener dentro de  
627 las botellas. Véase la Figura 14, muestra el procedimiento que se utilizo para com-  
628 probar la hipótesis y objetivo. Para la metodología se creo una base de datos que  
629 contiene características de las botellas PET [Ángeles Hurtado, 2021]. Con la obten-

630 ción de los datos, se determino el diseño eléctrico y mecánico, de tal modo que el  
631 sistema de detección cumpliera con la capacidad para almacenar información.

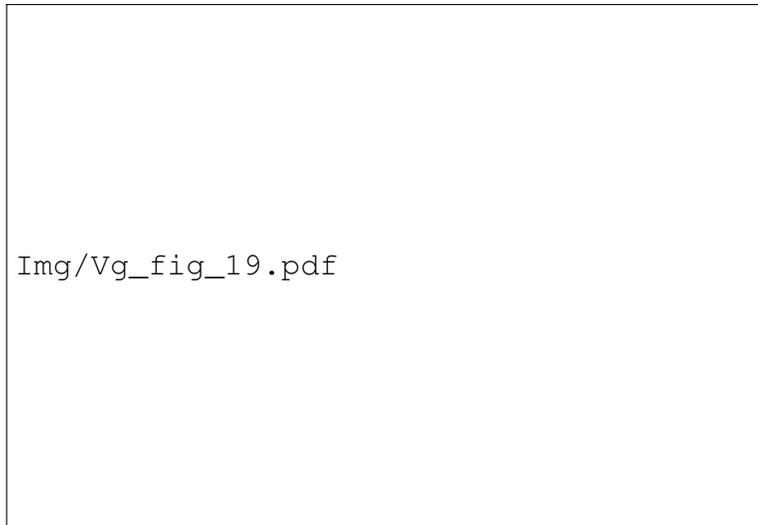


Figura 13: Propuesta del sistema de clasificación y sus diferentes etapas (Elaboración propia).

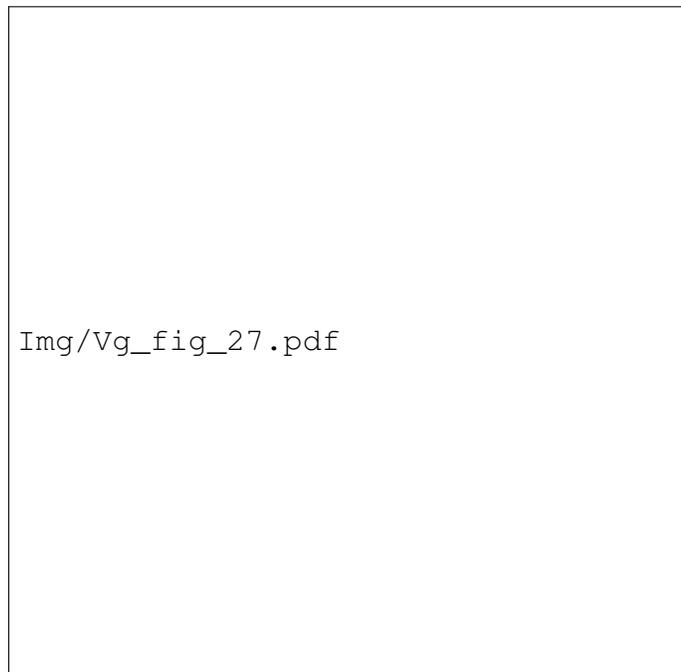


Figura 14: Diagrama de la metodología para la sección del desarrollo del sistema de clasificación (Elaboración propia).

## 632 . **Categorización y obtención de los datos**

633           Esta sección esta basada en un trabajo que se publico en el CONiiN-2021  
634 [Ángeles Hurtado, 2021]. Y tuvo como objetivo producir conocimiento con el estudio  
635 de la clasificación de las botellas PET post-consumo mediante sus características  
636 físicas mediante el color de la botella (CB), tamaño de la botella (TB), color de la  
637 tapa de la botella (CT), etiqueta de la botella (EB), deformación de la botella (DB),  
638 merma dentro o fuera de la botella (MB) y sí tiene líquidos la botella (LB).

## 639 . **Hipótesis en la categorización y obtención de los datos**

640           Al realizar un estudio de al menos 100 kg de botellas PET post-consumo  
641 considerando las características físicas CB, TB, CT, EB, DB, MB y LB, se puede  
642 determinar la velocidad de detección que pudiera tener un sistema automatizado de  
643 clasificación de botellas PET post-consumo.

## 644 . **Objetivo en la categorización y obtención de los datos**

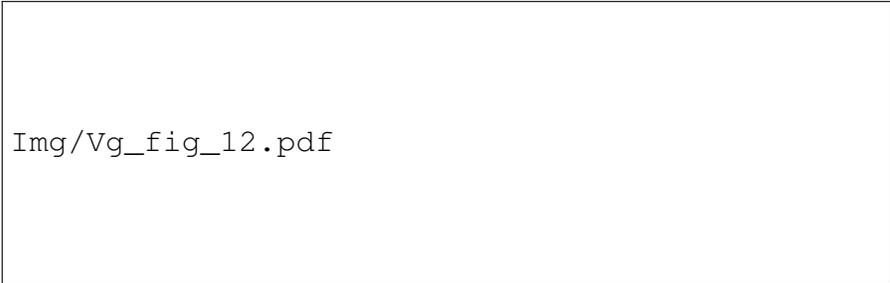
645           Estudiar con métodos estadísticos las características físicas de las botellas  
646 PET post-consumo para determinar la velocidad de detección.

## 647 . **Objetivos específicos en la categorización y obtención de los datos**

- 648           ■ Cuantificar los factores de las botellas PET para determinar que características  
649           se conservan post-consumo.
- 650           ■ Proponer un método para discriminar las características de las botellas PET  
651           post-consumo.

652 . **Estudio de las características físicas de botellas PET post-consumo**

653 Esta sección describe el método que se utilizo para el estudio de la clasi-  
654 ficación de las botellas PET post-consumo mediante el CB, TB, CT, EB, DB, MB y  
655 LB. Se utilizaron métodos estadísticos y se determino factores que influyen cuando  
656 se quiere automatizar el proceso de clasificación enfocado en un diseño asequible  
657 que identifique las botellas PET post-consumo. El estudio propuso premisas con-  
658 siderando como factores las características físicas de la botella, los resultados del  
659 estudio sirvieron para generar nuevas premisas y establecer una perspectiva para  
660 la aproximación en la tasa de clasificación que proporciona un diseño asequible. Se  
661 recolecto información de diversas presentaciones de botellas PET, que actualmente  
662 se comercializan en México. Como se puede ver en la Figura 15, algunas marcas  
663 utilizan diferentes tamaños de etiqueta, y diferentes colores lo que dificulta detectar  
664 si dentro de las botellas se encuentra liquido o basura. Se desarrollo una base de  
665 datos de las botellas en *SQLite* con el largo, ancho, alto, longitud de la etiqueta, color  
666 de la botella, color de la tapa, deformación, suciedad, con líquidos y solidos dentro  
667 de la botella. Se tomaron muestras aleatorias de aproximadamente una tonelada de  
668 PET de un centro de acopio para analizar en que condiciones llegan las botellas.



Img/Vg\_fig\_12.pdf

Figura 15: Diferentes presentaciones de botellas PET en el mercado Mexicano.

669 . **Diseño y desarrollo del sistema mecánico y eléctrico del siste-**  
670 **ma de clasificación**

671 El diseño mecánico tiene diversas características. Debe ser capaz de trasla-  
672 dar botellas de PET post-consumo hacia la unidad de identificación y posteriormente  
673 ejecutar acciones de control para clasificar las botellas. Considerando los requeri-  
674 mientos mínimos se propusieron dos diseños mecánicos. Se crearon parámetros  
675 personalizados para crear bocetos y simular los diseños en el software *Fusion 360*.

676 . **Identificación y configuraciones de diseño**

677 Para dar contexto cabe resaltar que comercialmente existen empresas que  
678 fabrican y distribuyen sistemas de clasificación de botellas PET post-consumo. Los  
679 sistemas remueven contaminantes en su primera etapa, después un sistema neumáti-  
680 co se activa para separar las botellas y colocarlas en una banda transportadora de  
681 alta velocidad. La banda transportadora lleva las botellas a una unidad de detección  
682 con 16 rayos infrarrojos y se procesan con más de 5,000 lecturas por segundo. La  
683 clasificación de las resinas se hace en menos de 5 milisegundos. Después de la  
684 identificación, la botella se transporta hasta alcanzar la ubicación donde se colo-  
685 ca en un contenedor, la botella es expulsada por aire [Milgrom, 1994, Bruno, 2000].  
686 El sistema *Poly-Sort*, comienza separando las botellas en orden individualmente.  
687 En este caso las botellas pasan por un sistema de vibración que remueve conta-  
688 minantes, con sensores infrarrojos hace la lectura de cada botella con una velo-  
689 cidad de 15 veces por segundo, en menos de 19 milisegundos. Una cámara de  
690 color y una luz estroboscópica permite la identificación del color. Si un material  
691 no es identificado es llevado a un contenedor al final de la banda [Bruno, 2000,  
692 the Environment et al., 2006].

693 . **Identificación de las restricciones de diseño y opciones de fabricación**

694 Una de las principales restricciones es que el diseño debe ser de costo  
695 asequible para centros de acopio de materiales reciclables que requieran separar  
696 una tonelada por semana de PET post-consumo. El manejo de grandes cantidades  
697 de plásticos requiere de sistemas compactos. Para la fabricación se considero en  
698 su primer etapa utilizar madera para posteriormente verificar la viabilidad del diseño  
699 y pasar a materiales metálicos.

700 . **Parámetros del diseño**

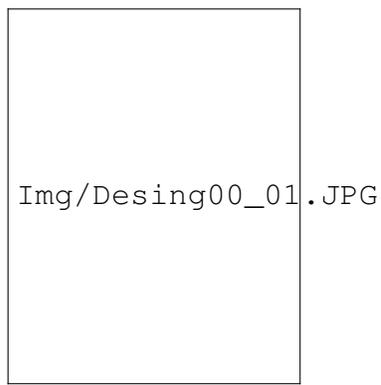
701 Se definieron parámetros personalizados para la creación de bocetos, véase  
702 la Tabla 6.

Tabla 6: Parámetros del primer diseño

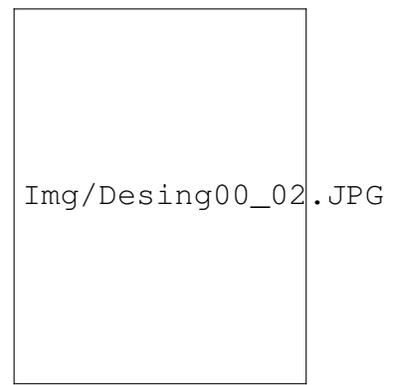
ID	Nombre	Parámetro	Expresión	Valor
7	Base estructura ancho	Base_estrc_ancho	1200 mm	1200.00
8	Base estructura largo	Base_estrc_largo	1000 mm	1000.00
9	Base estructura alto	Base_estrc_alto	20 mm	20.00
1	Base pata ancho	Base_pata_ancho	70 mm	70.00
2	Base pata largo	Base_pata_largo	150 mm	150.00
3	Base pata alto	Base_pata_alto	10 mm	10.00
4	Pata ancho	Pata_ancho	35 mm	35.00
5	Pata largo	Pata_largo	100 mm	100.00
6	Pata alto	Pata_alto	1000 mm	1000.00
10	Banda largo derecha	Banda_largo_derecha	1000 mm	1000.00
11	Banda largo izquierda	Banda_largo_izquierda	Banda_largo_derecha*3 mm	3000.00
12	Banda ancho	Banda_ancho	Base_estrc_ancho-300 mm	900.00
13	Banda alto	Banda_alto	20 mm	20.00

703 . **Montaje del diseño mecánico**

704 En la primer etapa se considero que una banda transportadora pase entre  
705 una caja que contendrá sensores y el sistema de identificación. El diseño esta for-  
706 mado por una mesa que sostendrá la caja con los sensores, véase la Figura 16a  
707 y la Figura 16b. La estructura de la banda transportadora no tiene contacto con la  
708 base de la caja ni con los sensores, véase la Figura 17a, Figura 17b y Figura 18a.  
709 En la Figura 18b se puede ver todo el diseño completo.



(a) Primer diseño de la mesa



(b) Caja sobre la mesa

Figura 16: Estructura que soportara los sensores y las tarjetas de desarrollo.



(a) Primer diseño de la estructura de la banda. (b) Primer diseño de la banda transportadora.

Figura 17: Diseño de la base de la banda transportadora.



(a) Vista lateral del sistema de identificación.

(b) Vista general del sistema.

Figura 18: Primer propuesta para construir el sistema mecánico de identificación de las botellas PET post-consumo.

## 710 . **Interfaz web**

711 El desarrollo web se realizó para que se pueda trabajar con python y se  
712 puedan procesar la información en tiempo real, así como conectarse con el PLC y  
713 la FPGA.

## 714 . **HTML + CSS**

715 En esta etapa se escribió el HTML y CSS. Con estas dos herramientas se  
716 le dará “vida” a los bocetos que se prepararon en la primer etapa.

717 Aplicación Node + Express con:

- 718 ■ Home (index.html)
- 719 ■ Formulario de registro (register.html)
- 720 ■ Formulario de login (login.html)

## 721 . **Motores de plantilla**

722 Creación de componentes que se comparten como: el header, el footer, la  
723 navegación y los productos.

724 Aplicación Node + Express + EJS con:

- 725 ■ Home
- 726 ■ Formulario de registro y login

## 727 . **Bases de datos**

728 En esta etapa estaremos trabajando con MySQL por un lado y Sequelize  
729 por el otro.

730 Creación de estructura de base de datos con:

- 731     ■ Creación de la base de datos y de todas sus tablas
- 732     ■ Tipos de datos de los campos y sus restricciones
- 733     ■ Creación de carpeta Sequelize con: Archivos de configuración, Modelos con
- 734         sus relaciones

#### 735 . **Validaciones (Back + Front)**

736             En esta etapa validaremos tanto desde el front-end como desde el back-  
737 end.

- 738     ■ Registro de usuarios
- 739     ■ Login de usuarios
- 740     ■ Creación y modificación de la base de datos

#### 741 . **Lanzamiento del sitio web**

742             Se subirá el sitio a varias plataformas gratis como gitHub para evaluar su  
743 funcionamiento. Una vez evaluado y en el servidor se harán pruebas.

#### 744 . **Diseño del sistema de adquisición de imágenes**

745             En la Figura 19 se muestra el diseño de flujo de una FPGA y la ejecución  
746 en la tarjeta de desarrollo DE10-*Standard*. Se proporciona una rápida revisión del  
747 diseño de flujo, explicando lo que se necesita para la implementación. El flujo de di-  
748 seño estándar FPGA comienza con la entrada del diseño utilizando esquemas o un  
749 lenguaje de descripción de hardware, como *Verilog* HDL o VHDL. En este paso, se  
750 puede crear un circuito digital que se implementa dentro de la FPGA. Luego, el flujo  
751 procede a través de la compilación, simulación, programación y verificación en el  
752 hardware del FPGA. La automatización de diseño electrónico (del inglés *Electronic*

753 *Design Automation*, o simplemente EDA) se refiere a una categoría de herramien-  
754 tas de software enfocadas en el proyecto, concepción, y producción de sistemas  
755 electrónicos, abarcando desde el proyecto de circuitos integrados hasta el desarro-  
756 llo de placas de circuito impreso, véase la Figura 20.



Figura 19: Flujo de diseño para la programación en la tarjeta de desarrollo.



Figura 20: Tarjeta de desarrollo y cámara de 8 MP.

757 Las principales propiedades de los diseños digitales modernos se pueden  
758 resumir en: jerárquico, reutilizable, estandarizado y algorítmico o de comportamien-  
759 to.

760 . **Configuración del sistema de identificación y clasificación para obtener la**  
761 **longitud y deformación de las botellas**

762 Se tomaron fotografías de dos diferentes presentaciones de botellas de for-  
763 ma manual con una cámara digital de 8 Mega píxeles y 12 Mega píxeles, con el  
764 procesamiento de imágenes se analizaron las fotografías de las botellas de plástico  
765 PET, así como de las que no sean PET y PET que ya no se pueda reciclar. Dichas  
766 fotos permitieron considerar los factores de tamaño de la botella, deformación de la  
767 botella, de tal modo que se busco identificar si las botellas tenían tapa u etiquetas.  
768 Por consiguiente, se realizo experimentación para obtener la posición óptima de la  
769 cámara para que las presentaciones de cada botella no sean significativas véase  
770 Figura 21. Se considero para la primer etapa de análisis 100 imágenes de PET,  
771 no PET y PET que no se puede reciclar, así como botellas con deformación y no  
772 deformación [Scavino et al., 2009, P. Inrawong, 2016, Wang et al., 2019b].

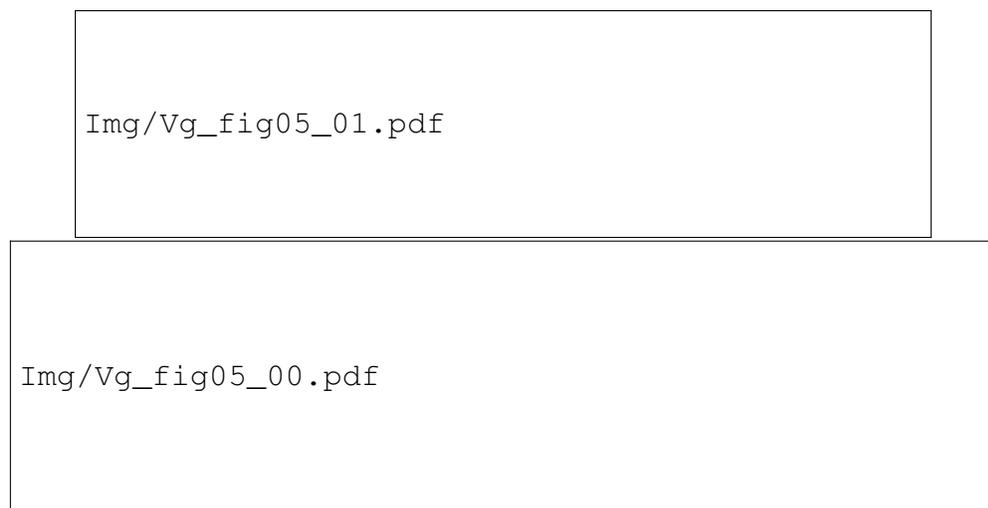


Figura 21: Ilustración del procesamiento de las imágenes que se realizaron por *Matlab* [P. Inrawong, 2016].

773 La configuración de las imágenes fue con colores RGB y formato JPG. Se  
774 programo en *Matlab* para procesar las imágenes, se dividió en tres colores, rojo,  
775 verde y azul, con estas matrices se normalizaron los datos y se genero un histo-

776 grama que representa la distribución del conjunto de datos que nos ayudo a visua-  
777 lizar la distribución y dispersión. Estos histogramas de imágenes se usaron para  
778 evaluar la extracción de características en las fotos. Para normalizar los datos se  
779 utilizo PCA debido a que es una herramienta que permite procesar toda la infor-  
780 mación y disminuye el ruido que se pueda generar en el proceso de la fotografía  
781 [Nawrocky, 2010, Shahbudin et al., 2010]. Se ejecutaron dos diseños de experimen-  
782 tos en esta etapa para poder calcular la variabilidad al tomar las fotografías, se ana-  
783 lizo las variables de mano de obra, mediciones, medio ambiente, cámara fotográfica  
784 y métodos que conforman al proceso. Se cuantifico el sistema de medición para  
785 que en la medida de lo posible sea preciso, exacto, repetible y estable en el tiempo  
786 [IMNC, 2008, Schmid et al., 2000].

## 787 . **Desarrollo de espectrofotometría para identificar líquidos den-** 788 **tro de la botella**

789 Se desarrollo un sistema que trabaja en el espectro visible para que por  
790 medio de la medición de la intensidad de luz se pueda identificar si existe líqui-  
791 do dentro de la botella de plástico, véase la Figura 22. En esta etapa se desarro-  
792 llo un luxómetro que se activa al identificar una botella que no tenga deformación  
793 [Rani et al., 2019].

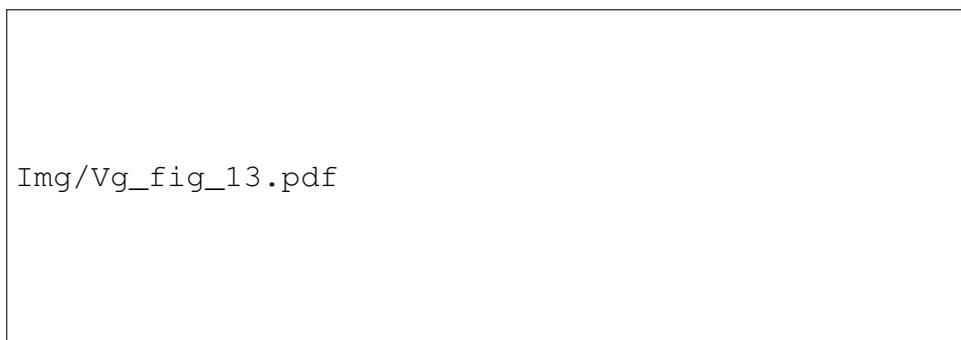


Figura 22: Sistema de discriminación por medio de la detección de PET por su longitud de onda.

794 El mensurando es la corriente eléctrica que pasa a través de un fotodio-  
795 do de silicio para medir la iluminancia. La medida se debe indirectamente a las  
796 propiedades del sensor que cambia su resistencia cuando varía la iluminancia en  
797 el fotodiodo [Semiconductors, 2006]. Si la relación entre V y I es lineal, estamos  
798 en presencia de un material o componente óhmico. La relación que describe es-  
799 te comportamiento se conoce como ley de Ohm,  $I = \frac{V}{R}$ . Al variar la resistencia  
800 del fotodiodo debido al cambio en la iluminancia y la V inducida, la I cambiará.  
801 Dependiendo de esta variación, se puede calcular la iluminancia. Para ilustrar el  
802 comportamiento del sensor, el fabricante proporciona información representada en  
803 [Semiconductors, 2006], y la escala es logarítmica-logarítmica.

## 804 . **Diseño del sistema de acondicionamiento de señal para el dio-** 805 **do de InGaAs**

806 Para realizar el sistema de acondicionamiento de señal, primero se identi-  
807 ficaron los diferentes rangos de operación de los diversos modelos de diodos y las  
808 características que poseen para trabajar bajo distintas condiciones ambientales. Pa-  
809 ra ello se consultó la hoja de datos y así obtener el tipo de señal de salida que el  
810 diodo envía para ser procesada como una señal limpia hacia el sistema de adquisi-  
811 ción de la señal. La información enviada por el sensor se mostrará en una pantalla.  
812 En esta etapa se simuló el sistema eléctrico y electrónico para determinar el diseño  
813 y desarrollo.

## 814 . **Desarrollo de la experimentación**

### 815 . **Análisis de los factores que interactúan con el mensurando**

816 Se estableció la comparación de variables entre los factores, ver Figura  
817 23, y se buscó la inferencia estadística para las variables aleatorias que provocan la

818 variación en el espacio muestral. Para ello se desarrollaron diseños de experimentos  
819 de factores para obtener el nivel de cada factor y estimar el nivel óptimo minimizando  
820 la variación del sistema. Para la clasificación y selección del diseño experimental se  
821 consideraron cinco aspectos que influyen en la selección de un diseño experimental,  
822 en el sentido en que cuando cambia algún aspecto del problema, por lo general  
823 nos llevan a cambiar el diseño y a continuación se enumeran los aspectos que se  
824 consideraron:

- 825 1. El objetivo del experimento.
- 826 2. El número de factores a estudiar.
- 827 3. El número de niveles que se prueban en cada factor.
- 828 4. Los efectos que interesa investigar (relación factores-respuesta).
- 829 5. El costo del experimento, tiempo y precisión deseada.

830 En este sentido, de acuerdo con el objetivo de esta metodología y sin pretender  
831 ser exhaustivos, los diseños se pueden clasificar como: diseños para comparar dos  
832 o más tratamientos. Diseños para estudiar el efecto de varios factores sobre la(s)  
833 respuesta(s). Diseños para determinar el punto óptimo de operación del proceso.  
834 Diseños para la optimización de una mezcla y diseños para hacer el producto o  
835 proceso insensible a factores no controlables.

Img/Vg\_fig\_14.pdf

Figura 23: Factores y variables en la clasificación en envases de plástico. El mensurando consiste en la longitud de onda del espectro infrarrojo.

836           Para esta metodología se consideraron tres tipos de diseños de experimen-  
837 tos y cambiaron en función de los resultados obtenidos. (1) Modelos de efectos  
838 aleatorios (Los niveles de prueba son una muestra aleatoria de la población de ni-  
839 veles posibles, Estudio R&R), (2) Modelo mixto: factores aleatorios y fijos (En estos  
840 experimentos se tienen factores aleatorios y factores fijos), (3) Factoriales  $2^k$  con  
841 punto al centro (Los  $k$  factores admitan un nivel de prueba intermedio, es recomen-  
842 dable implementar un tratamiento adicional formado por la combinación del nivel  
843 intermedio o medio de todos los factores).

#### 844 . **Diseño de experimentos para la posición de la cámara fotográfica**

845           Para poder definir la posición correcta entre la cámara y los envases de  
846 PET, se estudio el efecto individual y de interacción, se consideraron dos factores  
847 para obtener la mayor cantidad de características de las imágenes ver Figura 24.

848 Para ello se considero tres niveles por cada factor para el diseño de experimentos  
 849 para descartar todas las combinaciones que pueden formarse con los niveles de  
 850 los factores. Se considero como factor la distancia de la cámara, el tamaño de la  
 851 botella y si esta tenia etiqueta y no tenia etiqueta [Scott, 1995, Capson et al., 2011,  
 852 Masoumi, 2012].

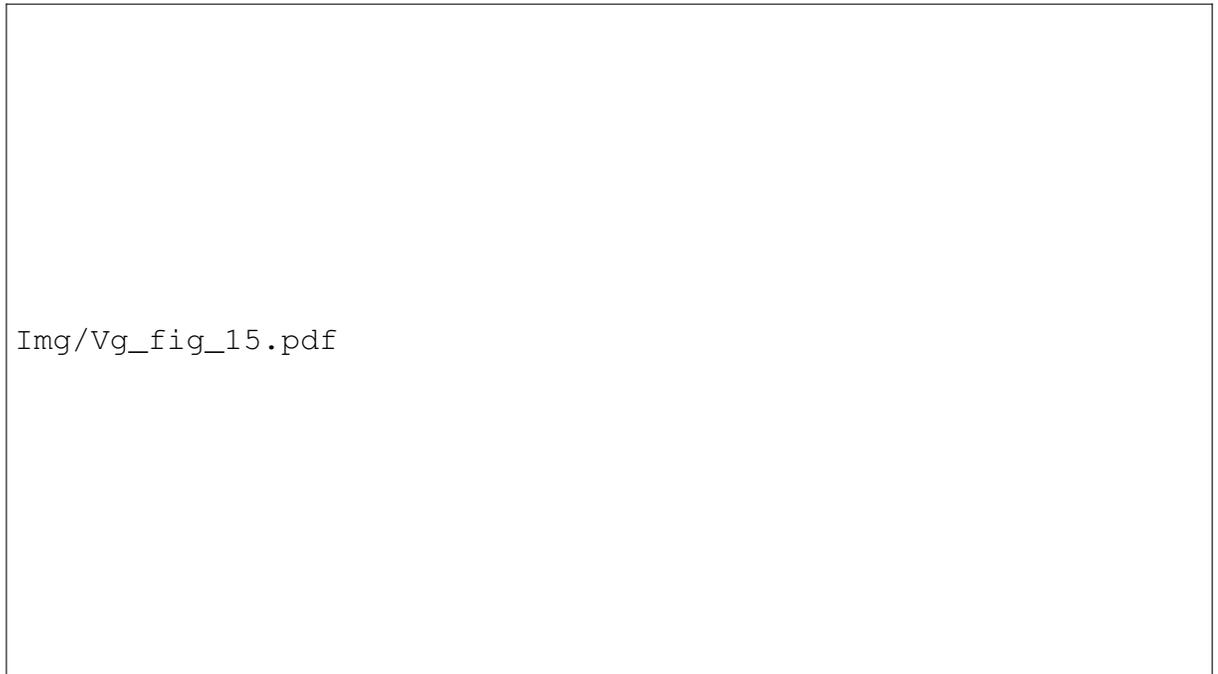


Figura 24: Factores y variables en la posición de la cámara.

Tabla 7: Planteamiento de un diseño de experimentos con tres niveles y por lo menos tres replicas.

Distancia (cm)	Tamaño de botella (mL)	Réplicas			Respuesta	Varianza
		1	2	3		
25	600	$x_{ij}$	$x_{ij}$	$x_{ij}$	$y_1$	$s_1$
30	500	$x_{ij}$	$x_{ij}$	$x_{ij}$	$y_2$	$s_2$
35	355	$x_{ij}$	$x_{ij}$	$x_{ij}$	$y_3$	$s_3$

853 Por lo tanto, el diseño de experimentos consistió en correr ocho condiciones  
 854 de prueba en orden aleatorio, con cierta cantidad de réplicas, y en cada caso se

855 registro el valor de las variables de respuesta [Gutiérrez Pulido, 2004].

856 . **Diseño de experimentos para la posición e intensidad de la luz al interactuar**  
857 **con los sensores IR**

858 El ángulo, distancia y frecuencia son factores que se consideran que afec-  
859 tan en la obtención de los sensores IR. Se consideraron dos configuraciones para el  
860 desarrollo del diseño de experimentos con tres distancias diferentes a una misma ve-  
861 locidad de la banda transportadora. Con los datos obtenidos se determino que la dis-  
862 tancia significativa para la intensidad de luz, véase Figura 25 [Gutiérrez Pulido, 2004].

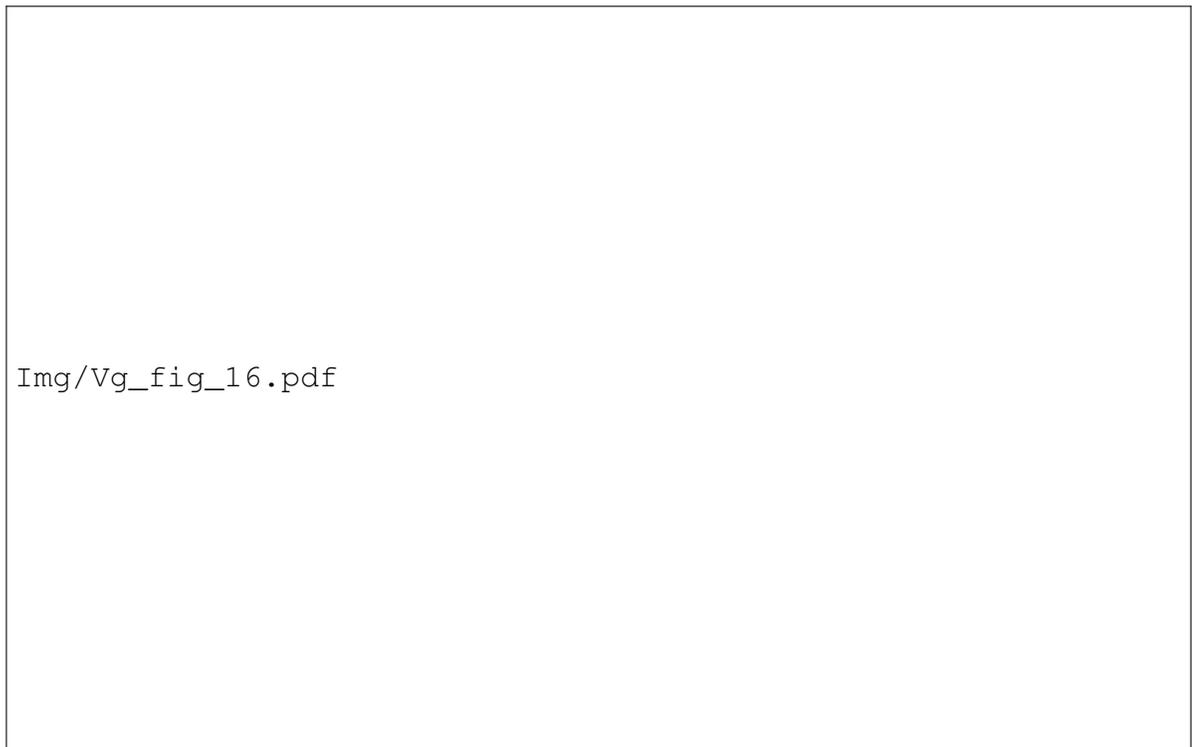


Figura 25: Factores y variables en el diseño de experimentos considerando todos las variables posibles para la experimentación.

863 Se desarrolló tres diseños de experimentos para detectar la iluminancia; y  
864 se identifique si el líquido está dentro de la botella de plástico, ver Figura 26.

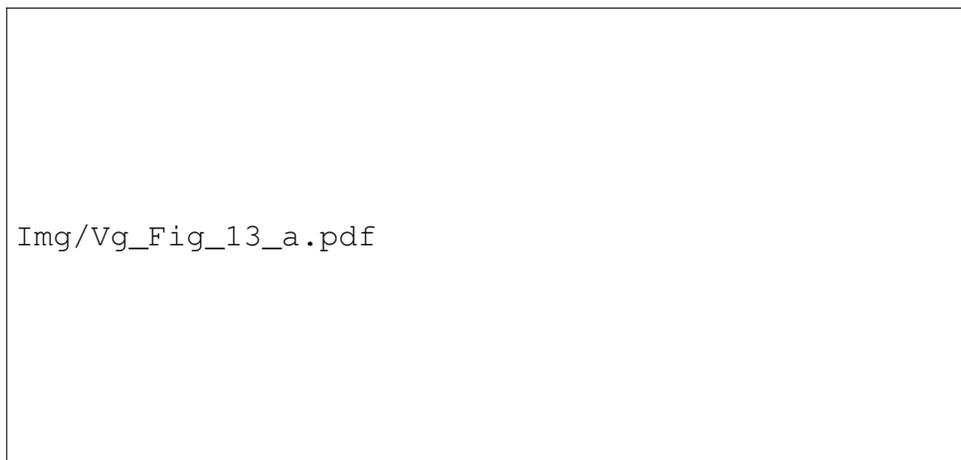


Figura 26: Sistema de detección de líquidos en botellas PET por su iluminancia.

865           Se identifico la posición óptima para obtener lecturas que representan la  
866 cantidad de líquido dentro de las botellas. La posición de la botella se determino si es  
867 representativa para la detección de líquidos así como de líquidos oscuros, véase la  
868 Figura 27 para ver los factores a considerar [Gutiérrez Pulido, 2004, Rani et al., 2019].

Img/Vg\_fig\_17.pdf

Figura 27: Factores y variables en el diseño de experimentos para determinar la posición del luxómetro.

Tabla 8: Planteamiento del diseño de experimentos para identificar la iluminancia cuando hay líquidos dentro de la botella.

Distancia (cm)	Tamaño de botella (mL)	Réplicas			Respuesta
		1	2	3	
15	3000	$x_{ij}$	$x_{ij}$	$x_{ij}$	$y_1$
20	2000	$x_{ij}$	$x_{ij}$	$x_{ij}$	$y_2$
25	1500	$x_{ij}$	$x_{ij}$	$x_{ij}$	$y_3$

869 . **Desarrollo del sistema de identificación con aprendizaje au-**  
870 **tomático**

871 Para aproximar la solución y procesar el problema de clasificación que se  
872 esta planteando se consideraron diferentes herramientas estadísticas de apren-

873 dizaje automático para poder interpretar y caracterizar los datos como el análi-  
 874 sis de componentes principales y regresión logística que al combinarlas incremen-  
 875 tan la precisión de predicción de los datos [Choubey et al., 2020, Rich et al., 2020,  
 876 Ji et al., 2020]. Para identificar la forma se utilizo la transformada de *Hough* como en-  
 877 trada para SVM debido a que al trabajar juntos en imágenes completas se logra una  
 878 precisión de detección mayor al 94 % [Prasad, 2012, Vijayarajeswari et al., 2019,  
 879 Matos et al., 2019, Ji et al., 2020].

### 880 . **Regresión logística con PCA para la clasificación de las imágenes**

Se utilizaron los datos de las imágenes de las botellas y de los datos de los sensores que representan las características que ayudan a discriminar las botellas. Para reducir la dimensión de los datos de n-dimensiones a k-dimensiones, obtenemos la matriz de covarianza. Conservando las características principales de las imágenes capturadas [Kumar, 2003].

$$X = \begin{pmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1j} & \cdots & x_{1p} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{i1} & \cdots & x_{ij} & \cdots & x_{ip} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n1} & \cdots & x_{nj} & \cdots & x_{np} \end{pmatrix}$$

Matriz de datos centrados

$$\bar{X} = X - 1\bar{x}' = HX$$

881 La matriz simétrica  $pxp$  de covarianzas muestrales.

$$S = \begin{pmatrix} s_{11} & s_{12} & \cdots & s_{1p} \\ s_{21} & s_{22} & \cdots & s_{2p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ s_{p1} & s_{p2} & \cdots & s_{pp} \end{pmatrix}$$

Matriz de covarianzas

$$S = \frac{1}{n} \bar{X}' \bar{X} = \frac{1}{n} X' H X$$

Siendo

$$s_{jj'} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_j)(x_{ij'} - \bar{x}_{j'})$$

882 Además de la matriz de covarianzas interesa también la matriz de correlaciones:

$$R = \begin{pmatrix} 1 & s_{12} & \cdots & r_{1p} \\ r_{21} & 1 & \cdots & r_{2p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{p1} & r_{p2} & \cdots & 1 \end{pmatrix}$$

Donde  $r_{ij} = \text{corr}(X_i, X_j)$  es el coeficiente de correlación (muestral) entre las variables  $X_i, X_j$ , que verifica:

$$R = D^{-1} S D^{-1}, S = D R D$$

Siendo  $D$  la matriz diagonal con las desviaciones típicas de las variables. Los datos se procesarán en *Matlab* con las ecuaciones de arriba ya mencionadas. Se busca considerar tres componentes principales que representarían el 100 % de la variación [Kumar, 2003].

$$PC_1 = X_i + X_{i+1}, \dots, X_l$$

$$PC_2 = X_i + X_{i+1}, \dots, X_l$$

$$PC_3 = X_i + X_{i+1}, \dots, X_l$$

Una vez obtenidos los tres componentes principales se multiplica cada componente por los valores obtenidos en la matriz de datos de las imágenes estos datos se sumarán para cada componente y se obtienen las coordenadas para la interpretación de los PCA [Kumar, 2003].

$$(\text{Matriz de PCA})(\text{Matriz de imágenes}) = (\text{Coordenadas de los factores})$$

883 Con estos datos se realizo el sumatorio de cada columna para obtener las coor-  
 884 denadas en tres dimensiones debido a los tres componentes principales. El ob-  
 885 jetivo es que PCA disminuya el error al momento de clasificar entre las botellas  
 886 transparentes de PET y las botellas de color verde. El siguiente paso que fue se-  
 887 leccionar la correcta clasificación de los datos por medio de regresión logística  
 888 [Choubey et al., 2020, Rich et al., 2020, Ji et al., 2020].

889 . **Entrenamiento para la clasificación por medio de regresión logística**

890 Se gráfico los datos obtenidos para observar su distribución y así diseñar  
 891 la zona de decisión y confirmar si la entrada de datos por medio de PCA es correcto  
 892 y los datos se comportan linealmente. Para encontrar el plano de características se  
 893 implemento regresión logística. Las cien imágenes que se tomaron como muestra  
 894 y los datos de los sensores se clasifican y los valores obtenidos se ingresan a una  
 895 Tabla que almacenara los datos con diferentes correlaciones [Choubey et al., 2020,  
 896 Rich et al., 2020, Ji et al., 2020].

Tabla 9: Discriminación de las botellas de plástico por medio de la extracción de sus características.

PET	NO-PET
$X_1 X_2$	$x_1 x_2$
$(\cdot) (\cdot)$	$(\cdot) (\cdot)$
$X_n X_n$	$x_n x_n$

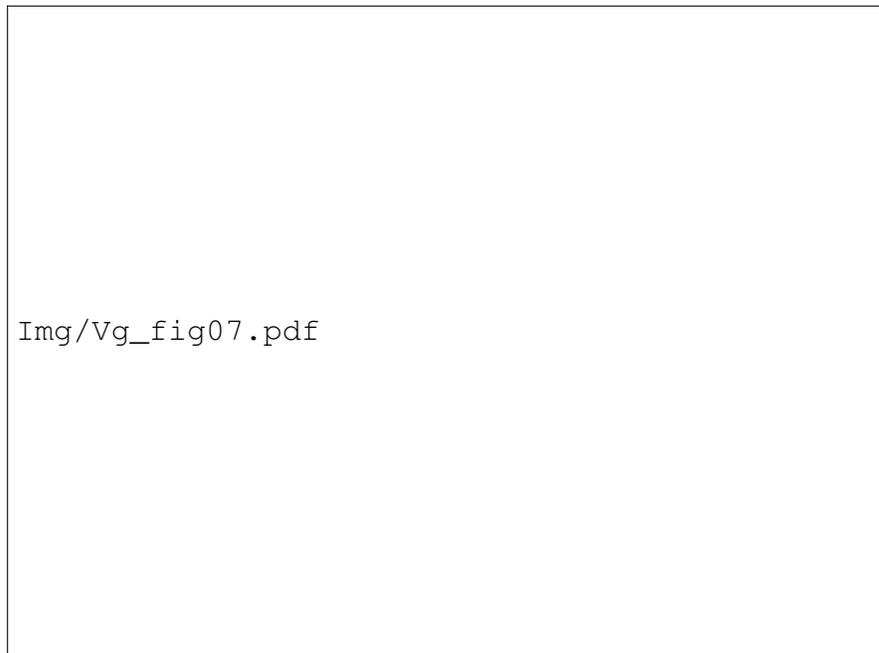


Figura 28: Datos que permitirán visualizar la zona de decisión.

897 . **Vectorización de los datos**

El modelo de regresión logística múltiple uno-vs-todos se desarrollo para el sistema y detecte, clasifique PET, no PET y PET contaminado. La programación se realizo con *Matlab* y se comparo con las ecuaciones mencionadas en esta la sección con el objetivo de comparar los resultados con las librerías pre-cargadas en *Matlab* así como por la función de costo definida por:

$$J(\theta) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \left[ -y^i \log \left( h_{\theta}(x^i) \right) (1 - y^i) \log \left( 1 - h_{\theta}(x^i) \right) \right] + \frac{\lambda}{2m} \sum_{j=1}^n \theta_j^2 \quad (10)$$

898 Correspondientemente, las derivadas parciales de la regresión logística regulariza-  
 899 da de la función de costo para  $\theta_0$  es definida como:

$$\frac{\partial J}{\partial \theta_j} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \left[ \left( h_{\theta}(x^i) - y^i \right) x_j^i \right]; \text{ para } : j = 0$$

$$\frac{\partial J}{\partial \theta_j} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \left[ \left( h_{\theta}(x^i) - y^i \right) x_j^i \right] + \left( \frac{\lambda}{m} \theta_j \right); \text{para } j \geq 1$$

Estas dos ecuaciones son importantes para las últimas líneas del código para establecer las condiciones iniciales. Entrenamiento SVM:

$$\min_{\theta} = C \sum_{i=1}^m \left[ y^i \cos t_1(\theta^T x^i) + (1 - y^i) \cos t_0(\theta^T x^i) \right] + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \theta_j^2 \quad (11)$$

900 Con SVM se espera obtener el plano de decisión para clasificar PET. Una vez anali-  
 901 zado el espacio muestral y con resultados deseados para la clasificación se trabaja  
 902 junto con el sistema mecánico y eléctrico [Choubey et al., 2020].



Figura 29: Procedimiento que se realizara para obtener los datos que permitan clasificar e identificar las botellas de PET.

## VIII. RESULTADOS

903

### 904 . **Categorización y obtención de los datos**

#### 905 . **Determinación de las unidades de análisis-recolección de datos**

906           Por el método de la observación y el análisis estadístico se llevo acabo esta  
907 sección. El estudio contempló solo las características de botellas PET post-consumo  
908 que son recolectadas y llevadas a un centro de acopio para su compra y posterior  
909 procesamiento, con la condición que todo producto que no es PET se considera  
910 en este estudio como merma o material no deseado. En esta sección uno de los  
911 objetivos es poder establecer el tiempo que se necesita para separar por lo menos  
912 una tonelada de PET manualmente y establecer una relación en los métodos que  
913 actualmente existen en el mercado para separar polímeros. El estudio y la recolec-  
914 ción de los datos se realizaron en la ciudad de Querétaro, en un centro de acopio de  
915 nombre Materiales Reciclables Ángeles. El período de investigación y recolección  
916 de los datos fue del 07 de Marzo de 2021 y se termino la toma de muestras el 30  
917 de Abril de 2021. La recolección de las botellas PET post-consumo se clasificaron  
918 manualmente por tres personas en promedio con conocimientos previos de las ca-  
919 racterísticas de las botellas que deben de tener el polímero PET post-consumo para  
920 ser reciclable. Es importante conocer o inferir la procedencia de las botellas post  
921 consumo en este estudio para la interpretación. Los residuos plásticos provenientes  
922 de la masa de Residuos Sólidos Urbanos o (RSU). Estos se dividen a su vez en tres  
923 clases:

- 924       ■ Residuos plásticos de tipo simple: han sido clasificados y separados entre sí  
925       de las distintas clases;
- 926       ■ Residuos mixtos: los diferentes tipos de plásticos que se hallan mezclados  
927       entre sí;

928 ■ Residuos plásticos mixtos combinados: con otros residuos, como con el papel,  
929 cartón, metales, etcétera.

930 Los RSU se pueden clasificar de acuerdo a su origen:

931 1. Domiciliario: Originado en los hogares, departamentos o casas.

932 2. Comercial: Generado por los comercios ya sean minoristas o mayoristas.

933 3. Institucional: Generado por las oficinas, hoteles e instituciones.

934 4. Industrial: Generado por la industria.

935 5. Otros: Áridos (escombros de construcción), restos de poda y corte de pasto.

936 Para poder entender y estructurar esta parte de la metodología se planeo una  
937 hipótesis y objetivos que nos ayudaron a entender el alcance.

#### 938 . **Análisis del comportamiento de los datos recolectados**

939 Se trabajo con el control estadístico del proceso, que es una técnica que  
940 es usada para monitorear, controlar, evaluar y analizar mediante el uso de una es-  
941 tadística o enfoque matemático.

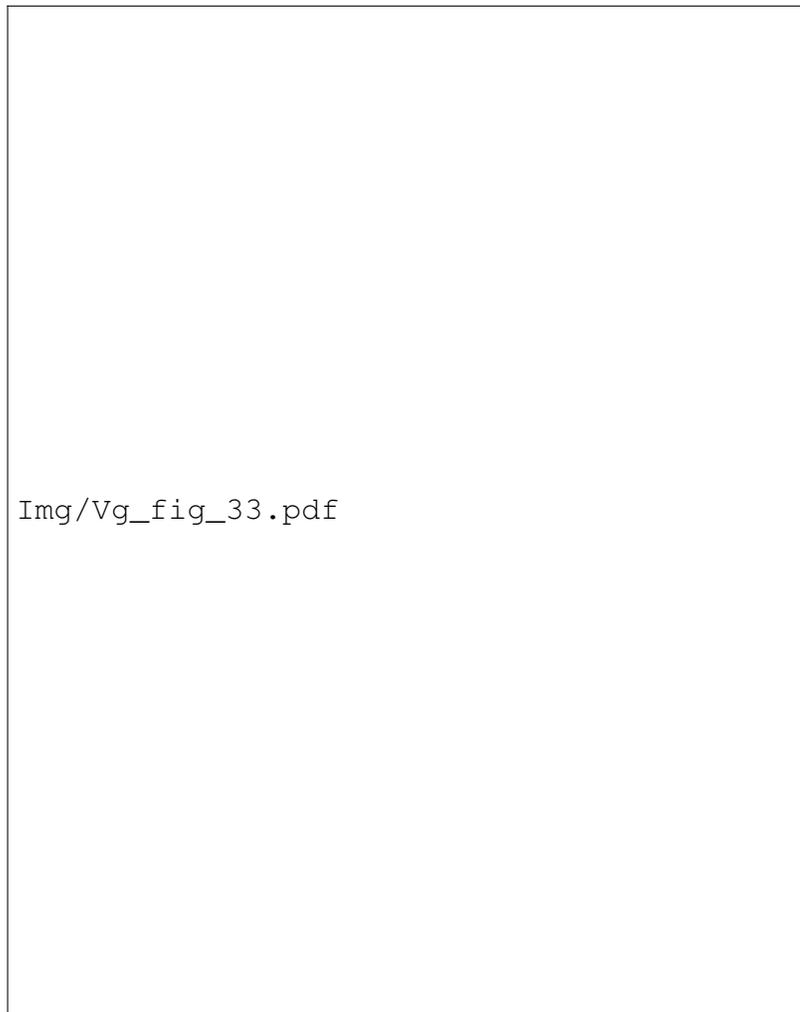


Figura 30: Histogramas que representan los posibles resultados al recolectar los datos de las botellas de plástico.

942           Dependiendo de los resultados de los histogramas se elaboro un diagrama  
943 de Pareto para poder identificar prioridades y causas, de los diferentes problemas  
944 que se presentan en un proceso de recolección para reconocer el 80 % de la pro-  
945 blemática que tienen las botellas al presentar líquidos dentro del envase y que se  
946 derivan por causas comunes.

Img/Vg\_fig\_34.pdf

Figura 31: Gráfico de Pareto para identificar causas comunes en la variación de las botellas.

Tabla 10: Resultados del una muestra de 100kg de PET post-consumo.

Botellas que más se repitieron		
ID	Botella (mL)	Frecuencia
I	600	1307
Q	1000	837
S	1500	653
T	2000	642
U	3000	382
G	500	346
D	350	294
B	250	205
E	400	173
C	3000	55
V	5000	27
W	10000	15
P	950	15
L	750	8

947 . **Variabilidad de las botellas PET**

948 Se consideraron en el estudio veintitrés botellas de PET post-consumo con-  
 949 siderando la capacidad de almacenamiento de liquido, las botellas van desde los  
 950 100 mililitros hasta 10 litros. De una muestra de 100 kg de PET sin clasificar se ob-  
 951 tuvieron los siguientes datos, véase Figura 32, en el diagrama de pareto se puede  
 952 ver los factores vitales de los triviales, en este caso son cuatro presentaciones de  
 953 botellas las que representan más del 55 %. Las presentaciones en las botella PET  
 954 que más variación tiene son las de 1.5 litros, le sigue la de 2 litros y en tercer lugar  
 955 la de 1 litro mismas que representan el 43.8 %. En la Figura 33 se describe los ele-  
 956 mentos del proceso que se utilizo en el estudio para discriminar las botellas de PET  
 957 post-consumo.

Tabla 11: Información ampliada sobre las diferentes presentaciones en las botellas PET.

Factores con mayor influencia en el tamaño de la botella				
ID	Botella (mL)	Frecuencia	Porcentaje (%)	Acumulado (%)
S	1500	30	15.463	15.463
T	2000	29	14.948	30.412
Q	1000	26	13.402	43.814
G	500	22	11.340	55.154
U	3000	19	9.793	64.948
E	400	17	8.762	73.711
I	600	16	8.247	81.958
B	250	12	6.185	88.144
D	350	8	4.123	92.268
V	5000	4	2.061	94.329
W	300	3	1.546	95.876
L	750	3	1.546	97.422
C	10000	3	1.546	98.969
P	950	2	1.030	100



Figura 32: Diferentes presentaciones de botellas PET en el mercado Mexicano, de veintitrés presentaciones de botellas solo 14 se identificaron.

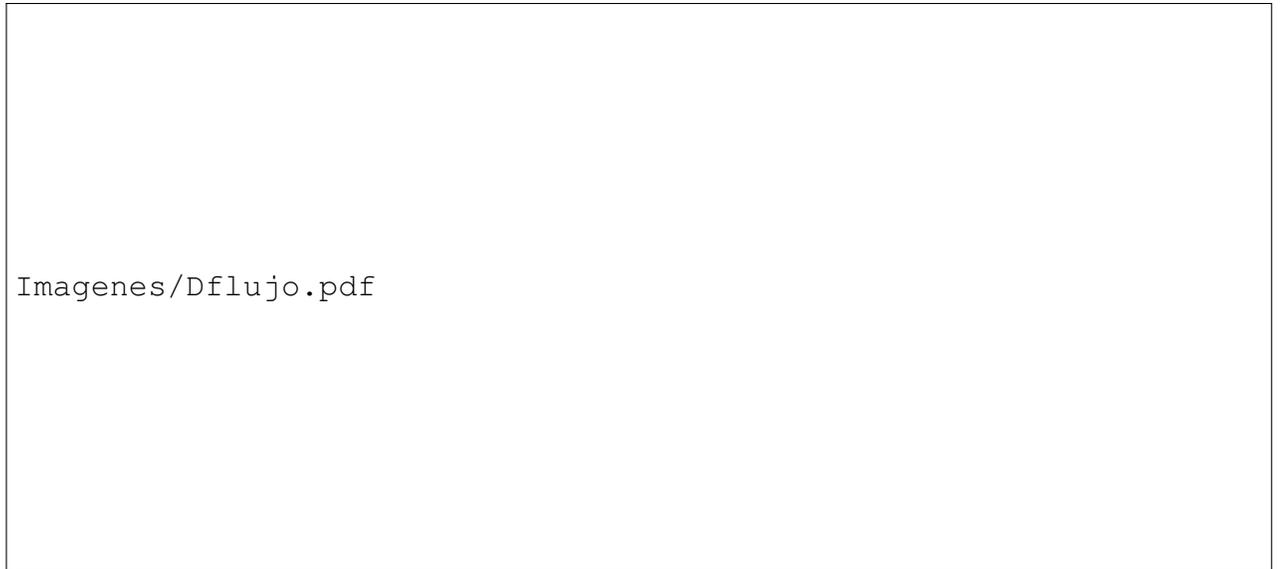


Figura 33: Diagrama de flujo del proceso manual de clasificación para las botellas PET.

958 . **Cuantificación de los factores de las botellas PET que conservan sus ca-**  
959 **racterísticas post-consumo**



Figura 34: Relación de botellas PET sin tapas.

Tabla 12: Información ampliada sobre las diferentes presentaciones de las botellas PET con tapas de diferentes colores.

Pareto (tapas de diferentes colores)				
ID	Botella (mL)	Frecuencia	Porcentaje (%)	Acumulado (%)
T	2000	24	15.789	15.789
Q	1000	23	15.131	30.921
S	1500	22	14.473	45.394
G	500	17	11.184	56.578
E	400	15	9.868	66.447
U	3000	13	8.552	75
I	600	11	7.236	82.236
B	250	9	5.921	88.157
D	350	7	4.605	92.763
V	5000	4	2.631	95.394
W	300	3	1.973	97.368
L	750	2	1.315	98.684
P	10000	1	0.657	99.342
C	950	1	0.657	100



Figura 35: Relación de botellas PET con tapas.

Tabla 13: Información ampliada sobre las diferentes presentaciones de las botellas PET sin tapas.

Botellas sin tapas de diferentes colores.				
ID	Botella (mL)	Frecuencia	Porcentaje (%)	Acumulado (%)
S	1500	8	19.047	19.047
U	3000	6	14.285	33.333
T	2000	5	11.904	45.238
I	600	5	11.904	57.142
G	500	5	11.904	69.047
Q	1000	3	7.142	76.190
B	250	3	7.142	83.333
E	10000	2	4.761	88.095
C	400	2	4.761	92.857
P	950	1	2.380	95.238
L	750	1	2.380	97.619
D	350	1	2.380	100



Figura 36: Relación de botellas PET con tapas rojas.

Tabla 14: Información ampliada sobre las diferentes presentaciones de las botellas PET con tapas rojas.

Botellas con tapas de color roja.				
ID	Botella (mL)	Frecuencia	Porcentaje (%)	Acumulado (%)
T	2000	5	16.129	16.129
G	500	5	16.129	32.258
U	3000	4	12.903	45.161
Q	1000	4	12.903	58.064
S	1500	3	9.677	67.741
I	600	3	9.677	77.419
E	400	3	9.677	87.096
B	250	2	6.451	93.548
L	750	1	3.225	96.774
D	350	1	3.225	100



Figura 37: Relación de botellas PET con tapas naranja.

Tabla 15: Información ampliada sobre las diferentes presentaciones de las botellas PET con tapas naranja.

Botellas con tapas de color naranja.				
ID	Botella (mL)	Frecuencia	Porcentaje (%)	Acumulado (%)
Q	1000	4	26.666	26.666
U	3000	2	13.33	40
S	1500	2	13.333	53.333
V	5000	1	6.666	60
T	2000	1	6.666	66.666
I	600	1	6.666	73.333
G	500	1	6.666	80
E	400	1	6.666	86.666
D	350	1	6.666	93.333
B	250	1	6.666	100



Figura 38: Relación de botellas PET con tapas verdes.

Tabla 16: Información ampliada sobre las diferentes presentaciones de las botellas PET con tapas verdes.

Botellas con tapas de color verde.				
ID	Botella (mL)	Frecuencia	Porcentaje (%)	Acumulado (%)
T	2000	5	18.518	18.518
U	3000	4	14.814	33.333
S	1500	4	14.814	48.148
Q	1000	3	11.111	59.259
I	600	3	11.111	70.370
G	500	2	7.407	77.777
E	400	2	7.407	85.185
W	5000	1	3.703	88.888
V	350	1	3.703	92.592
D	3000	1	3.703	96.296
B	250	1	3.703	100



Figura 39: Relación de botellas PET con tapas azules.

Tabla 17: Información ampliada sobre las diferentes presentaciones de las botellas PET con tapas azules.

Botellas con tapas de color azul.				
ID	Botella (mL)	Frecuencia	Porcentaje (%)	Acumulado (%)
T	2000	5	17.857	17.857
Q	1000	5	17.857	35.714
U	3000	4	14.285	50
I	600	4	14.285	64.285
S	1500	3	10.714	75
G	500	2	7.142	82.142
E	400	2	7.142	89.285
W	5000	1	3.571	92.857
V	350	1	3.571	96.428
D	3000	1	3.571	100



Figura 40: Relación de botellas PET con tapas amarillas.

Tabla 18: Información ampliada sobre las diferentes presentaciones de las botellas PET con tapas amarillas.

Botellas con tapas de color amarillo.				
ID	Botella (mL)	Frecuencia	Porcentaje (%)	Acumulado (%)
Q	1000	3	21.428	21.428
T	2000	2	14.285	35.714
S	1500	2	14.285	50
I	600	2	14.285	64.285
P	950	1	7.142	71.428
G	500	1	7.142	78.571
E	400	1	7.142	85.714
D	350	1	7.142	92.857
B	250	1	7.142	100



Figura 41: Relación de botellas PET con tapas negras.

Tabla 19: Información ampliada sobre las diferentes presentaciones de las botellas PET con tapas negras.

Botellas con tapas de color negro.				
ID	Botella (mL)	Frecuencia	Porcentaje (%)	Acumulado (%)
S	1500	4	16	16
Q	1000	4	16	32
I	600	4	16	48
E	400	4	16	64
T	2000	3	12	76
G	500	2	8	84
B	250	2	8	92
L	750	1	4	96
D	350	1	4	100



Figura 42: Relación de botellas PET con tapas blancas.

Tabla 20: Información ampliada sobre las diferentes presentaciones de las botellas PET con tapas blancas.

Botellas con tapas de color blanco.				
ID	Botella (mL)	Frecuencia	Porcentaje (%)	Acumulado (%)
G	500	4	16.666	16.666
T	2000	3	12.5	29.166
S	1500	3	12.5	41.666
Q	1000	3	12.5	54.166
I	600	3	12.5	66.666
E	400	2	8.333	75
B	250	2	8.333	83.333
W	5000	1	4.166	87.5
V	10000	1	4.166	91.666
D	350	1	4.166	95.833
C	300	1	4.166	100



Figura 43: Relación de botellas PET con tapas rosa.

Tabla 21: Información ampliada sobre las diferentes presentaciones de las botellas PET con tapas rosa.

Botellas con tapas de color rosa.				
ID	Botella (mL)	Frecuencia	Porcentaje (%)	Acumulado (%)
S	1500	2	33.333	33.333
Q	1000	2	33.333	66.666
T	2000	1	16.666	83.333
I	600	1	16.666	100



Figura 44: Relación de botellas PET transparentes.

Tabla 22: Información ampliada sobre las diferentes presentaciones de las botellas PET transparentes.

Botellas transparentes.				
ID	Botella (mL)	Frecuencia	Porcentaje (%)	Acumulado (%)
S	1500	25	14.792	14.792
Q	1000	25	14.792	29.585
T	2000	24	14.201	43.786
G	500	21	12.426	56.213
U	3000	15	8.875	65.088
E	400	15	8.875	73.964497
I	600	14	8.284	82.2485
B	250	11	6.508	88.757
D	350	7	4.142	92.899
L	10000	3	1.775	94.674
C	750	3	1.775	96.449
W	5000	2	1.183	97.633
V	950	2	1.183	98.816
P	3000	2	1.183	100



Figura 45: Relación de botellas PET azules.

Tabla 23: Información ampliada sobre las diferentes presentaciones de las botellas PET azules.

Botellas azules.				
ID	Botella (mL)	Frecuencia	Porcentaje (%)	Acumulado (%)
S	1500 L	2	40	40
T	2000	1	20	60
Q	1000	1	20	80
I	600	1	20	100



Figura 46: Relación de botellas PET verdes.

Tabla 24: Información ampliada sobre las diferentes presentaciones de las botellas PET verdes.

Botellas verdes.				
ID	Botella (mL)	Frecuencia	Porcentaje (%)	Acumulado (%)
T	2000	4	23.529	23.529
U	3000	3	17.647	41.176
S	1500 L	3	17.647	58.823
E	400 L	2	11.764	70.588
W	5000	1	5.882	76.470
V	600 L	1	5.882	82.352
I	500 L	1	5.882	88.235
G	300 L	1	5.882	94.117
B	250 L	1	5.882	100



Figura 47: Relación de botellas PET aplastadas.

Tabla 25: Información ampliada sobre las diferentes presentaciones de las botellas PET aplastadas.

Botellas aplastadas.				
ID	Botella (mL)	Frecuencia	Porcentaje (%)	Acumulado (%)
T	2000	7	14.893	14.893
S	1500	7	14.893	29.787
B	250	7	14.893	44.680
U	3000	5	10.638	55.319
E	400	5	10.638	65.957
I	500	4	8.510	74.468
G	300	4	8.510	82.978
W	5000	3	6.382	89.361
V	600	3	6.382	95.744
Q	1000	1	2.127	97.872
C	300	1	2.127	100

960 . **Diseño y desarrollo del sistema mecánico y eléctrico del siste-**  
 961 **ma de clasificación**

962 En el protocolo de esta tesis se propuso alimentar el sistema de clasifi-  
 963 cación por un sistema mecánico que separe las botellas por medio de un sistema  
 964 giratorio, véase la Figura 48. Para ilustrar la idea es muy parecido al sistema que  
 965 tiene una lavadora vertical, véase la Figura 49, con el motor por la parte de abajo  
 966 con un tambor circular, el agitador sirve para que al momento de depositar el PET  
 967 en el tambor el agitador lo impulse a la zona de salida misma que estará conectado  
 968 a un tornillo de Arquímedes que llevara las botellas hasta el sistema de detección y  
 969 clasificación [Gutiérrez Pulido, 2004].

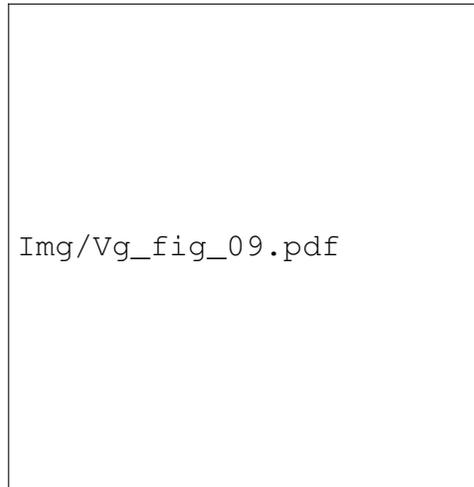


Figura 48: Recipiente donde se depositará el PET que no está clasificado y su accionamiento es por un motor.

970           Se propuso que una vez que se allá detectado el tipo de material por me-  
971   dio de un sistema de control mismo que contaría con tres motores los cuales se  
972   activaran dependiendo del material y por medio de gravedad se depositarían a un  
973   contenedor. En esta etapa se consideraba que en condiciones óptimas solo una  
974   botella será analizada y clasificada. De tal forma que, si al introducir más de una  
975   botella el tornillo de Arquímedes, tendría la capacidad de cambiar el sentido de giro  
976   y depositar la botella en el contenedor correcto.

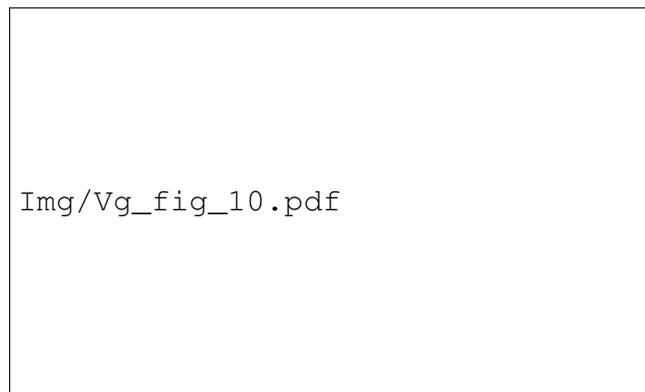


Figura 49: El sistema llevará las botellas por el tornillo de Arquímedes y por medio de unas aberturas que se abrirán automáticamente clasificaran el PET.

977 Hasta este punto de la metodología con los resultados obtenidos en la ca-  
 978 tegorización y diseño mecánico se cambio el diseño para optimizar el porcentaje de  
 979 clasificación, así como la velocidad de trabajo y que sea asequible.

980 . **Parámetros del diseño mecánico**

Tabla 26: Parámetros del segundo diseño

No.	Nombre	Parámetro	Expresión	Valor
1	Base banda ancho	baseBandaAncho	90 cm	90.0
2	Base banda largo	baseBandaLargo	200 cm	200.0
3	Base pata banda	basePataBanda	10 cm	10.0
4	Base mesa ancho	baseMesaAncho	baseBandaAncho + (basePataBanda*4)	130.0
5	Base mesa largo	baseMesaLargo	70 cm	70.0
6	Base mesa alto	BaseMesaAlto	2 cm	2.0
7	Base pata ancho	basePataAncho	70 mm	70.0
8	Base pata largo	basePataLargo	150 mm	150.0
9	Base pata alto	BasePataAlto	10 mm	10.0
10	Pata ancho	pataAncho	mm	35.0
11	Pata largo	pataLargo	mm	100.0
12	Pata alto	PataAlto	cm	70.0
13	Plano mesa	planoMesa	PataAlto + BasePataAlto	101.0
14	base caja ancho	baseCajaAncho	baseMesaAncho - 10 cm	120.0
15	base caja largo	baseCajaLargo	baseMesaLargo - 2 cm	68.0
16	base caja grosor	baseCajaGrosor	2 cm	2.0
17	Base caja alto	BaseCajaAlto	60 cm	60.0
18	Pestaña Alto	PestanaAlto	BaseCajaAlto / 1.5	40.0
19	Pestaña Alto	baseRielAncho	4.5 cm	4.5
20	base Riel Largo	baseRielLargo	30 cm	30.0
21	base Riel Espesor	baseRielEspesor	1.3 cm	1.3
22	base Cámara Ancho	baseCamaraAncho	baseMesaAncho - 20 cm	110.0
23	base Cámara Largo	baseCamaraLargo	baseMesaLargo - 10 cm	60.0

981 . **Propuestas del diseño mecánico**

982           Para alimentar el sistema de clasificación se desarrollo un sistema mecáni-  
983 co que traslada las botellas por una banda transportadora. El diseño mecánico tuvo  
984 varias etapas la primera fue diseñar la mesa donde están colocadas los sensores,  
985 véase el anexo . La segunda sección fue diseñar la parte donde se instalo el FPGA y  
986 la cámara fotográfica con dos rieles que ayudan a subir y bajar para la experimenta-  
987 ción misma que ayuda a identificar la posición óptima de la cámara, véase el anexo  
988 . También se considero una tapa que cubriera de la luz lo más posible el sistema  
989 para evitar variaciones en las lecturas, véase el anexo .

990           En la segunda etapa se diseño el soporte de la banda, véase el anexo y  
991 sobre el soporte se coloco el sistema de identificación previamente mencionado. En  
992 el anexo se puede ver la longitud de la banda transportadora que fue hecha de  
993 PVC negra. Los rodillos, véase el anexo , se hicieron de tubo de PVC con una varilla  
994 enroscada de tres octavos de pulgada que atraviesa todo el tubo, para sujetar al  
995 tubo con la varilla se utilizo madera y ocho rodamientos.

996 . **Evidencia del diseño mecánico**

997           Esta primer propuesta se simulo para ver su viabilidad y proponer mejoras  
998 en el diseño. Para el diseño mecánico se coloco el FPGA sobre la banda transpor-  
999 tadora y un foco de 11 w para ver la calidad de las fotografías, véase la Figura  
1000 50.



Figura 50: Primer prueba con todo el sistema conectado.

1001                   Fotografías con la cámara y el FPGA proyectadas en una pantalla, véase la  
1002 **Figura 51.**



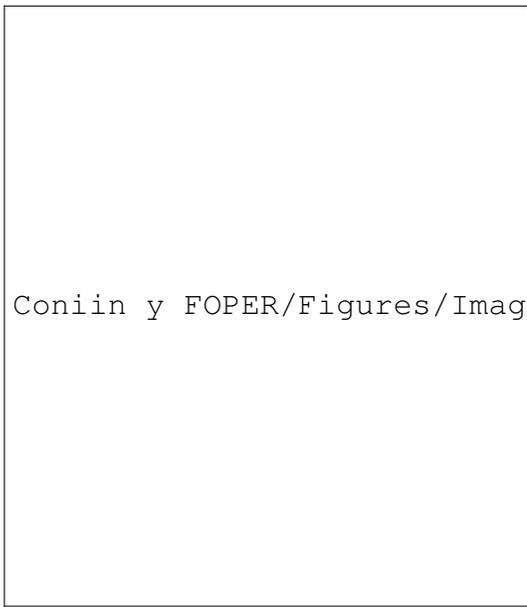
Figura 51: Fotografías con la cámara y el FPGA proyectadas en una pantalla.

1003                   Fotografías del sistema completo y como se ve en la pantalla de TV, véase  
1004 la Figura 52.

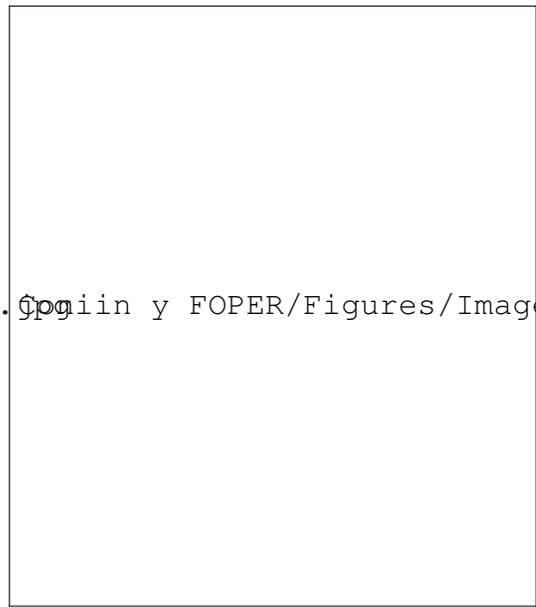


Figura 52: Panorama general, (Elaboración propia).

1005                   En las Figuras 53 y 54, se puede ver el diseño mecánico que se aplico para  
1006 este trabajo basado en los diseños previamente mencionados.

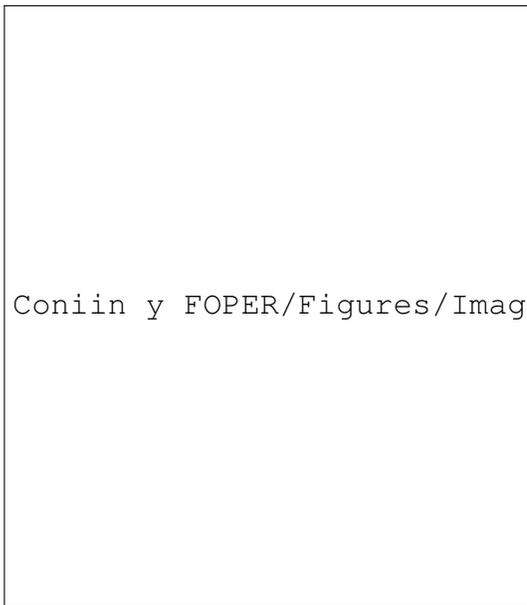


Coniin y FOPER/Figures/Imagen7.jpg

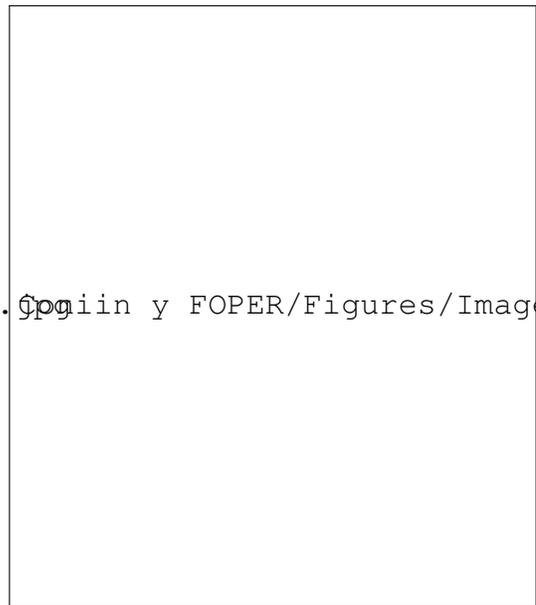


Coniin y FOPER/Figures/Imagen8.jpg

Figura 53: Diseño mecánico.



Coniin y FOPER/Figures/Imagen9.jpg



Coniin y FOPER/Figures/Imagen10.jpg

Figura 54: Diseño mecánico de otro ángulo.

1007 . **Diseño eléctrico del sistema de clasificación**

1008           En la Figura 55 se ilustra el moto reductor que se utilizo, con 1750 revolu-  
1009 ciones por minuto y con un reductor de cien a uno lo que equivale a dar dieciocho  
1010 vueltas en un minuto.



Figura 55: Moto-reductor en el sistema mecánico.

1011           En las Figuras 56, 58 y 57 se ilustra el procedimiento que se llevo para la  
1012 conexión y puesta en marcha del moto-reductor. Tiene cinco botones uno de paro de  
1013 emergencia. Dos de arranca de color verde uno para ir al frente y otro para reversa.  
1014 Dos botones de dos polos dos tiros para dar pulsos ya sea de frente o de reversa.



Figura 56: Pruebas de las conexiones en la etapa de potencia.



Figura 57: Conexión del moto-reductor al sistema de potencia.



Figura 58: Pruebas por separado de la banda transportadora.

#### 1015 . Programa de arranque de motores

1016 Para que la experimentación y la adquisición de todos los datos se desa-  
1017 rrollo una página web que junto con el servidor del PLC funcionan para activar y  
1018 desactivar los motores de la banda transportadora y del sistema de identificación.  
1019 Por recomendación del fabricante se recomienda utilizar el navegador web *Firefox*.  
1020 En la Tabla 27 se detallan los tipos de variables que se utilizaron para el motor 1 y  
1021 para el motor 2. Físicamente cada PLC tiene un numero limitado de entradas y eso  
1022 dificulta la automatización cuando se requieren de muchas entradas. La finalidad  
1023 principal de hacer una pagina web para controlar las entradas de los motores es  
1024 por las ventajas que proporciona al poder definir n cantidad de entradas y procesar  
1025 esa información internamente con el PLC. En la Tabla 28 se describen las catorce  
1026 entradas que utiliza el sistema mecánico para funcionar.

Tabla 27: motor\_ DB[DB1] y motor\_ DB\_Dos[DB3]

id	Nombre	Tipo de dato	Nombre	Tipo de dato
Entrada				
1	<i>reset</i>	<i>Bool</i>	<i>reset</i>	<i>Bool</i>
2	<i>start</i>	<i>Bool</i>	<i>start</i>	<i>Bool</i>
3	inicioAdelante	<i>Bool</i>	inicioAdelante	<i>Bool</i>
4	<i>stop</i>	<i>Bool</i>	<i>stop</i>	<i>Bool</i>
5	inicioAtras	<i>Bool</i>	inicioAtras	<i>Bool</i>
6	pasoAdelante	<i>Bool</i>	pasoAdelante	<i>Bool</i>
7	pasoAtras	<i>Bool</i>	pasoAtras	<i>Bool</i>
Salida				
8	adelante	<i>Bool</i>	adelante	<i>Bool</i>
9	atras	<i>Bool</i>	atras	<i>Bool</i>
10	Enable	<i>Bool</i>	Enable	<i>Bool</i>
Estática				
11	<i>R_Trig_reset</i>	<i>R_TRIG</i>	<i>R_Trig_reset</i>	<i>R_TRIG</i>
12	<i>Step</i>	<i>Array[0..2]</i>	<i>Step</i>	<i>Array[0..2]</i>
13	pulso	<i>Array[0..2]</i>	pulso	<i>Array[0..2]</i>

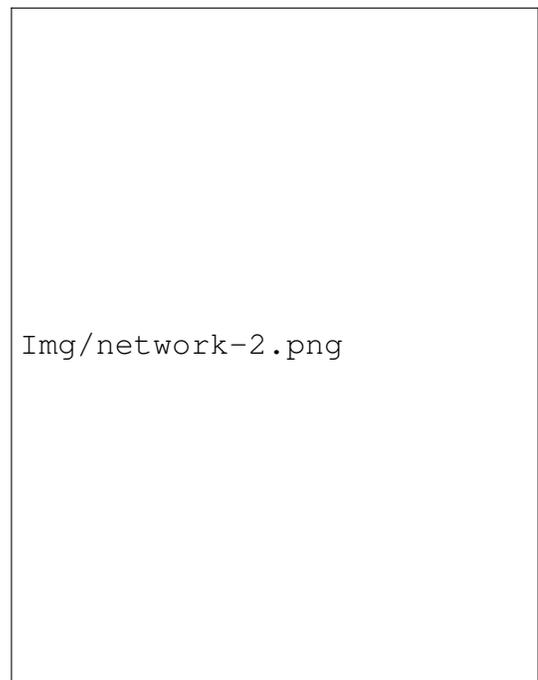
Tabla 28: *TestDB*[DB2]

id	Nombre	Tipo de dato
<i>Estática</i>		
1	<i>ResetWeb</i>	<i>Bool</i>
2	<i>StartWeb</i>	<i>Bool</i>
3	InicioAdelanteWeb	<i>Bool</i>
4	<i>StopWeb</i>	<i>Bool</i>
5	InicioAtrasWeb	<i>Bool</i>
6	pasoAdelanteWeb	<i>Bool</i>
7	pasoAtrasWeb	<i>Bool</i>
8	<i>ResetWeb_2</i>	<i>Bool</i>
9	<i>StartWeb_2</i>	<i>Bool</i>
10	InicioAdelanteWeb_2	<i>Bool</i>
11	<i>StopWeb_2</i>	<i>Bool</i>
12	InicioAtrasWeb_2	<i>Bool</i>
13	pasoAdelanteWeb_2	<i>Bool</i>
14	pasoAtrasWeb_2	<i>Bool</i>

1027                    En las siguientes Figuras 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66. se describen el  
1028 programa que se utilizo para controlar los motores.



(a) Red 1 del motor número uno.



(b) Red 2 del motor número dos.

Figura 59: Descripción los bloques de código que controlan los motores.

1029 La función de sistema WWW se llama en el OB1. Esta función inicializa  
1030 el servidor web de la CPU. La llamada cíclica de la función en el OB1 permite la  
1031 interacción entre el servidor web y el controlador. El Web DB (DB 333) está conec-  
1032 tado a la función WWW. La base de datos web y la base de datos de fragmentos  
1033 almacenan la estructura de las páginas definidas por el usuario, véase la Figura 60.



Figura 60: Red 3, Esta función de bloque inicializa el servidor web de la CPU.

1034           En la Figura 61 se describe la primer red del bloque de función que se  
1035   determino en el PLC. Consta de un disparador que se activa cuando el PLC hace  
1036   su primer escaneo del sistema y sirve para inicializar todas las redes del programa.

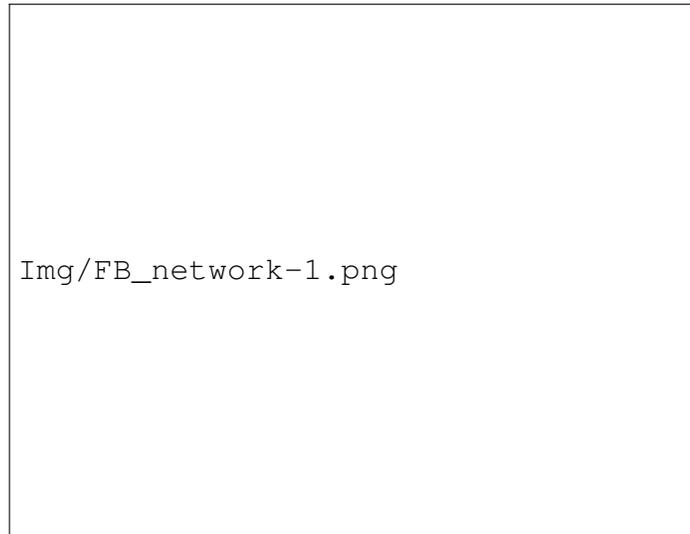
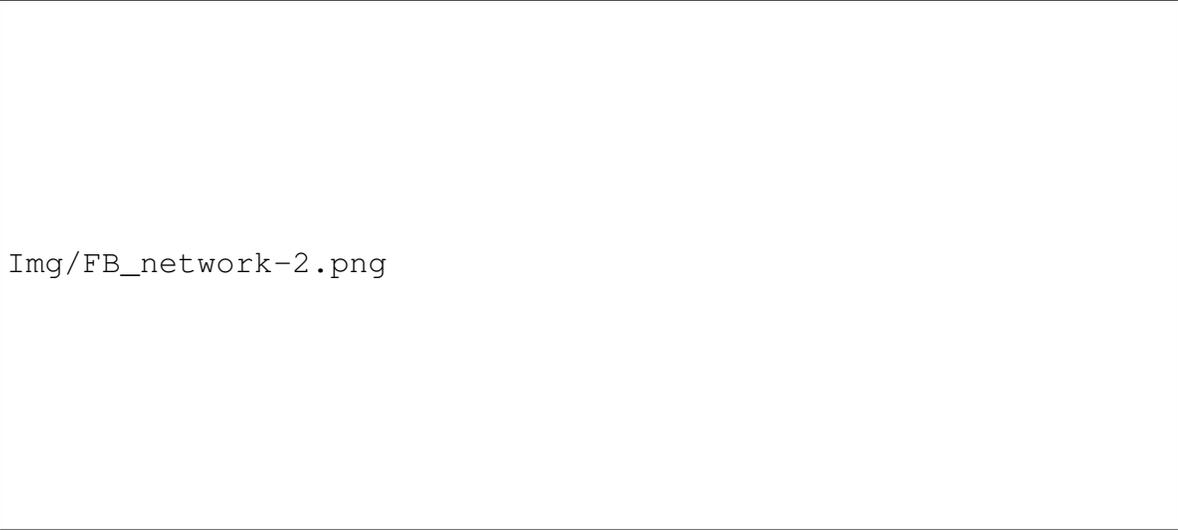


Figura 61: Red 1 del bloque de función del motor.

1037           En la Figura 62 se describe la acción que se toma una vez que se ejecuto  
1038   la red 1, la cual espera a que se active el paso cero con el botón de **star**.



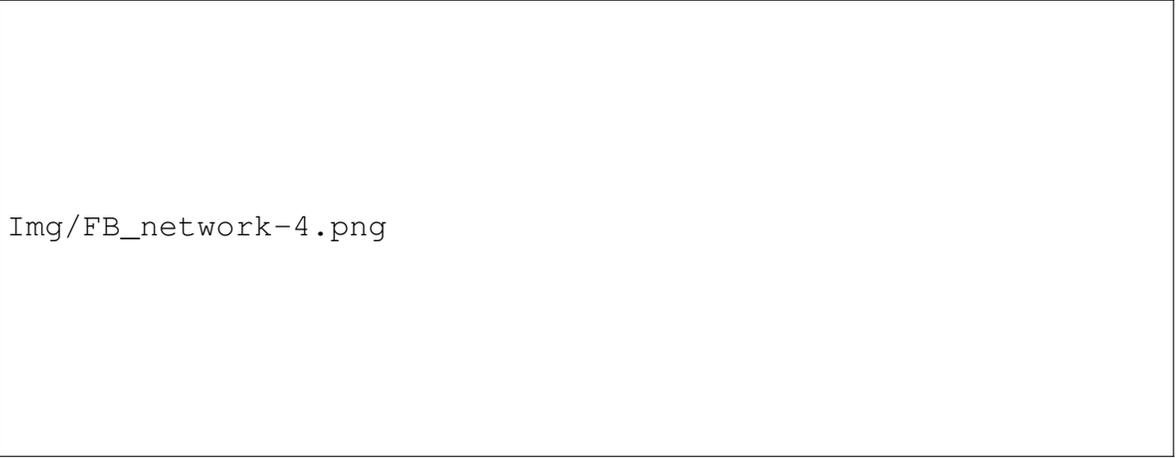
Img/FB\_network-2.png

Figura 62: Red 2 Acción paso cero si esta en alto indica que el motor esta listo para arrancar.



Img/FB\_network-3.png

Figura 63: Red 3 Transición del paso cero, la cual indica que si el botón de inicio esta activado todos los botones se habilitan para el accionamiento del motor.



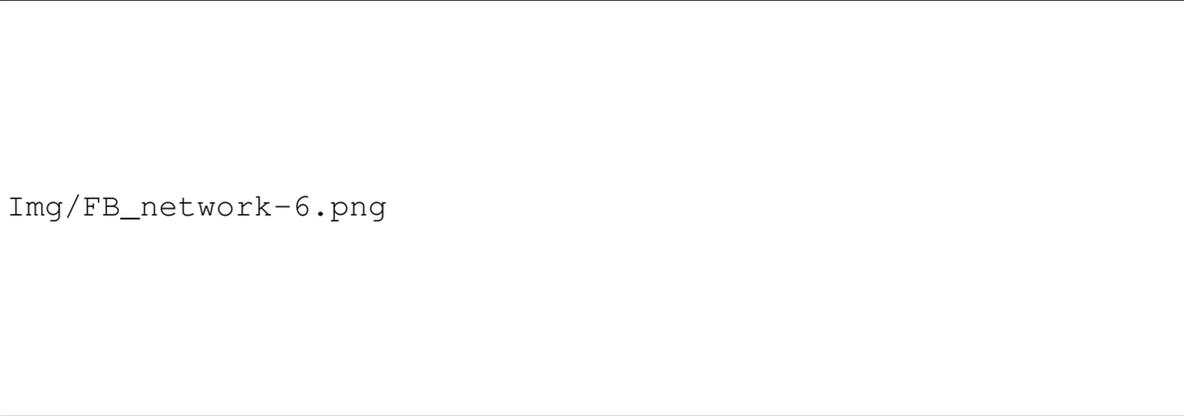
Img/FB\_network-4.png

Figura 64: Red 4 Acción paso uno, con dos botones se acciona el motor para adelante o para atrás.



Img/FB\_network-5.png

Figura 65: Red 5 Acción uno, con dos botones se puede activar el motor con pulsos.



Img/FB\_network-6.png

Figura 66: Red 6 Transición paso uno, con esta red se define un botón de paro total o mejor conocido como paro de emergencia.

## 1039 . **Interfaz web**

1040           Se desarrollo una página web con el PLC con las siguientes características,  
1041 véase 68:

- 1042       ■ Servidor web con el PLC para controlar la experimentación en la banda trans-  
1043       portadora, ver 67.
- 1044       ■ Se puede ver las diferentes valores que cambian en tiempo real, véase 69.
- 1045       ■ De manera completa con esta implementación se pueden conectar con la base  
1046       de datos del PLC y la FPGA, véase 70.



Img/webServer-0.JPG

Figura 67: Servidor web con el PLC para controlar la velocidad de la banda transportadora.



Img/paginaWebPLC.pdf

Figura 69: Página web para controlar los dos motores.



Img/webServer-1.JPG

Figura 68: Diagrama de bloques de la comunicación del servidor con el PLC.



Img/webServer-2.JPG

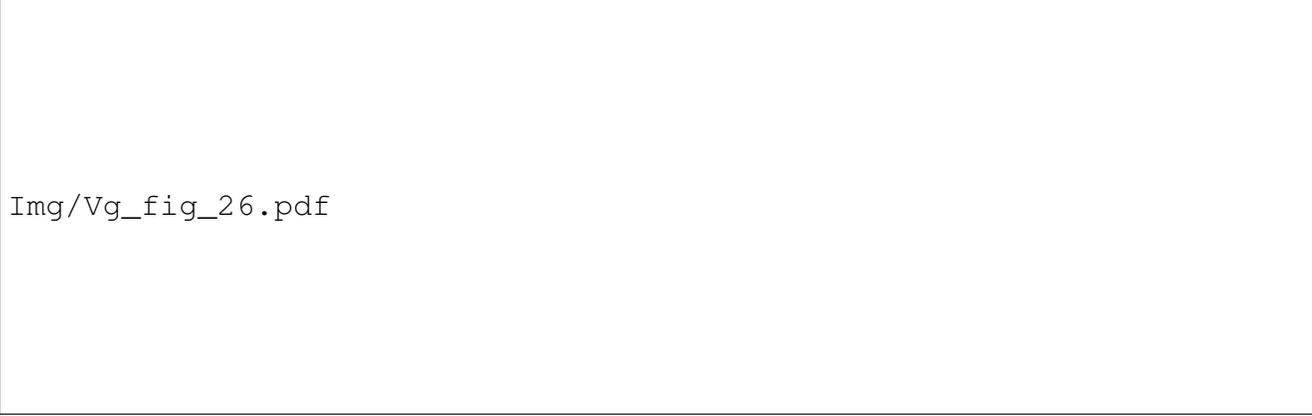
Figura 70: Página web para controlar los dos motores.

1047 . **Diseño del sistema de adquisición de imágenes**

1048 Con los resultados obtenidos se opto con trabajar con dos cámaras e iden-  
1049 tificar si afecta el ángulo en el que se va a tomar la fotografía y la posición de la  
1050 botella.

1051 . **Identificación para el tamaño y forma de la botella**

1052 Para identificar la deformación de la botella se utilizo la transformada de  
1053 *Hough* como entrada para SVM y se utilizo la ecuación (11). Conviene distinguir que  
1054 hasta este punto solamente se analizo la interacción de dos sensores y una cámara  
1055 fotográfica [Kumar, 2003, Ashwini S. Shinde, 2016]. Por lo que para poder llegar a  
1056 los objetivos y mantener la velocidad en la detección de tres botellas por segundo  
1057 se incrementara el número de sensores 71 lo que ocasionaría un aumento en la  
1058 incertidumbre [Prasad, 2012, Vijayarajeswari et al., 2019, Matos et al., 2019].



Img/Vg\_fig\_26.pdf

Figura 71: Cadena de medida para posibles fuentes de incertidumbre al aumentar el número de transductores (Elaboración propia).

1059 . **Desarrollo de espectrofotometría para identificar líquidos den-**  
1060 **tro de la botella**

1061 . **Magnitudes de influencia en la incertidumbre para la implementación del**  
1062 **luxómetro**

1063 Las magnitudes de influencia son las causas de la incertidumbre, también  
1064 son asociadas a las propiedades del instrumento de medición, como la propiedad  
1065 de la condición nominal de funcionamiento del instrumento, la estabilidad, la condi-  
1066 ción del límite de funcionamiento, la sensibilidad, resolución, la incertidumbre instru-  
1067 mental, el error máximo permitido, la exactitud, el sesgo instrumental, el tiempo de  
1068 respuesta a un escalón entre otras propiedades [IMNC, 2008]. Para ilustrar mejor  
1069 las magnitudes de influencia en el método del mensurando véase la Figura 72. En  
1070 el diagrama de árbol se representa la depuración de las posibles interacciones y  
1071 relaciones entre las variables de influencia de variación. Véase Figura 73, donde se  
1072 representan las principales fuentes de incertidumbre.

Medición del voltaje y la resistencia eléctrica para estimar la corriente eléctrica

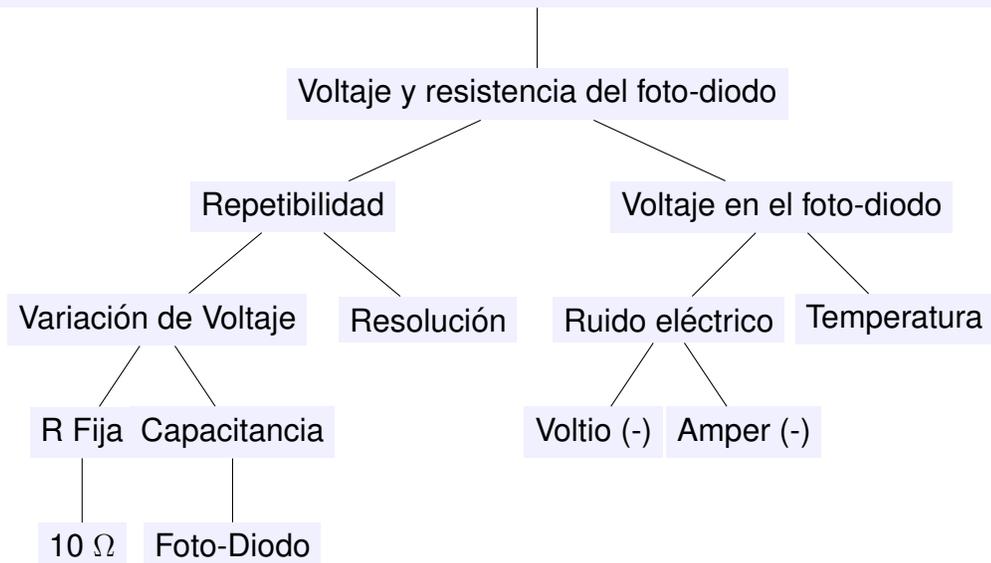


Figura 72: Diagrama de árbol que muestra las interacciones en el método del mensurando



Figura 73: Diagrama del principio de causalidad donde se consideran las variables de influencia y magnitudes de entrada del proceso de medición.

1073 . **Desarrollo del luxómetro y del sistema de identificación de líquidos**

1074 Se desarrolló un sistema que trabaja en el espectro visible. Al medir la in-  
1075 tensidad luminosa, es posible identificar si el líquido está dentro de la botella de  
1076 plástico. En esta etapa, se desarrolló un luxómetro para ser activado al identificar  
1077 una botella sin deformación. Ver Figura 74. La activación se realizó manualmente.



Figura 74: Diagrama de bloques del sistema de adquisición de datos del medidor de lux.

1078 Se utilizó espectroscopia infrarroja para detectar la absorción de diferentes  
1079 longitudes de onda de luz en PET y etiquetas. En la primera etapa de esta confi-  
1080 guración se trabajó con un fotodiodo infrarrojo que detecta longitudes de onda en  
1081 el rango de 800 nm y 1100 nm, apto para diferenciar entre PET transparente y co-  
1082 loreado y etiquetas con diferentes tamaños y colores. Se instaló una fuente de luz  
1083 para ayudar al sensor a detectar mejor el tipo de plástico y obtener los datos. Con  
1084 los resultados de los tres DOE y con evidencia estadística se diseñó el rango de  
1085 trabajo para condiciones óptimas de operación y detección de longitudes de onda  
1086 [T Huth-Fehre, 1995, S.M. et al., 2010].

1087 . **Funciones para estimar la iluminancia en el sensor**

1088 Se estimó el valor del mensurando, se aplicó la ley de Ohm. Ver Ecuación (12), y se calcularon 18 ecuaciones lineales para obtener la resistencia eléctrica

1090 en todo el rango de trabajo del fotodiodo. Ver Figura 75.

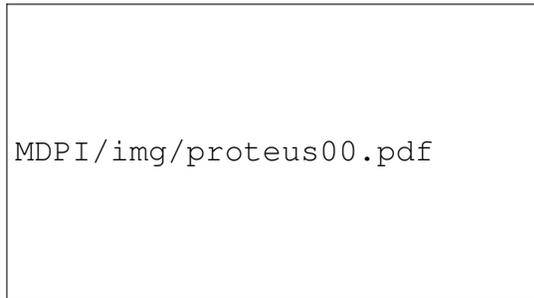


Figura 75: Circuito del sistema de lectura de datos del sensor.

1091 La señal de entrada al microcontrolador no se amplificó porque las lectu-  
1092 ras eran consistentes. Se estimó la resistencia variable del fotodiodo y con ella se  
1093 calculó la corriente del circuito para evaluar la iluminancia.

$$I = \frac{V}{R} = \frac{\text{Voltage}}{\text{Resistance}_{\text{variable}} + \text{Resistance}_{\text{fixed}}} \quad (12)$$

1094 Se tomaron los primeros nueve puntos de la Tabla 29 para obtener las ecuaciones  
1095 que describen el fotodiodo, luego se aplicó la interpolación de Newton y se despeja-  
1096 ron las variables.

Tabla 29: Datos para obtener las ecuaciones de funcionamiento del fotodiodo.

No.	EA-Iluminancia (lx)	IK-Corriente de cortocircuito (mA)
1	0.01	0.0001
2	0.1	0.00086
3	1	0.0092696
4	10	0.09172
5	100	0.967639
6	1000	9.712874
7	10000	96.64246
8	100000	972.178
9	912669	1000

1097 Se estimaron los intervalos de trabajo y se determinó una función usando la  
1098 corriente en el circuito. Los resultados son los siguientes: Desde 0 lux hasta menos

1099 de 89 lux, tenemos las siguientes Ecuaciones (13)-(15).

$$lux = 45 - 5\sqrt{69 - 200I} \quad (13)$$

1100

$$lux = \frac{10}{11}(100I + 3) \quad (14)$$

1101

$$lux = 175 - 5\sqrt{1041 - 800I} \quad (15)$$

1102 Ecuación (16) de 90 a 200 lux

$$lux = 0.151515(100000495 - \sqrt{10000105600001089 - 1320000000000I}) \quad (16)$$

1103 Ecuación (17) de 200 a 400 lux

$$lux = \frac{(5(21909103 - \sqrt{374223401867769.0 - 1454548000000000I}))}{363637} \quad (17)$$

1104 Ecuación (18) de 400 a 600 lux

$$lux = \frac{(50(\sqrt{240.0I - 359.0} - 1.0))}{3} \quad (18)$$

1105 Ecuación (19) de 600 a 800 lux

$$lux = 50\sqrt{80I + 113} - 650 \quad (19)$$

1106 Ecuación (20) de 800 a 1000 lux

$$lux = 1750 - 50\sqrt{1041 - 80I} \quad (20)$$

1107 Ecuación (21) de 1000 a 3000 lux

$$lux = 50\sqrt{16I - 127.0} + 650 \quad (21)$$

1108 Ecuación (22) de 3000 a 5000 lux

$$lux = \frac{(500(31 - \sqrt{889 - 24I}))}{3} \quad (22)$$

1109 Ecuación (23) de 5000 a 7000 lux

$$lux = \frac{(1000(I + 3))}{11} \quad (23)$$

1110 Ecuación (24) de 7000 a 9000 lux

$$lux = 17500 - 500\sqrt{1041 - 8I} \quad (24)$$

1111 Ecuación (25) de 7000 a 20000 lux

$$lux = 100(I - 5) \quad (25)$$

1112 Ecuación (26) de 20000 a 40000 lux

$$lux = \frac{(500(1825757 - \sqrt{2598770771809 - 10101000000I}))}{30303} \quad (26)$$

1113 Ecuación (27) de 40000 a 60000 lux

$$lux = \frac{(1000\sqrt{5}(\sqrt{12I - 1795} - \sqrt{5}))}{3} \quad (27)$$

1114 Ecuación (28) de 60000 a 80000 lux

$$lux = 1000\sqrt{5}\sqrt{4I + 565} - 65000 \quad (28)$$

1115 Ecuación (29) de 80000 a 100000 lux

$$lux = 175000 - 1000\sqrt{5}\sqrt{5205 - 4I} \quad (29)$$

1116 Ecuación (30) mas grande que 100,000 lux

$$lux = 1000\sqrt{4I - 3175} + 65000 \quad (30)$$

## 1117 . **Luxómetro**

1118 Las ecuaciones anteriores están programadas en un microcontrolador y  
1119 una PCB diseñada para su implementación en la cinta transportadora. La cinta  
1120 transportadora fue diseñada para que el sistema analizara tres botellas por segun-  
1121 do. Puede avanzar y retroceder y ser controlado por pulsos a través de una interfaz  
1122 de controlador lógico programable (PLC) con una página web. El diseño del medi-  
1123 dor de lux puede enviar la información a través del puerto USB y los datos pueden

1124 procesarse para identificar líquidos dentro de las botellas. La Figura 76 muestra las  
1125 conexiones para la implementación y adquisición de los datos.



Figura 76: Diagrama de circuito y adquisición de datos.

1126 La Figura 77, muestra la cinta transportadora donde se instaló el luxómetro  
1127 comercial y el luxómetro propuesto. Para detectar las botellas, la cinta transporta-  
1128 dora arranca y se detiene en función de la botella cuando pasa en su totalidad por  
1129 el luxómetro. Los resultados coinciden con la experimentación ya mencionada ante-  
1130 riormente.



Figura 77: Banda transportadora.

1131           En [Ángeles Hurtado et al., 2023], en los anexos se muestra el código utili-  
1132 zado para programar el luxómetro digital.

1133 . **Estimación del modelo del mensurando para cuantificar la incertidumbre**  
1134 **del luxómetro**

1135           Para estimar y determinar el mejor valor del mensurando al utilizar la ley de  
1136 Ohm se estimaron 18 ecuaciones lineales para obtener la resistencia eléctrica en  
1137 todo el rango de trabajo del foto-diodo.

1138 . **Cuantificación de las magnitudes de influencia en el estudio de la incerti-**  
1139 **dumbre**

1140 Para cuantificar las magnitudes de influencia y su dispersión se estimó y se  
1141 gráfico los posibles resultados del espacio muestral véase Figura 78.

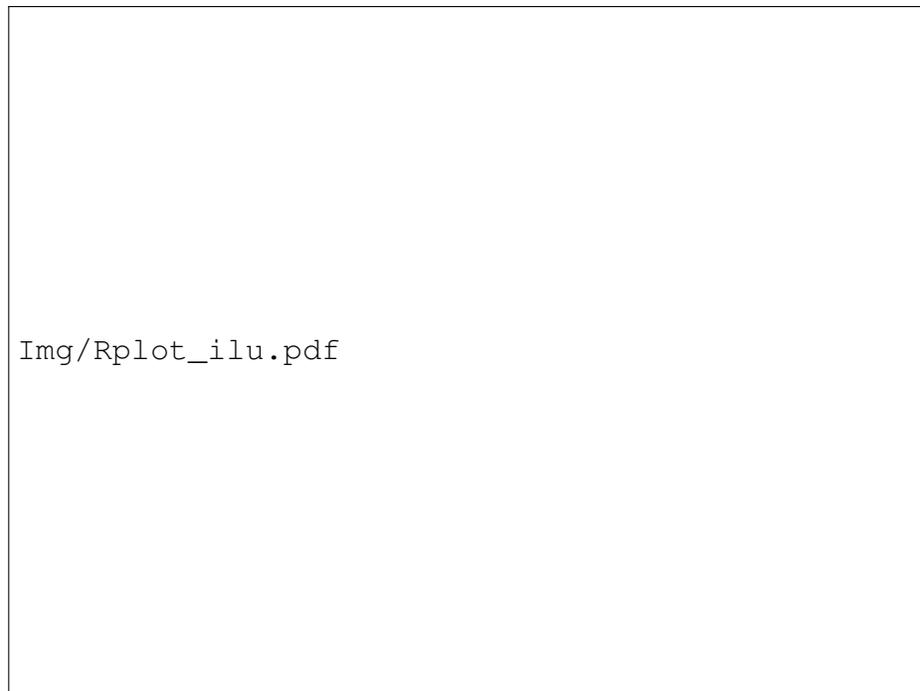


Figura 78: Determinación de la Iluminancia por electro voltio.

1142 Con los datos simulados y con las ecuaciones del modelo físico se puede  
1143 determinar que el sistema presenta variación. Para el método de evaluación se con-  
1144 sidero el tipo B con las hojas de datos del sensor (véase Tabla 30) se obtuvieron  
1145 los valores nominales de las fuentes de variación por lo que se considera que tie-  
1146 nen las mismas probabilidades de que ocurran en el rango de variación que puedan  
1147 presentar como lo ilustra la Figura 79. Los valores de la incertidumbre estándar se  
1148 considera una función de densidad de probabilidad uniforme para la fuente de vol-  
1149 taje, resolución del micro controlador con un ADC de ocho bits, la resistencia fija,  
1150 capacitancia del foto-diodo a cinco voltios. Para la detección de líquidos dentro de

1151 las botellas se considera una incertidumbre requerida de  $\pm 10$  lux.

Tabla 30: Cuantificación y asignación de valores a la variabilidad de cada fuente de incertidumbre [Semiconductors, 2006].

Fuente de Incertidumbre	Incertidumbre estándar	
Fuente de voltaje	5 V	
Resistencia fija	$\pm 5\%$	$I = \frac{V}{R}$
Capacitancia	400 pF	
Resolución	10 mV	Calibración

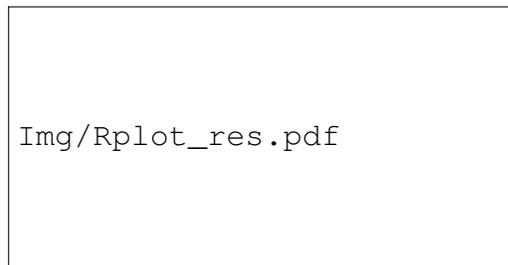


Figura 79: Distribución uniforme para la resolución de la conversión de analógico a digital.



Figura 80: Diagrama de flujo con posibles fuentes de incertidumbre (Elaboración propia).

La incertidumbre estándar combinada depende de la estimación de cada fuente. Para estimar los coeficientes de sensibilidad y estimar la contribución de

cada fuente se considero como una incertidumbre no-correlacionada; se pueden ver representados en la Tabla 31. Por la ley de propagación de incertidumbres para incertidumbres no correlacionada al medir una magnitud física a través de la medida de otras. Para calcular la desviación estándar de la medida buscada se plantea hacer como se indica a continuación. Donde:  $u_V$  es la incertidumbre estándar del mensurando,  $u(V_i)$  incertidumbre estándar de la magnitud de entrada y  $\frac{\partial I}{\partial V}$  es el coeficiente de sensibilidad de la magnitud de influencia.

$$u_V = \sqrt{\sum_i \left[ \frac{\partial I}{\partial V} u(V_i) \right]^2}$$

1152

Tabla 31: Contribución de las fuentes de incertidumbre

Fuente de Incertidumbre	Coeficiente de sensibilidad	Contribución
Fuente de voltaje	$u_f(I) = c_f u_{cal}(f)$	10 mV
Resistencia fija	$u_R(I) = c_{Rf} u_R(R)$	5%
Capacitancia	$u_C(I) = c_{volt} u_C(C)$	
Resolución ADC	$u_{res}(I) = c_f u_{res}(f)$	

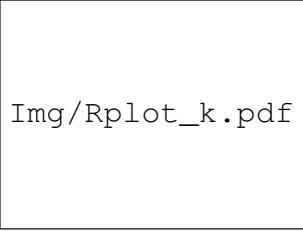
En la siguiente ecuación se representa la incertidumbre estándar combinada como contribuciones a la incertidumbre del mensurando.

$$u_T(I) = \sqrt{u_f(I)^2 + u_R(I)^2 + u_C(I)^2 + u_{res}(I)^2} = 0.1$$

Por el Teorema del Límite Central: La distribución del mensurando Y es aproximadamente normal, si las contribuciones  $X_i$  son independientes o no correlacionadas y la varianza  $s^2(Y)$  es mucho más grande que cualquier componente individual  $c_i^2 s^2(X_i)$  cuya distribución no sea normal. La incertidumbre expandida se determina el intervalo que abarca el valor del mensurando con un cierto nivel de confianza, k se define como el valor de confianza.

$$U = k \cdot u_c$$

1153



Img/Rplot\_k.pdf

Figura 81: Intervalo de confianza para estimar la incertidumbre expandida con un coeficiente  $k$ .

Resultado de la medición: " $Y$ " como mensurando " $y$ " mejor estimado del mensurando, " $U$ " como la incertidumbre.

$$Y = y \pm U; \text{con}(1 \leq k \leq 3)$$

1154 . **Diseño del sistema de acondicionamiento de señal para el di-**  
1155 **odo de InGaAs**

1156 . **Definición del mensurando para la medición de la longitud de onda en el**  
1157 **diodo InGaAs**

1158 Dado que se trabajo con un diodo de InGaAs requiere de un sistema que  
1159 le permita al controlador interpretar los datos provenientes del diodo de una manera  
1160 más sencilla y exacta con el fin de obtener una mayor precisión en la clasificación  
1161 del PET. Para esto se estudiaron las propiedades del diodo, el tipo de salida que  
1162 envía al realizar una medición y su comportamiento con diferentes elementos como  
1163 amplificadores operacionales, filtros y en función de ello se eligieron los componen-  
1164 tes para las etapas de amplificación y filtrado de la señal de salida del sensor. Así  
1165 mismo, se considero el tipo de conectores y elementos necesarios para realizar la  
1166 etapa de potencia ideal para que el sistema de clasificación funcione correctamente  
1167 manteniendo la seguridad. Para la medición de la longitud de onda se considero al  
1168 mensurando como la corriente eléctrica que pasa por un foto-diodo de InGaAs, la  
1169 medición es de manera indirecta debido a las propiedades del sensor que al variar

1170 la iluminancia que pasa por el polímero se refleja y cambia la longitud de onda en el  
1171 foto-diodo y su resistencia cambia. Como premisa en esta etapa se inicio a trabajar  
1172 con la resistencia del foto-diodo debido al cambio de iluminancia que afecta el V  
1173 inducido, por lo que la I cambiará, dependiendo de esta variación y a través de esta  
1174 se puede calcular la longitud de onda. Como se busca que la relación entre V e I sea  
1175 lineal, utilizaremos métodos numéricos como la interpolación de newton para que el  
1176 sistema sea lo más lineal posible así como elementos pasivos electrónicos.

#### 1177 . **Comprobación del comportamiento del diodo InGaAs con los distintos ele-** 1178 **mentos eléctricos y electrónicos del sistema**

1179 De manera general en esta etapa se evaluó el sistema de medición de la  
1180 tarjeta electrónica y la adquisición de los datos mediante el ADC. Tanto el PLC,  
1181 FPGA y un micro controlador se consideraron como el controlador para ejecutar  
1182 todas las tareas que el sistema de clasificación requiera.

#### 1183 . **Configuración del sistema por espectroscopia para la identificación y clasi-** 1184 **ficación del PET**

1185 Se trabajo con espectroscopia IR para detectar la absorción de las dife-  
1186 rentes longitudes de onda de luz en el PET, ver Figura 82. En la primera etapa  
1187 de esta configuración se trabajo con dos sensores infrarrojos que detecten longi-  
1188 tudes de onda en el rango de 800 nm y 1100 nm adecuado para diferenciar en-  
1189 tre el PET transparente y el de color verde. Para la obtención de los datos se  
1190 instalo una luz estrobo que pretende ayudar a que el sensor pueda detectar de  
1191 una mejor manera el tipo de plástico. Se planearon y se realizaron un conjunto  
1192 de pruebas con el objetivo de generar datos que proporcionaron evidencias obje-  
1193 tivas sobre las condiciones óptimas del funcionamiento y detección de las longi-  
1194 tudes de onda. Como factor se considero la distancia de la luz estrobo con res-  
1195 pecto al PET y el foto-diodo. El segundo factor es la cantidad de luz estrobo, es-

1196 te factor se puede controlar incrementando el número de diodos emisores de luz  
1197 [T Huth-Fehre, 1995, S.M. et al., 2010, Rani et al., 2019].

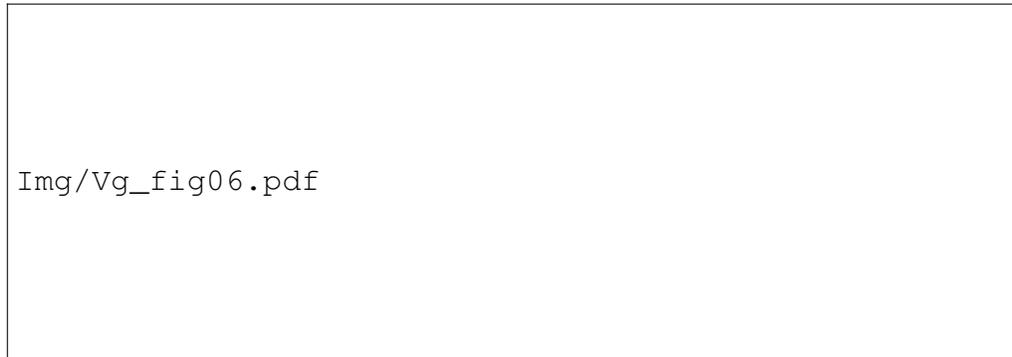


Figura 82: Sistema de discriminación por medio de la detección de PET por su longitud de onda.

## 1198 . **Desarrollo de la experimentación**

### 1199 . **Diseño de experimentos para determinar la distancia y rango de trabajo del** 1200 **luxómetro**

1201 Se desarrolló el diseño del experimento con tres distancias diferentes con  
1202 velocidad cero sobre la cinta transportadora. Los experimentos de diseño se rea-  
1203 lizaron con un luxómetro comercial para identificar la distancia que debe tener el  
1204 luxómetro e identificar líquidos dentro de las botellas.

- 1205 ■ A: Distancia del luxómetro a la banda transportadora (20, 25, 30 centímetros).
- 1206 ■ B: Tamaño de la botella (200, 300, 355, 500, 600, 1000, 1500, 2000, 3000  
1207 mililitros).

1208 Las condiciones iniciales para iniciar el experimento fueron tomar la lectura del  
1209 luxómetro cuando la fuente de luz estaba apagada, y las lecturas fueron de 0.3 – 0.4  
1210 lux. Posteriormente, se encendió la fuente de luz, y la luz reflejada por la cinta trans-  
1211 portadora fue de entre 13,8 – 14,5 lux. Para que en este experimento se consideren

1212 réplicas y no repeticiones, se desarrollaron en diferentes momentos y en otros días.  
1213 La implementación del DOE se muestra en la Tabla 32, y los resultados están en  
1214 Tabla 33. En [Escalante Vázquez, 2007] menciona que para el caso de dos factores,  
1215 el tamaño mínimo de muestra debe ser  $N = a + b + (a - 1)(b - 1) + 24$ . Véase la  
1216 Ecuación (31)

$$N = a + b + (a - 1)(b - 1) + 24 = 3 + 9 + (3 - 1)(9 - 1) + 24 = 52 \quad (31)$$

1217 El número de réplicas por celda es  $N/ab$ , donde  $a$  y  $b$  son, respectivamente, el número  
1218 de niveles de los factores  $A$  y  $B$ . Para este diseño, se considera que  $N$  es 54.

$$n = N/ab = 54/(3)(9) = 2. \quad (32)$$

Tabla 32: Información del primer ANOVA de dos factores.

Tamaño de la botella (mL) (B)	Distancia del luxómetro lux (cm) (A)			Suma
	15	20	25	
200	13.4	14.9	16.5	88
	12.7	14.5	16	
Suma	26.1	29.4	32.5	
300	12.4	14.4	16.7	85.9
	13.1	12.7	16.6	
Suma	25.5	27.1	33.3	
355	13	15.2	16.2	89.4
	13.9	14.9	16.2	
Suma	26.9	30.1	32.4	
500	13.6	13.9	14.8	84.2
	13.3	13.6	15	
Suma	26.9	27.5	29.8	
600	12.5	13.9	15	82.6
	13.1	12.7	15.4	
Suma	25.6	26.6	30.4	
1000	13.9	14	15.1	85.8
	13.1	14.7	15	
Suma	27	28.7	30.1	
1350	15.6	15.2	16.4	92.6
	13.4	16.5	15.5	
Suma	29	31.7	31.9	
2000	10.7	16.8	14.3	83.2
	9	17.5	14.9	
Suma	19.7	34.3	29.2	
3000	5.2	19.3	17	79.9
	3.9	18.5	16	
Suma	9.1	37.8	33	
Suma Total	215.8	273.2	282.6	771.6

1219

1220

La siguiente Ecuación (33) a (37) muestra la elaboración del ANOVA de dos factores. La suma de cuadrados y grados de libertad se calculó de la siguiente

1221 manera.

$$SST = \sum \sum y_{ij}^2 - \frac{(\sum \sum y_{ij})^2}{N} = (13.4)^2 + \dots + (16)^2 - \frac{771.6}{54} = 371.0533 \quad (33)$$

$$SSA = \frac{\sum TotalSum_i^2}{bn} - \frac{(\sum \sum y_{ij})^2}{N} = \frac{(215.8)^2 + (273.2)^2 + (282.6)^2}{18} - \frac{(771.6)^2}{54} = 145.2 \quad (34)$$

$$SSB = \frac{\sum TotalSum_j^2}{an} - \frac{(\sum \sum y_{ij})^2}{N} = \frac{(88)^2 + \dots + (79.9)^2}{6} - \frac{(771.6)^2}{54} = 19.73 \quad (35)$$

$$SSAB = \frac{\sum Sum_{ij}^2}{2} - \frac{(\sum \sum y_{ij})^2}{N} - SSA - SSB = 194.5 \quad (36)$$

$$SSE = SST - SSA - SSB - SSAB = 371.0533 - 145.2844 - 19.73 - 194.5788 = 11.46 \quad (37)$$

1222

Tabla 33: ANOVA del primer experimento.

Fuente	SS	gl	MS	F
Distancia (A)	145.2844	2	72.6422	259.8892*
Botella (B)	19.73	8	2.4662	8.8234*
AB	194.5788	2	97.2894	348.0686*
Error	11.46	41	0.2795	
Total	371.0533	53		

Con el ANOVA buscamos saber si los factores son significativos y si hay interacción. La interacción se define como una relación de dependencia entre el valor de la respuesta y los niveles de dos o más variables. Los gráficos de respuesta

se presentan en la Figura 83. Sus cálculos son:

$$\begin{array}{lll}
 \bar{Y}_{A1} = \frac{215.8}{18} = 11.98 & \bar{Y}_{A2} = \frac{273.2}{18} = 15.17 & \bar{Y}_{A3} = \frac{282.6}{18} = 15.7 \\
 \bar{Y}_{B1} = \frac{88}{6} = 14.66 & \bar{Y}_{B2} = \frac{85.9}{6} = 14.31 & \bar{Y}_{B3} = \frac{89.4}{6} = 14.9 \\
 \bar{Y}_{B4} = \frac{84.2}{6} = 14.03 & \bar{Y}_{B5} = \frac{82.6}{6} = 13.76 & \bar{Y}_{B6} = \frac{85.8}{6} = 14.3 \\
 \bar{Y}_{B7} = \frac{92.6}{6} = 15.43 & \bar{Y}_{B8} = \frac{83.2}{6} = 13.86 & \bar{Y}_{B9} = \frac{79.9}{6} = 13.31 \\
 \bar{Y}_{A1B1} = \frac{26.1}{2} = 13.05 & \bar{Y}_{A1B2} = \frac{25.5}{2} = 12.75 & \bar{Y}_{A1B3} = \frac{26.9}{2} = 13.45 \\
 \bar{Y}_{A1B4} = \frac{26.9}{2} = 13.45 & \bar{Y}_{A1B5} = \frac{25.6}{2} = 12.8 & \bar{Y}_{A1B6} = \frac{27}{2} = 13.5 \\
 \bar{Y}_{A1B7} = \frac{29}{2} = 14.5 & \bar{Y}_{A1B8} = \frac{19.7}{2} = 9.85 & \bar{Y}_{A1B9} = \frac{9.1}{2} = 4.55 \\
 \bar{Y}_{A2B1} = \frac{29.4}{2} = 14.7 & \bar{Y}_{A2B2} = \frac{27.1}{2} = 13.55 & \bar{Y}_{A2B3} = \frac{30.1}{2} = 15.05 \\
 \bar{Y}_{A2B4} = \frac{27.5}{2} = 13.75 & \bar{Y}_{A2B5} = \frac{26.6}{2} = 13.3 & \bar{Y}_{A2B6} = \frac{28.7}{2} = 14.35 \\
 \bar{Y}_{A2B7} = \frac{31.7}{2} = 15.85 & \bar{Y}_{A2B8} = \frac{34.3}{2} = 17.15 & \bar{Y}_{A2B9} = \frac{37.8}{2} = 18.9 \\
 \bar{Y}_{A3B1} = \frac{32.5}{2} = 16.25 & \bar{Y}_{A3B2} = \frac{33.3}{2} = 16.65 & \bar{Y}_{A3B3} = \frac{32.4}{2} = 16.2 \\
 \bar{Y}_{A3B4} = \frac{29.8}{2} = 14.9 & \bar{Y}_{A3B5} = \frac{30.4}{2} = 15.2 & \bar{Y}_{A3B6} = \frac{30.1}{2} = 15.05 \\
 \bar{Y}_{A3B7} = \frac{31.9}{2} = 15.95 & \bar{Y}_{A3B8} = \frac{29.2}{2} = 14.6 & \bar{Y}_{A3B9} = \frac{33}{2} = 16.5
 \end{array}$$

1223 A una distancia más cercana, las botellas de mayor capacidad reflejan menos y,  
 1224 a una distancia mayor, la reflectancia parece mantenerse entre 14.7 – 16.5 lux. Al  
 1225 comparar las condiciones iniciales cuando no hay botella en la cinta transportadora,  
 1226 el rango está entre 13.8–14.5. Por lo tanto, indica que la iluminancia aumenta cuando  
 1227 una botella con líquido está entre 0.9 – 2 lux.



Figura 83: Gráfico de respuesta con la interacción de los factores A y B.

1228           Con los datos obtenidos se determinó la distancia significativa para obtener  
1229 la iluminancia. La Figura 84 muestra la distancia óptima entre la cinta transportadora  
1230 y entre la fuente de luz y la cinta transportadora.

Img/Vg\_Fig\_13\_b.pdf

Figura 84: Sistema de discriminación por detección de líquidos.

1231 . **Diseño de experimentos para identificar la cantidad mínima de líquidos den-**  
1232 **tro de la botella**

1233 Las condiciones iniciales para iniciar el experimento fueron tomar la lectura  
1234 del luxómetro cuando la fuente de luz estaba apagada, y las lecturas estaban entre  
1235 0.7 – 0.8 lux. Con la fuente de luz encendida, el reflejo está entre 15.6 – 17.8 lux.  
1236 Se desarrollaron en diferentes momentos y en otros días para que se consideraran  
1237 réplicas y no repeticiones en este experimento. Se limpió la cinta transportadora, lo  
1238 que provocó un aumento de la reflectancia. Véase la Tabla 34 y la Tabla 35.

- 1239 ■ A: Porcentaje de líquidos en la botella (50, 25, 0 %).
- 1240 ■ B: Tamaño de la botella (200, 300, 355, 500, 600, 1000, 1500, 2000, 3000  
1241 mililitros).

Tabla 34: Información del segundo ANOVA de dos vías.

Tamaño de botella (mL) (B)	Líquido (%) en la botella (A)			Suma
	50	25	0	
200	13.3	14.3	15	85.5
	14.4	13.3	15.2	
Suma	27.7	27.6	30.2	
300	14.7	14.8	15	88.7
	14.5	14.4	15.3	
Suma	29.2	29.2	30.3	
355	16.5	16.3	15.5	94.2
	14.7	15.2	16	
Suma	31.2	31.5	31.5	
500	14.5	14.5	14.5	87
	14	14.1	15.4	
Suma	28.5	28.6	29.9	
600	15.1	14	14	86.1
	14.3	13.7	15	
Suma	29.4	27.7	29	
1000	12.2	14.2	13.5	82.6
	13.9	13.6	15.2	
Suma	26.1	27.8	28.7	
1350	14.5	14.4	13.4	84.1
	13.4	13.4	15	
Suma	27.9	27.8	28.4	
2000	15.1	13.7	13.4	85.3
	13.8	13.3	16	
Suma	28.9	27	29.4	
3000	15.2	13.2	12.2	82.3
	13.7	12.7	15.3	
Suma	28.9	25.9	27.5	
Suma Total	257.8	253.1	264.9	775.8

Tabla 35: Resultados del ANOVA del segundo experimento.

Fuente	SS	gl	MS	F
Líquido (%) (A)	3.921	2	1.9605	3.8442*
Botella (B)	17.4633	8	2.1829	4.2802*
AB	5.7855	2	2.8927	5.6721*
Error	20.91	41	0.51	
Total	48.08	53		

1242 La Figura 85 muestra una interacción entre los factores. Describe que cuando hay  
 1243 menos cantidad de líquido dentro de la botella, la cantidad de iluminancia aumenta  
 1244 dependiendo del tamaño de la botella. Esto significa que el rango de operación está  
 1245 entre 13.75 – 15.75 lux y que la variación de iluminancia está entre 1.85 – 2.05 lux.



Figura 85: Gráfico de respuesta con la interacción del segundo experimento.

1246 . **Diseño de experimentos para determinar la iluminancia en las etiquetas**

1247 En el tercer DOE, la etiqueta de cada botella no es uniforme, por lo que  
1248 dependiendo de su posición daría una lectura diferente, ver Tabla 36.

Tabla 36: Resultados diseño de experimentos para identificar la variabilidad con las etiquetas.

Tamaño de botella	Replicas						Suma	$y$	$s^2$
	1	2	3	4	5	6			
3000	30.00	28.10	25.20	24.10	26.00	29.80	163.20	27.20	6.092
2000	26.5	26.4	24.5	23.4	22.1	21.6	144.5	24.08	4.38
1350	22	26.7	25.7	25.8	27	28.4	155.6	25.93	4.67
1000	20.8	21.1	21.3	20.3	19.8	19.4	122.7	20.45	0.563
600	18.2	18.4	18.2	18.5	18.3	18.3	109.9	18.32	0.013
500	18.2	18.5	18.9	19.1	19	18.8	112.5	18.75	0.115
355	18.4	18.5	18.5	19.1	18.3	18	110.8	18.47	0.13
300	18	17.5	17.8	17.5	18.2	17.9	106.9	17.82	0.07
250	17.9	18.1	17.9	18.4	18.5	17.9	108.7	18.12	0.073
200	16.6	17.8	17.3	17.8	17.9	18	105.4	17.57	0.282

1249 El cálculo de sumas de cuadrados y grados de libertad para un factor se  
1250 realiza de la siguiente manera:

$$SST = \sum \sum y_{ij}^2 - \frac{(\sum \sum y_{ij})^2}{N} = (30)^2 + \dots + (18)^2 - \frac{(1240.20)^2}{60} = 804.526 \quad (38)$$

1251

$$SSt = \frac{\sum Sum_j^2}{n} - \frac{(\sum \sum y_{ij})^2}{N} = \frac{(163.20)^2 + \dots + (105.4)^2}{6} - \frac{(1240.20)^2}{60} = 722.48 \quad (39)$$

1252

$$SSE = SST - SSt = 804.526 - 722.48 = 82.046 \quad (40)$$

1253

$$gl(SST) = N - 1 = 60 - 1 = 59 \quad (41)$$

1254

$$gl(SSt) = a - 1 = 10 - 1 = 9 \quad (42)$$

1255

$$gl(SSE) = gl(SST) - gl(SSt) = N - a = 60 - 10 = 50 \quad (43)$$

1256 Los resultados de los cálculos de sumas de cuadrados y grados de libertad se mues-  
1257 tran en Tabla 37. Con los resultados obtenidos, 48,92 es más significativo que 2,07,  
1258 y se rechaza la igualdad de medias. El tamaño de la etiqueta afecta la iluminancia.

Tabla 37: ANOVA unidireccional del tercer experimento.

Fuente de variación	SS	gl	MS	F
Tratamientos (t)	722.48	9	80.27	48.92*
Error	82.04	50	1.64	
Total	804.52	59		

1259 El experimento se realizó modificando la botella en diferentes posiciones  
1260 para obtener la variación más significativa entre repeticiones. En la Figura 86, se  
1261 concluye que a medida que disminuye el tamaño de la etiqueta de la botella, dismi-  
1262 nuye la iluminancia. Pero la iluminancia aumenta cuando la botella tiene una etique-  
1263 ta; esto ocurre cuando la marca tiene letras blancas.

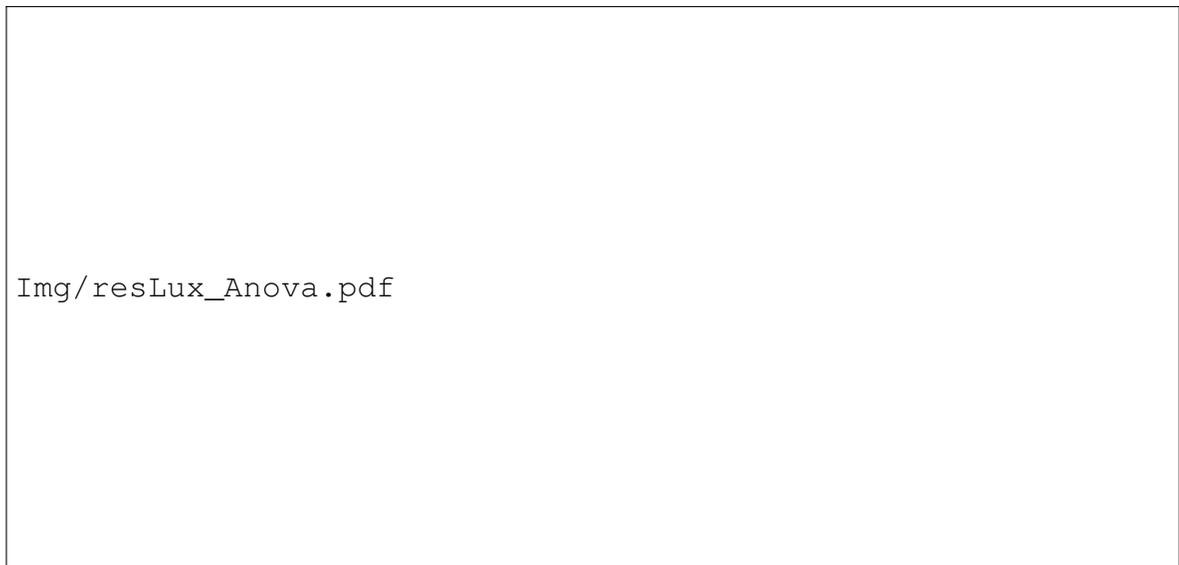


Figura 86: Gráfica de respuesta del tercer experimento.

1264 . **Desarrollo del sistema de identificación con aprendizaje au-**  
 1265 **tomático**

1266 . **Análisis de componentes principales**

1267 Se utilizó el análisis de componentes principales para identificar el número  
 1268 de líquidos en las botellas. Los datos se ingresaron en el software *Minitab* y los  
 1269 datos y los resultados se muestran en Tabla 38.

Tabla 38: Datos y resultados de la PCA. El tamaño de la botella es en mililitros.

Tamaño	Líquido 100 %	Líquido 50 %	Líquido 25 %	Etiqueta	PC1	PC2
3000	16.50	14.45	12.95	27.20	-1.34137	1.99768
2000	14.60	14.45	13.50	24.08	-1.16713	-0.41555
1350	15.95	13.95	13.90	25.93	-0.96440	0.83528
1000	15.05	13.05	13.90	20.45	-1.25152	-1.28753
600	15.20	14.70	13.85	18.32	0.26894	-0.64694
500	14.90	14.25	14.30	18.75	0.14066	-1.18554
355	16.20	15.60	15.75	18.47	2.84955	0.37889
300	16.65	14.60	14.60	17.82	1.39885	0.47160
200	16.25	13.85	13.80	17.57	0.06642	-0.14789

1270 Transformando los datos con la siguiente fórmula  $x_{ij} = \frac{x_{ij} - \bar{x}_j}{\sigma_j}$ , los dos com-  
 1271 ponentes principales que representan el 76,8% de la variación de los datos. Los  
 1272 resultados se muestran en la siguiente Figura 87. El gráfico muestra que las bote-  
 1273 llas 3000 y 1350 son las que más iluminación reflejan, principalmente por su tipo  
 1274 de etiqueta. Este comportamiento se debe a su diseño de fabricación. Las botellas  
 1275 2000 y 1000 son botellas que tienen alta iluminación cuando llevan etiqueta. Cuan-  
 1276 do contienen líquidos, su iluminación es mucho menor que las otras botellas. Las  
 1277 botellas de 500 y 600 tienen ligeras variaciones de etiqueta pero son más significa-  
 1278 tivas cuando la cantidad de líquidos disminuye. La botella de 200 es la más difícil  
 1279 de detectar por su etiqueta y si tiene líquidos. Las botellas 300 y 355 son botellas  
 1280 similares en cuanto a su etiqueta cuando tienen líquidos dentro de la botella. Las

1281 botellas de 355 y 300 con varios líquidos entre 75 a 177 mililitros son las que tienen  
1282 mayor variación, con 25 cm de distancia respecto a la cinta transportadora.



Figura 87: La gráfica de puntos para los dos componentes principales.

1283 En conclusión, el primer componente es la cantidad de variación que tienen  
1284 las botellas para detectar líquidos. El segundo componente se interpretó como la  
1285 variación que tienen las botellas con su etiqueta. Con estos resultados, se pueden  
1286 identificar al menos dos clases para determinar la cantidad de líquidos dentro de las  
1287 botellas.

#### 1288 . **Máquina de soporte vectorial**

1289 En Tabla 39 se clasificaron las botellas con sus diferentes tamaños y la  
1290 cantidad de líquidos en su interior.

Tabla 39: Clases para analizar SVM.

	Clase 1		Clase 2		
Liquido (%)	Liquido	Iluminancia	Liquido (%)	Liquido	Iluminancia
100	355	16.20	100	1000	15.05
100	300	16.65	100	600	15.2
100	200	16.25	100	500	14.9
50	177.5	15.60	50	500	13.05
50	150	14.60	100	3000	16.50
50	100	13.85	100	2000	14.60
25	88.75	15.75	100	1350	15.95
25	75	14.60	50	1500	14.45
25	50	13.80	50	1000	14.45
50	300	14.7	50	675	13.95
50	250	14.25	25	750	12.95
25	250	13.9	25	500	13.50
25	150	13.85			
25	125	14.3			
25	337.5	13.9			

1291 El desarrollo de SVM utilizó un programa en *Matlab* que se puede consultar  
1292 en el listado publicado en el anexo de [Ángeles Hurtado et al., 2023]. La Figura 88  
1293 muestra que se determinaron dos clases, una para botellas con líquidos de menos  
1294 de 337,5 mililitros y una clase dos para botellas con más de 500 mililitros.



Figura 88: Gráfico SVM para identificar el número de líquidos en botellas de PET.

1295            Los resultados de SVM nos ayudan a determinar el rango operativo para  
1296 detectar el tamaño de la botella y la cantidad de líquidos que contiene. A medida  
1297 que aumenta la cantidad de clases en este análisis, la cantidad de líquidos dentro  
1298 de las botellas podría determinarse mejor a un costo de implementación asequible.

### 1299 . **Análisis fuerzas, oportunidades, debilidades y amenazas**

1300            En las Tablas 40-41 se realizó un FODA y a modo de resumen no se tiene  
1301 una ventaja competitiva por el momento. Pero con el desarrollo tecnológico se busca  
1302 especializarnos en identificar los diferentes tipos de polímeros que son reciclables.

Tabla 40: Análisis de Oportunidades y Amenazas para implementarse a corto plazo.

Entornos	Local	Regional	Nacional	Internacional
Político	El municipio apoyan proyectos de emprendimiento con impacto ambiental	La política en el estado es estable por lo menos es los próximos seis años	En los próximos tres años se pronostica una recuperación y confianza política	Las relaciones exteriores en norte América son estables por el tratado de libre comercio
Económico	Existen por lo menos 10 competidores en la zona	Querétaro es una ciudad en crecimiento y con centros de acopio	Querétaro, entre las 5 principales economías del país, según el “SEDESU” y con demanda tecnológica	Los precios se están incrementando por la prohibición de China para procesar materiales reciclables.
Comercial	Protección Civil es flexible para dar los permisos de funcionamiento	El municipio de Querétaro nos considera como riesgo medio y hay que pagar cada año	Los impuestos que se pagan al SAT son menores a lo que pagan otros comercios	China el principal exportador de materiales reciclables ha puesto restricciones y ahora se tiene que procesar en México sus desechos plásticos.

Tabla 41: Análisis de Oportunidades y Amenazas para implementarse a corto plazo

Entornos	Local	Regional	Nacional	Internacional
Social	Solo 3 de cada 10 personas reciclan	Querétaro al ser un estado industrial existen industrias que generan muchos desechos reutilizables	Solo el 5% de los desechos solidos se recicla en México	Solo el 9% a nivel mundial se le da valor a los materiales que aun se pueden reciclar.
Tecnológico	Se carece de un equipo de trabajo consolidado	Los sistemas más grandes cuentan con diversas herramientas para clasificar incluso robots	A nivel nacional son muy pocos los sistemas de clasificación y procesamiento de materiales reciclables	Solo los países desarrollados pueden tener acceso a tecnología de punta.
Ecológico	Se disminuyo el ingreso de materiales reciclables por que cambiaron el horario de recolección de la basura	Prohibieron que los trabajadores de limpia separaran la basura	Se han implementado sistemas de conciencia para que las personas sean conscientes de la importancia de reciclar	A nivel mundial se requiere que se recicle más y cada país se haga responsable de sus desechos solidos.
Legal	Se requiere cada año que el personal este capacitado en manejo de incendios, primeros auxilios y protección civil para el visto bueno del municipio	Se necesita pagar el predial y tener registrado el uso de suelos como parte de los requisitos para la licencia municipal	Se requiere conocer la contabilidad de costos, financiera y realizar la declaración cada dos meses	Varia dependiendo cada región y país.

## IX. DISCUSIÓN

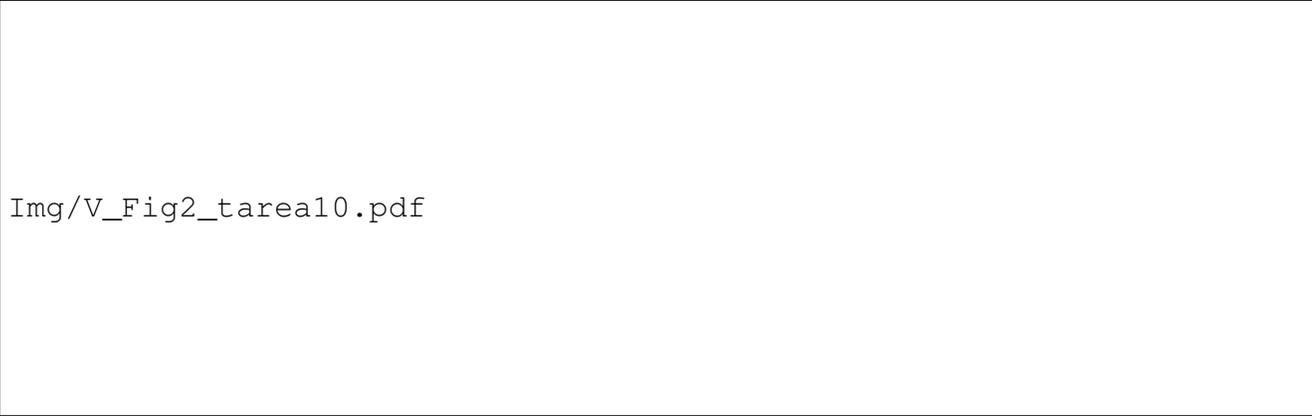
1303

1304 El proyecto lo consideramos que es de grado de innovación incremental  
1305 porque agrega valor generando un servicio promocionando productos. Por cuestio-  
1306 nes de tiempo y presupuesto no fue posible implementar un sistema neumático que  
1307 expulsara las botellas o por lo menos tener el banco de pruebas para experimentar.  
1308 En la metodología se menciona realizar diseño de experimentos para determinar  
1309 la interacción de todos los factores pero esto se deja pendiente para trabajos fu-  
1310 turos. El banco de pruebas se fabrico en madera para mantener un bajo costo en  
1311 la experimentación y no se logro implementarlo en una estructura metálica. Quedo  
1312 pendiente el estudio de repetibilidad y reproducibilidad para el sistema de medición.  
1313 Con base en los resultados obtenidos de los tres experimentos, fue posible deter-  
1314 minar la distancia a la que debe operar el luxómetro para identificar si las botellas  
1315 contienen líquidos y aproximar la cantidad de líquidos en una tonelada de botellas.  
1316 Los resultados de SVM también demostraron que es factible estimar la cantidad de  
1317 líquido en una botella. Al aumentar las dimensiones de la máquina de vectores de  
1318 soporte, sería posible optimizar aún más el sistema utilizando los datos disponibles.  
1319 Para mejorar la precisión de la aproximación del líquido, la investigación propone la  
1320 implementación de una cámara de vídeo para identificar el tamaño de la botella. Es-  
1321 ta información adicional se puede utilizar para optimizar el rendimiento del luxómetro  
1322 al estimar el contenido de líquido de manera más eficaz. Otro objetivo de este tra-  
1323 bajo es publicar los resultados del desarrollo de un sistema automatizado para la  
1324 identificación de polímeros en centros de acopio en México. La experimentación se  
1325 centró únicamente en botellas alineadas con la cinta transportadora. La incorpora-  
1326 ción de un sistema de cámara puede ayudar a minimizar las variaciones causadas  
1327 por la orientación de la botella. Para simplificar la idea propuesta, la investigación  
1328 llevará a cabo al menos tres diseños experimentales para analizar los factores que  
1329 afectan el procesamiento de imágenes en tiempo real en un banco de pruebas. Es-

1330 tos experimentos tienen como objetivo generar ideas para diseñar y desarrollar un  
1331 sistema de clasificación asequible dentro del campo académico. En general, el tra-  
1332 bajo presentado en esta sección representa parte de un proyecto más amplio y, al  
1333 combinar el sistema de visión, el luxómetro y diseños experimentales adicionales,  
1334 la investigación tiene como objetivo lograr mejores resultados en el desarrollo de un  
1335 sistema automatizado para identificar polímeros en centros de reciclaje.

### 1336 . **Cadena de medida para el sistema de clasificación en botellas** 1337 **de PET**

1338 Esta sección de la tesis de deja pendiente para trabajos futuros. La cadena  
1339 de medida de longitud de onda ver Figura 89, esta compuesta por foto diodo es-  
1340 pectro visible, foto diodo IR, dos cámaras fotográficas digitales, filtros, amplificador,  
1341 convertidores de señal analógica a digital, conversor de señal digital a analógica, y  
1342 una matriz de compuertas lógicas programables [Schmid et al., 2000, IMNC, 2008].



Img/V\_Fig2\_tarea10.pdf

Figura 89: Cadena de medida para posibles fuentes de incertidumbre.

1343 . **Diseño de experimentos con la interacción de todos los facto-**  
1344 **res a controlar**

1345 Se busca minimizar los factores de ruido que con la interacción de todos los  
1346 factores anteriormente descritos se obtenga la velocidad máxima y mínima que no  
1347 afecte la eficiencia en la clasificación, véase la Figura 90, [Gutiérrez Pulido, 2004].  
1348 También esta sección se deja pendiente para próximos trabajos pos-doctorales.



Figura 90: Factores y variables en el diseño de experimentos para la interacción de todo el sistema.

## X. CONCLUSIONES

1349

1350           Con los resultados podemos afirmar que es posible clasificar tres bote-  
1351 llas por segundo con un diseño asequible para centros de acopio. Para simplificar  
1352 podríamos decir que con el proyecto propuesto se espera que mediante los princi-  
1353 pios básicos de clasificación que existen y con la metodología propuesta reducir el  
1354 costo de construcción y adquisición para que micro empresas puedan acceder al  
1355 mercado de la automatización incrementando su productividad. Por ahora se esta  
1356 haciendo la vinculación con el sistema mecánico y el sistema de procesamiento de  
1357 imágenes. El proyecto tiene pendiente la experimentación para optimizar el sistema  
1358 y obtener mejores resultados. Con el presupuesto asignado por FOPER se cuenta  
1359 con un banco de pruebas para identificar la velocidad de clasificación de las botellas  
1360 PET post-consumo. Así mismo ya se pueden implementar técnicas más robustas  
1361 de procesamiento de imágenes y aprendizaje automático para lograr clasificar las  
1362 tres botellas por segundo. Dependiendo del éxito en la adquisición de los datos y la  
1363 linealidad del sensor se diseñara un diseño de experimentos para evaluar la tarjeta  
1364 electrónica del diodo de InGaAs que es el componente principal para el trabajo de  
1365 espectroscopia, se considerarán los factores de ruido que puedan provocar fallas en  
1366 su funcionamiento, para ello es crucial identificar dichos factores y determinar cuál  
1367 sería la manera más idónea para eliminarlos con el fin de permitir que el diodo y  
1368 sus futuras etapas de amplificación y de filtrado funcionen correctamente. Por ende,  
1369 será necesario utilizar instrumentos de medición como voltímetros, amperímetros u  
1370 otro equipo que nos permita analizar e identificar posibles alteraciones en el funcio-  
1371 namiento esperado para poder realizar las correcciones necesarias.

## REFERENCIAS

1372

1373 [Asheri Arnon et al., 2019] Asheri Arnon, T., Ezra, S., and Fishbain, B. (2019). Wa-  
1374 ter characterization and early contamination detection in highly varying stochastic  
1375 background water, based on machine learning methodology for processing real-  
1376 time uv-spectrophotometry. *Water Research*, 155:333–342.

1377 [Ashwini S. Shinde, 2016] Ashwini S. Shinde, Sharad S. Jagtap, V. P. (2016). Iden-  
1378 tification and sorting of power quality disturbances using signal processing with  
1379 gui. *E International Conference on Advances in Electronics, Communication and  
1380 Computer Technology (ICAECCT) Rajarshi Shahu College of Engineering, Pune  
1381 India.*, pages 60–63.

1382 [Beuchot, 1999] Beuchot, M. (1999). *Heurística y hermenéutica*, volume 1. UNAM.

1383 [Breyer, 2011] Breyer, G. (2011). *Heurística del diseño*. Nobuko.

1384 [Bruno, 2000] Bruno, E. A. (2000). Automated sorting of plastics for recycling. In *in  
1385 Press*, pages 3–16. in Press.

1386 [Capson et al., 2011] Capson, H. B. W., Schuurman, D. W., and C., D. (2011). To-  
1387 wards real-time sorting of recyclable goods using support vector machines. *Pro-  
1388 ceedings of the 2011 IEEE International Symposium on Sustainable Systems and  
1389 Technology, ISSST 2011*.

1390 [Choubey et al., 2020] Choubey, D., Kumar, P., Tripathi, S., and Kumar, S. (2020).  
1391 Performance evaluation of classification methods with pca and pso for diabetes.  
1392 *Network Modeling Analysis in Health Informatics and Bioinformatics*, 9(1).

1393 [Crisci, 1983] Crisci, Jorge Víctor, A. M. F. L. (1983). Introducción a la teoría y prácti-  
1394 ca de la taxonomía numérica. Technical report, OEA Washington eD. CDC.

1395 [Crisci, 1977] Crisci, J. V. (1977). Clasificación biológica: naturaleza, objetivos, fun-  
1396 damentos. *Obra del Centenario del Museo de La Plata*, 3:51–61.

1397 [cuentame.inegi.org.mx, 2020] cuentame.inegi.org.mx (2020). Me-  
1398 dio ambiente - basura; fecha de la consulta 06/05/2020.  
1399 <http://cuentame.inegi.org.mx/territorio/ambiente/basura.aspx?tema=T>.

1400 [de Coca-Cola (IMCC), 2019] de Coca-Cola (IMCC), I. M. (2019). Entérate qué es  
1401 la industria mexicana de coca-cola y quiénes formamos parte de ella 27/05/2019.  
1402 In *IMCC*. IMCC.

1403 [De Groot et al., 1999] De Groot, P., Postma, G., Melssen, W., and Buydens, L.  
1404 (1999). Selecting a representative training set for the classification of demolition  
1405 waste using remote nir sensing. *Analytica chimica acta*, 392(1):67–75.

1406 [de Ohm, 2023] de Ohm, L. (2023). Capítulo zz circuitos simples de corriente—ley  
1407 de ohm. *Ley de Ohm*.

1408 [Duda, 1972] Duda, R.O. y Hart, P. (1972). Use of the hough transformation to detect  
1409 lines and curves in pictures. *Communications of the ACM*, 15(1):11–15.

1410 [Escalante Vázquez, 2007] Escalante Vázquez, E. J. (2007). *Seis-Sigma Metodo-*  
1411 *logía y Técnicas*. Editorial Limusa, México: Limusa, 2007.

1412 [Foundation et al., 2015] Foundation, Cooperation Lee, S. K. H., Lee, Y. H., and  
1413 Won, W. R. (2015). Patent no.; us 7,616,733 b2. In *United States Patent*. Uni-  
1414 ted States Patent.

1415 [Garraín et al., 2008] Garraín, D., Vidal, R., Franco, V., and Martínez, P. (2008).  
1416 Análisis del ciclo de vida del reciclado del polietileno de alta densidad. *Residuos*,  
1417 104:58–63.

1418 [Gutiérrez Pulido, 2004] Gutiérrez Pulido, H. V. S. R. d. I. (2004). Análisis y diseño  
1419 de experimentos. *Mc Graw Hill*.

1420 [Hou et al., 2014] Hou, D., Liu, S., Zhang, J., Chen, F., Huang, P., and Zhang, G.  
1421 (2014). Online monitoring of water-quality anomaly in water distribution systems

- 1422 based on probabilistic principal component analysis by uv-vis absorption spectroscopy. *Journal of Spectroscopy*, 2014.
- 1423
- 1424 [IMNC, 2008] IMNC, N. M. (2008). Vocabulario internacional de metrología—conceptos fundamentales y generales, términos asociados (vim). *IMNC, NORMA MEXICANA*.
- 1425
- 1426
- 1427 [Ji et al., 2020] Ji, L., Li, J., Li, G., Xiao, J., and Unrau, S. (2020). Analysis of fractured sections in shale gas wells based on pca - logistic regression model. *Materials Science Forum*, 980:483–492.
- 1428
- 1429
- 1430 [Johansen, 1975] Johansen, O. (1975). *Introducción a la teoría general de sistemas*. Univ. de Chile, Dpto. de Administración.
- 1431
- 1432 [Josefa, 2019] Josefa, González Blanco Ortíz Mena, S. S. M. (2019). Visión nacional hacia una gestión sustentable (cero residuos). In *Gobierno de México*, pages 1–27. Gobierno de México.
- 1433
- 1434
- 1435 [KK, 2015] KK, H. P. (2015). Ingaas photodiodes. [http://www.echungsensor.com/upload/File/Product%20Document/ingaas\\_selection\\_guide.pdf](http://www.echungsensor.com/upload/File/Product%20Document/ingaas_selection_guide.pdf).
- 1436
- 1437
- 1438 [Kumar, 2003] Kumar, P. A. (2003). Classification of power quality events using support vectir machine and s-transform. *2016 2nd International Conference on Contemporary Computing and Informatic*, 7(2):279–284.
- 1439
- 1440
- 1441 [Kumar, 2011] Kumar, P. K. P. R. L. I. R. S. B. (2011). *Pattern Discovery Using Sequence Data Mining*. Information Science Reference.
- 1442
- 1443 [Masoumi, 2012] Masoumi, Hamed Safavi. SM Khani, Z. (2012). Identification and classification of plastic resins using near infrared reflectance. *International Journal of Mechanical and Industrial Engineering*, 6:213–220.
- 1444
- 1445

- 1446 [Matos et al., 2019] Matos, I., Krpic, Z., and Romic, K. (2019). The speed limit road  
1447 signs recognition using hough transformation and multi-class svm. In *Internatio-*  
1448 *nal Conference on Systems, Signals, and Image Processing*, volume 2019-June,  
1449 pages 89–94.
- 1450 [Milgrom, 1994] Milgrom, J. (1994). Trends in plastics recycling. In *Resource Recy-*  
1451 *cling*. Technomic Publishing Company, Lancaster, Pennsylvania.
- 1452 [Nawrocky, 2010] Nawrocky, M. S. D. C. F. J. (2010). Visual sorting of recyclable  
1453 goods using a support vector machine. *Canadian Conference on Electrical and*  
1454 *Computer Engineering*.
- 1455 [Noble, 2006] Noble, W. S. (2006). What is a support vector machine? *Nature bio-*  
1456 *technology*, 24(12):1565–1567.
- 1457 [Olmedo Méndez, 2017] Olmedo Méndez, J. S. (2017). La gestión de proyectos  
1458 en una empresa manufacturera del sector automotriz mediante las herramientas  
1459 apqp y core tools. *repositorio ibero puebla*.
- 1460 [Osuna, 1998] Osuna, E. E. (1998). *Support Vector Machines: training and applica-*  
1461 *tions*. Massachusetts Institute of Technology.
- 1462 [P. Inrawong, 2016] P. Inrawong, Srigul W. M., K. (2016). Plastic classification base  
1463 on correlation of rgb color. *2016 13th International Conference on Electrical Engi-*  
1464 *neering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology,*  
1465 *ECTI-CON 2016*, pages 1–5.
- 1466 [Pallas-Areny, 2012] Pallas-Areny, Ramon. Webster, J. G. (2012). *Sensors and sig-*  
1467 *nal conditioning*. John Wiley & Sons.
- 1468 [Peláez Lenis et al., 2018] Peláez Lenis, L. C., Olmos Rodríguez, M. C., et al.  
1469 (2018). Plan de empresa para la creación de recoplast, empresa dedicada a

- 1470 la recuperación de plásticos reciclables. B.S. thesis, Universidad Autónoma de  
1471 Occidente.
- 1472 [Prasad, 2012] Prasad, Vinu D, K. (2012). Image processing techniques to recog-  
1473 nize and classify bottle articles. *National Conference on Advances in Compu-*  
1474 *ter Science and Applications with International Journal of Computer Applications,*  
1475 *75:1–5.*
- 1476 [Qu et al., 2019] Qu, S., Guo, Y., Ma, Z., Chen, W. ., Liu, J., Liu, G., Wang, Y., and  
1477 Xu, M. (2019). Implications of china’s foreign waste ban on the global circular  
1478 economy. *Resources, Conservation and Recycling*, 144:252–255.
- 1479 [RAE, 2022] RAE (2022). Real academia española: Diccionario de la lengua es-  
1480 pañola, consulta [23/09/2020]. <https://dle.rae.es>.
- 1481 [Ramli Suzaimah et al., 2008] Ramli Suzaimah, M. M. M., Wahab, H. A., and Abdul,  
1482 D. (2008). Histogram of intensity feature extraction for automatic plastic bottle  
1483 recycling system using machine vision. In *American Journal of Environmental*  
1484 *Sciences*, pages 583–588. Am. J. Environ. Sci.
- 1485 [Rani et al., 2019] Rani, M., Marchesi, C., Federici, S., Rovelli, G., Alessandri, I.,  
1486 Vassalini, I., Ducoli, S., Borgese, L., Zacco, A., Bilo, F., Bontempi, E., and Depe-  
1487 ro, L. (2019). Miniaturized near-infrared (micronir) spectrometer in plastic waste  
1488 sorting. *Materials*, 12(7).
- 1489 [Rich et al., 2020] Rich, D., Livingston, K., and Morgan, S. (2020). Evaluating per-  
1490 formance of lasso relative to pca and lda to classify dyes on fibers. *Forensic*  
1491 *Chemistry*, 18.
- 1492 [Rizanti, 2016] Rizanti, Nova Ayu AriniSetianingrum, A. H. (2016). Colon detection  
1493 using principal component analysis (pca) and support vector machine (svm). In  
1494 *IEEE*, pages 1–6. IEEE.

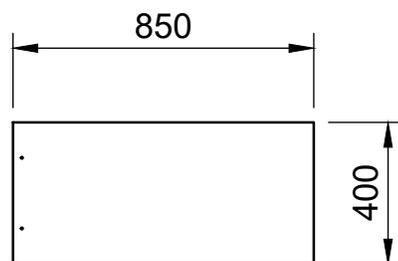
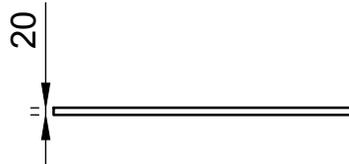
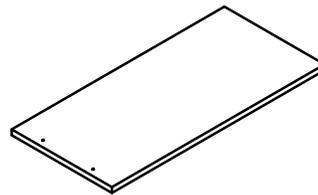
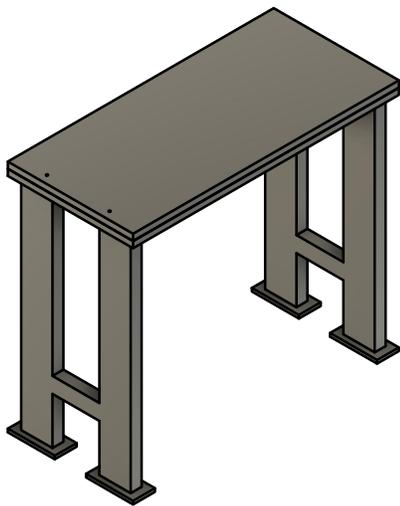
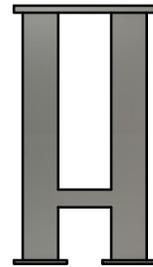
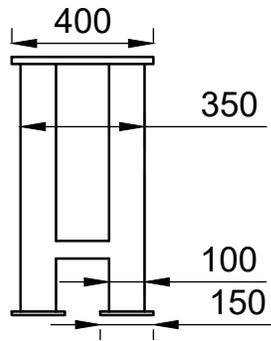
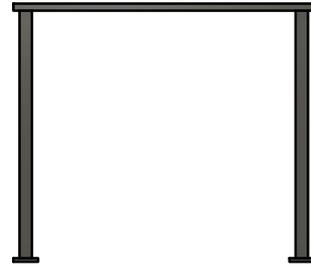
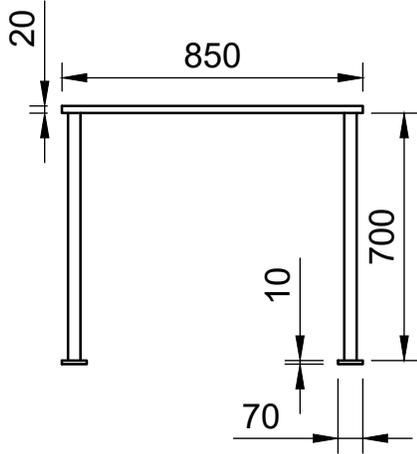
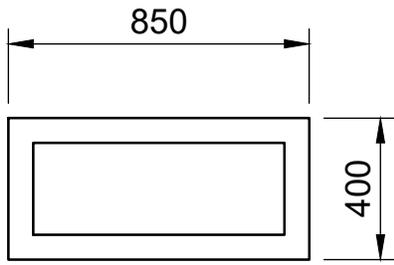
- 1495 [Rotheiser, 2009] Rotheiser, J. (2009). *Joining of Plastics Handbook for Designers*  
1496 *and Engineers*. Hanser Publishers, Munich. Hanser Publishers, Cincinnati, 3rd  
1497 edition.
- 1498 [Sahin O., 2018] Sahin O., Kirim, Y. (2018). *Material Recycling*, volume 2-5 of *Com-*  
1499 *prehensive Energy Systems*, pages 1018–1042. [www.scopus.com](http://www.scopus.com).
- 1500 [Scavino et al., 2009] Scavino, E., Wahab, D., Hussain, A., Basri, H., and Mustafa,  
1501 M. (2009). Application of automated image analysis to the identification and ex-  
1502 traction of recyclable plastic bottles. *Journal of Zhejiang University: Science A*,  
1503 10(6):794–799.
- 1504 [Schmid et al., 2000] Schmid, W. A., Lazos, R., et al. (2000). Guía para estimar la  
1505 incertidumbre de la medición. *CENAM, El Marquez, Qro., México*.
- 1506 [Scott, 1995] Scott, D. (1995). A two-colour near-infrared sensor for sorting recycled  
1507 plastic waste. *Measurement Science and Technology*, 6(2):156–159.
- 1508 [Semiconductors, 2006] Semiconductors, V. (2006). Silicon pn photodiode. Techni-  
1509 cal report, Vishay Semiconductor GmbH, P.O.B. 3535, D-74025 Heilbronn, Ger-  
1510 many.
- 1511 [Semiconductors, 2008] Semiconductors, V. (2008). Measurement techniques: Do-  
1512 cument number: 80085. Technical report, Vishay Semiconductor GmbH, P.O.B.  
1513 3535, D-74025 Heilbronn, Germany.
- 1514 [Serranti et al., 2013] Serranti, S., Cesare, D., Marini, F., and Bonifazi, G. (2013).  
1515 Classification of oat and goat kernels using nir hyperspectral imaging. *Talanta*,  
1516 103:276–284.
- 1517 [Shahbudin et al., 2010] Shahbudin, Shahrani Hussain Aini Wahab, D. A. M., Ramli,  
1518 M. M., and Suzaimah (2010). Support vector machines for automated classifica-

- 1519 tion of plastic bottles. *2010 6th International Colloquium on Signal Processing and*  
1520 *Its Applications*, pages 344–348.
- 1521 [S.M. et al., 2010] S.M., S., H., M., S.S., M., and Tabrizchi, M. (2010). Sorting of  
1522 polypropylene resins by color in msw using visible reflectance spectroscopy. *Waste*  
1523 *Management*, 30(11):2216–2222.
- 1524 [T Huth-Fehre, 1995] T Huth-Fehre, R Feldhoff T Kantimm, L. Q. (1995). Nir - remo-  
1525 te sensing and artificial neural networks for rapid identification of post consumer  
1526 plastics. *Journal of Molecular Structure*.
- 1527 [the Environment et al., 2006] the Environment, EPIC, P. I. C., and CSR, C. S. R.  
1528 (2006). A review of optical technology to sort plastics & other containers. In  
1529 *Canadian Plastics Industry Association*, pages 1–11. Canadian Plastics Industry  
1530 Association.
- 1531 [Vapnik, 1999] Vapnik, V. N. (1999). An overview of statistical learning theory. *IEEE*  
1532 *Transactions on Neural Networks*, 10:988–999.
- 1533 [Vijayarajeswari et al., 2019] Vijayarajeswari, R., Parthasarathy, P., Vivekanandan,  
1534 S., and Basha, A. (2019). Classification of mammogram for early detection of  
1535 breast cancer using svm classifier and hough transform. *Measurement: Journal*  
1536 *of the International Measurement Confederation*, 146:800–805.
- 1537 [Wang et al., 2019a] Wang, H., Zhang, Y., and Wang, C. (2019a). Surface modifi-  
1538 cation and selective flotation of waste plastics for effective recycling—a review.  
1539 *Separation and Purification Technology*, 226:75–94.
- 1540 [Wang et al., 2013] Wang, L., Liu, X., Shi, X., Lu, Y., Yun, Q., and Wang, M. (2013).  
1541 Study on real-time monitoring of seawater codby uv-vis spectroscopy. *Advanced*  
1542 *Materials Research*, 726-731:1534–1537.

- 1543 [Wang et al., 2019b] Wang, Z., Peng, B., Huang, Y., and Sun, G. (2019b). Classifica-  
1544 tion for plastic bottles recycling based on image recognition. *Waste Management*,  
1545 88:170–181.
- 1546 [Wu et al., 2020] Wu, X., Li, J., Yao, L., and Xu, Z. (2020). Auto-sorting commonly  
1547 recovered plastics from waste household appliances and electronics using near-  
1548 infrared spectroscopy. *Journal of Cleaner Production*, 246:118732.
- 1549 [Yi Tan, 2005] Yi Tan, G. (2005). The application of machine learning algorithm in  
1550 underwriting process. In *2005 International Conference on Machine Learning and*  
1551 *Cybernetics*, volume 6, pages 3523–3527 Vol. 6.
- 1552 [Ángeles Hurtado, 2021] Ángeles Hurtado, L.A. Rodríguez-Reséndiz, J. (2021).  
1553 Study of the physical characteristics of post-consumer pet bottles. In *Congreso*  
1554 *internacional de ingeniería, CONIIN*.
- 1555 [Ángeles Hurtado et al., 2021] Ángeles Hurtado, L., Rodríguez-Reséndiz, J., and  
1556 Salazar-Colores, S. (2021). Viable disposal of post-consumer polymers in me-  
1557 xico: A review. *Frontiers in Environmental Science*, 9:427.
- 1558 [Ángeles Hurtado et al., 2023] Ángeles Hurtado, L. A., Rodríguez-Reséndiz, J., Ro-  
1559 mero Zepeda, H., Torres-Salinas, H., García-Martínez, J. R., and Salas-Aguilar,  
1560 S. P. (2023). Development of a lux meter for the identification of liquids in post-  
1561 consumer polyethylene terephthalate bottles for collection centers in mexico. *Pro-*  
1562 *cesses*, 11(7).
- 1563 [Özkan et al., 2015] Özkan, K., Ergin, S., Işık, S., and Işikli, I. (2015). A new classifi-  
1564 cation scheme of plastic wastes based upon recycling labels. *Waste Management*,  
1565 35:29–35.

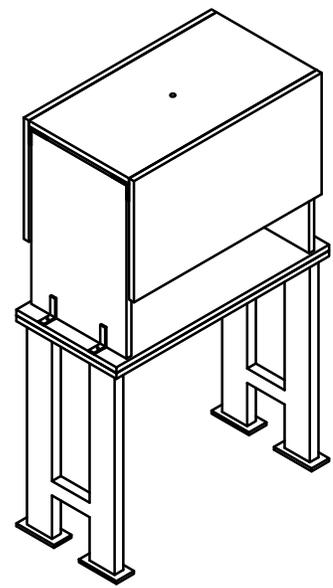
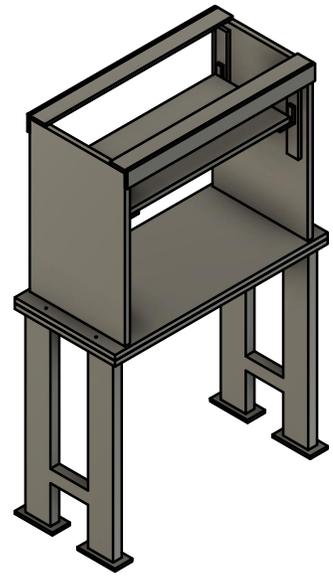
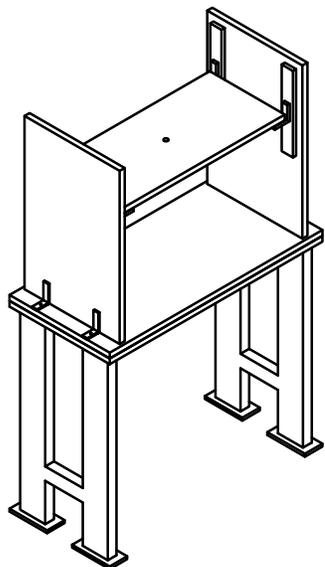
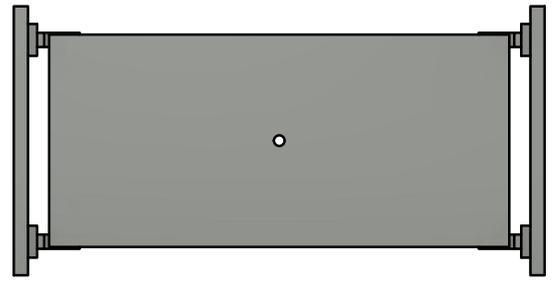
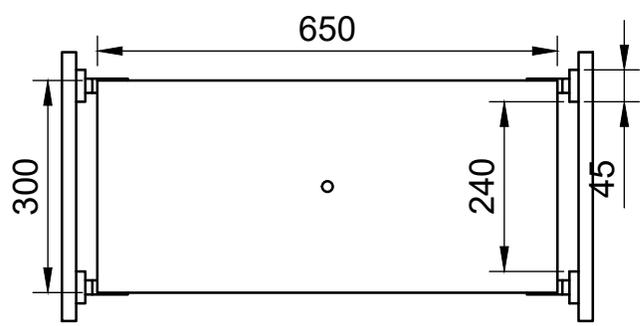
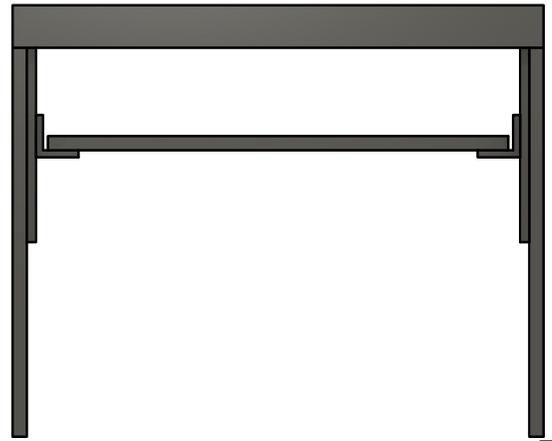
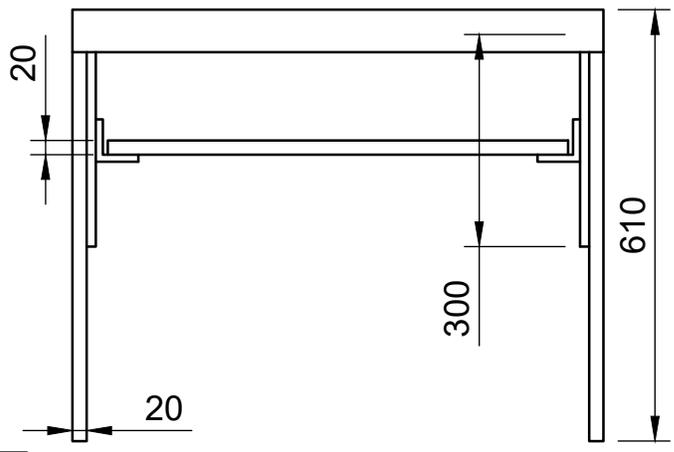
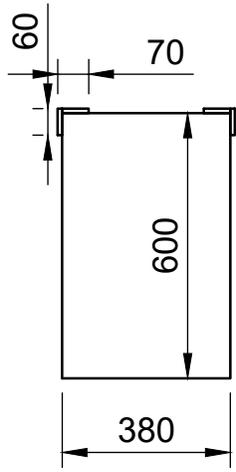
## 1566 A. APÉNDICE MESA

1567



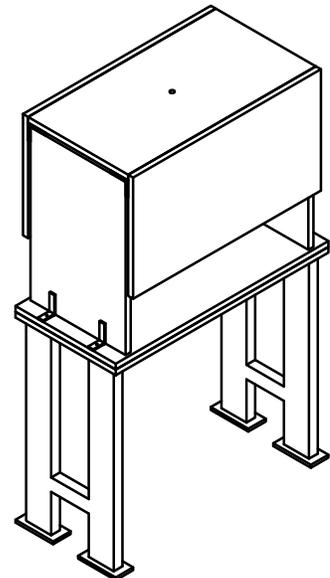
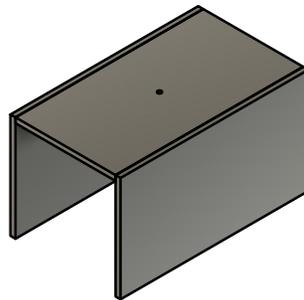
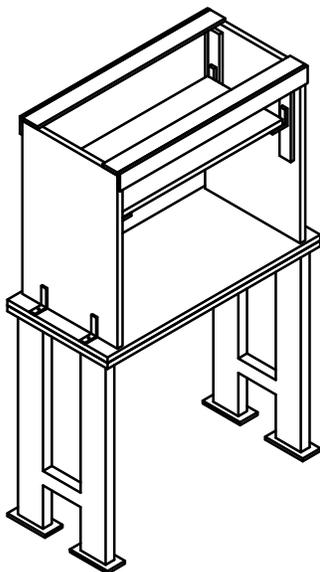
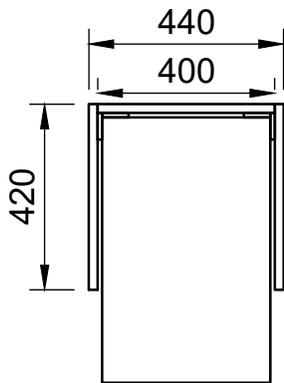
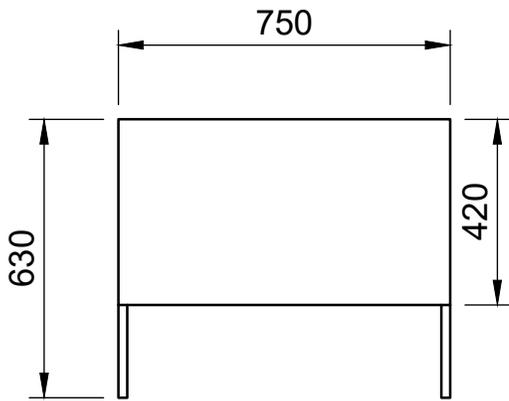
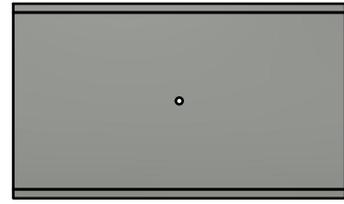
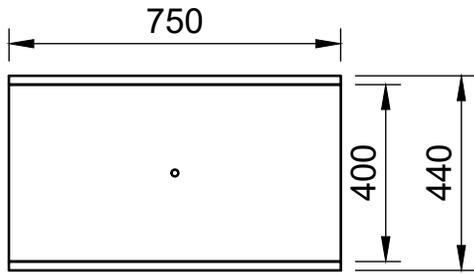
## **B. APÉNDICE CAJA**

1569

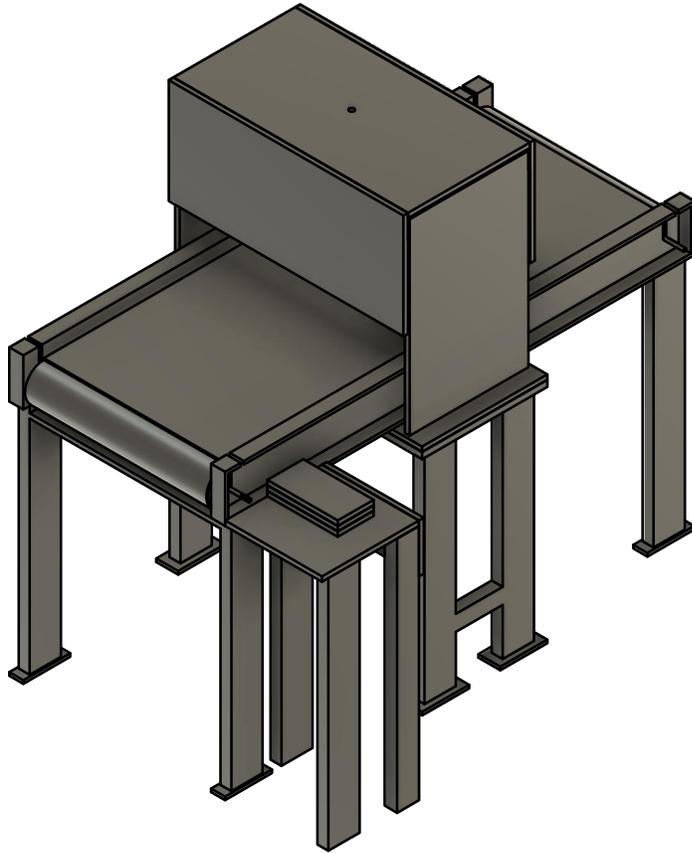


## C. APÉNDICE MESA Y CAJA

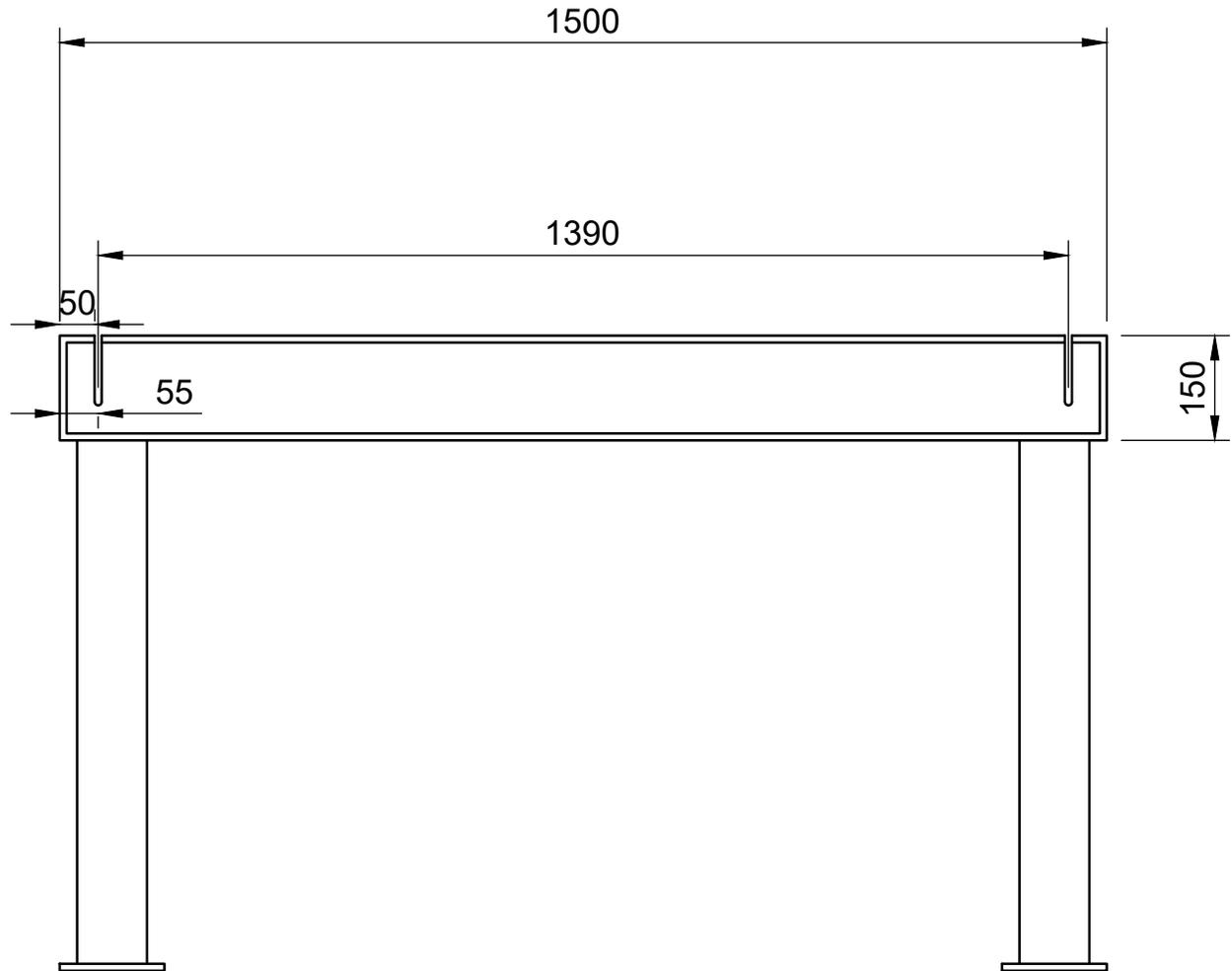
1571



## D. APÉNDICE SOPORTE

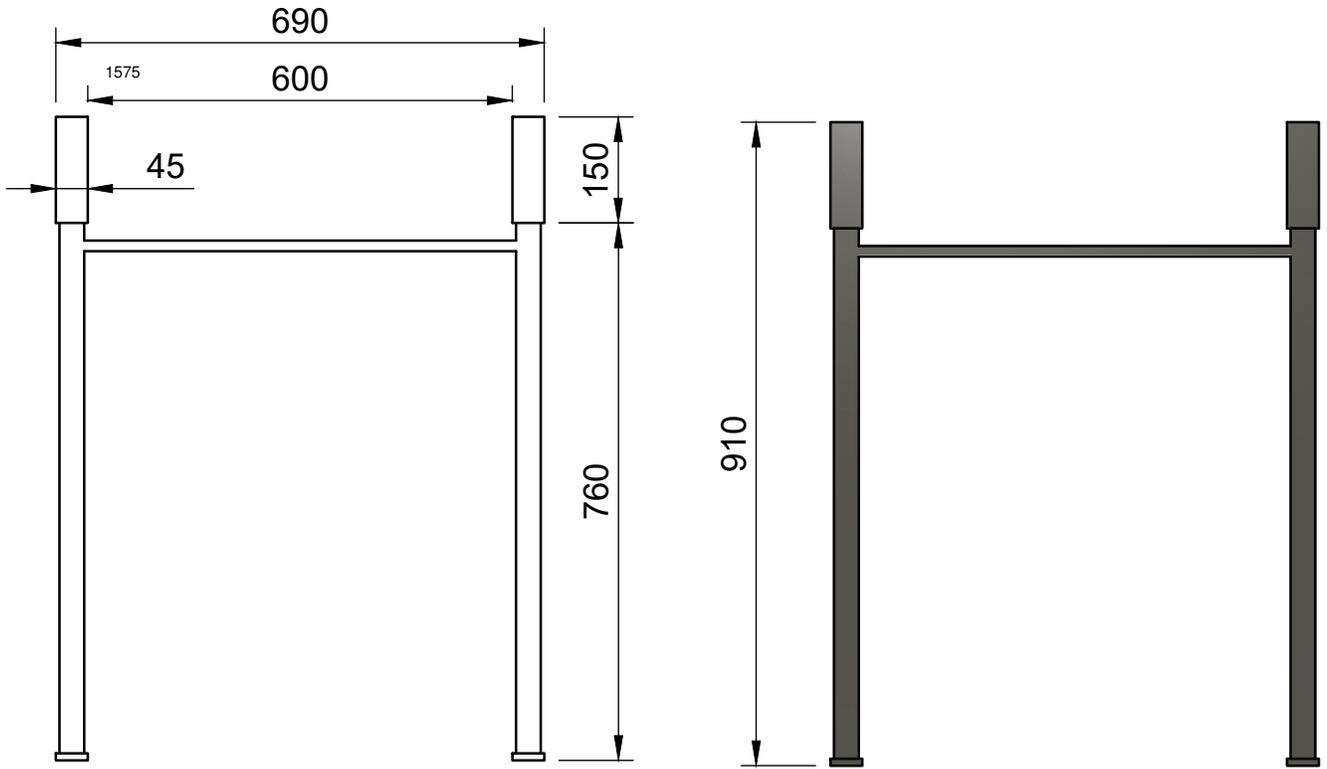


Dept.	Technical reference <b>milímetros</b>	Created by <b>L. A. ÁNGELES-HURTADO 21/03/2022</b>	Approved by	
		Document type <b>PRESUPUESTO</b>	Document status	
		Title <b>estructuraCompleta</b>	DWG No.	
		Rev.	Date of issue	Sheet <b>1/7</b>

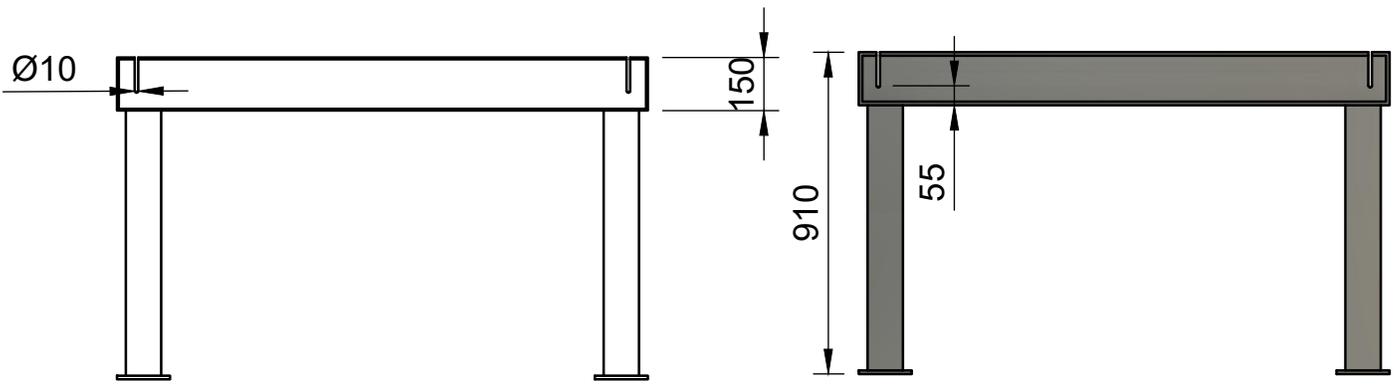


Dept.	Technical reference <b>milímetros</b>	Created by <b>L. A. ÁNGELES-HURTADO 21/03/2022</b>	Approved by	
		Document type <b>PRESUPUESTO base</b>	Document status	
		Title <b>Estructura BandaT.</b>	DWG No.	
		Rev.	Date of issue	Sheet <b>2/7</b>

# ESTRUCTURA PARA LA BANDA TRANSPORTADORA



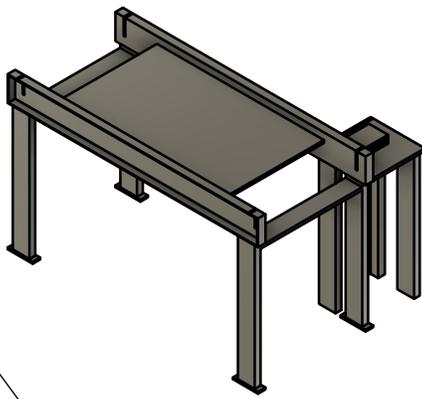
FRENTE



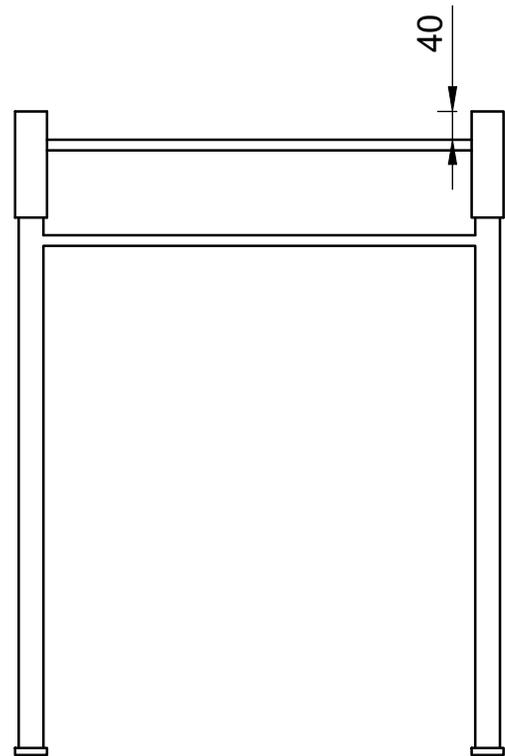
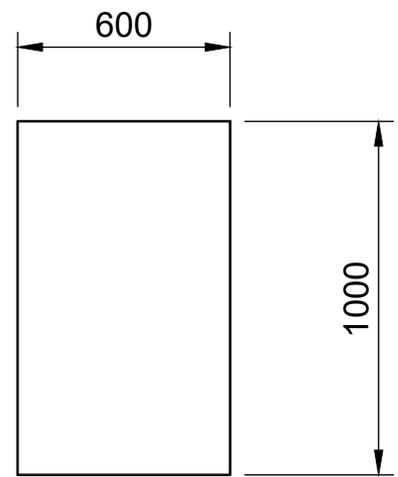
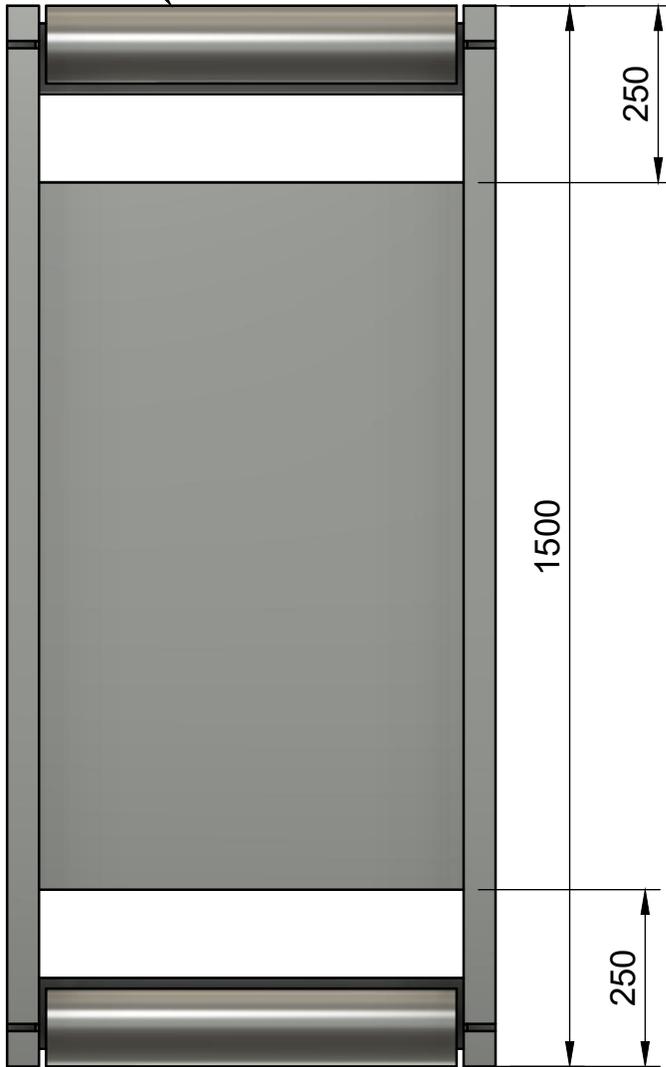
DERECHA

Dept.	Technical reference <b>milímetros</b>	Created by <b>L. A. ÁNGELES-HURTADO 21/03/2022</b>	Approved by	
		Document type <b>PRESUPUESTO base</b>	Document status	
		Title <b>Estructura BandaT.</b>	DWG No.	
		Rev.	Date of issue	Sheet <b>3/7</b>

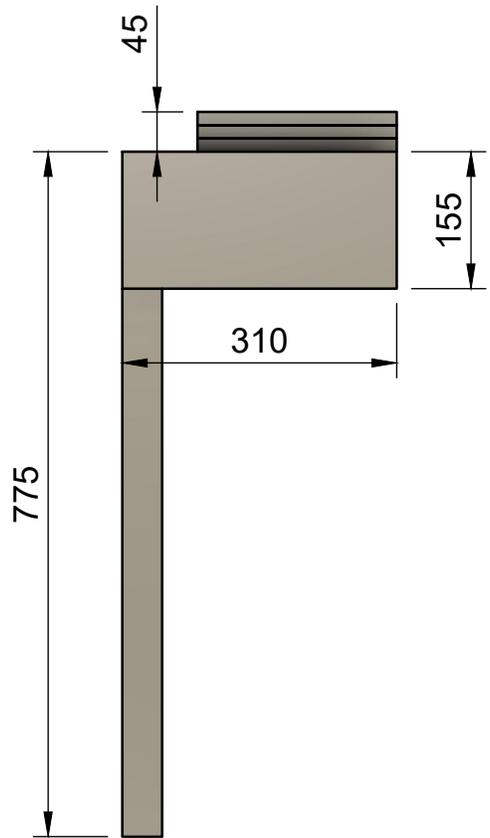
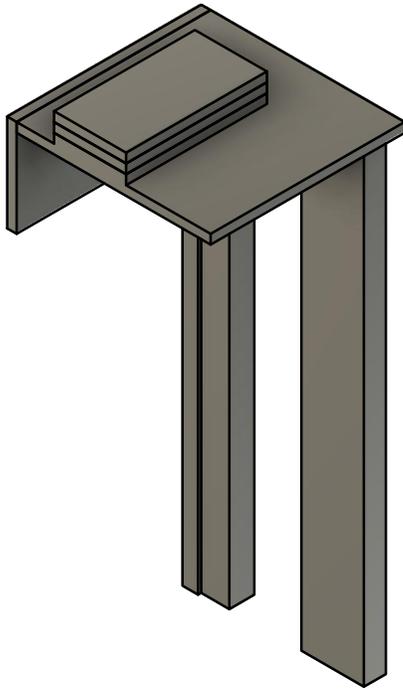
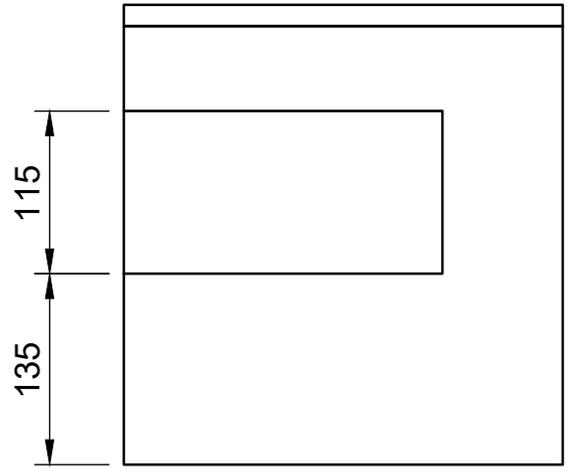
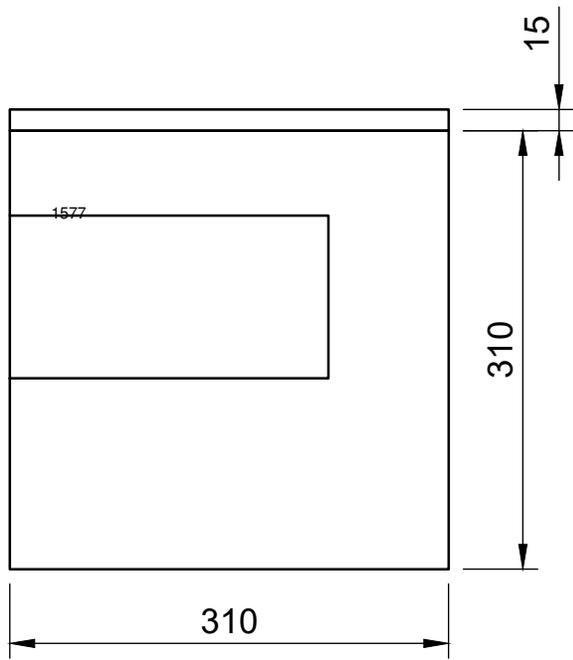
1576



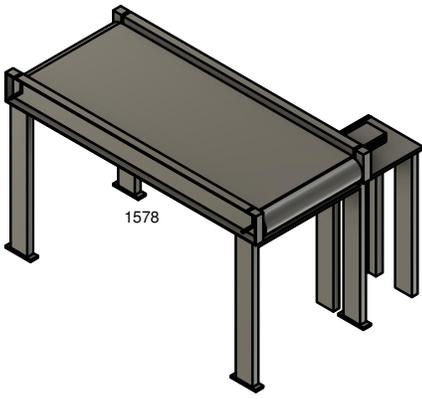
RODILLO



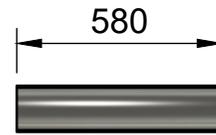
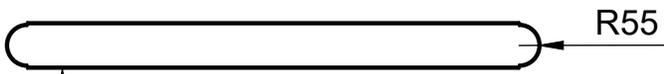
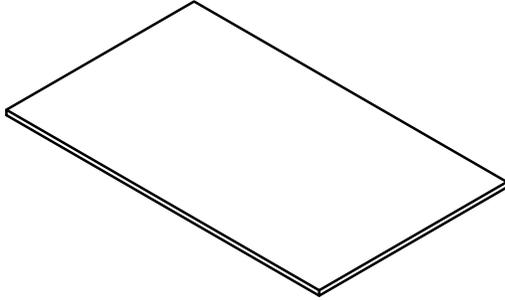
Dept.	Technical reference <b>milímetros</b>	Created by <b>L. A. ÁNGELES-HURTADO 21/03/2022</b>	Approved by	
		Document type <b>PRESUPUESTO base</b>	Document status	
		Title <b>Estructura BandaT.</b>	DWG No.	
		Rev.	Date of issue	Sheet <b>4/7</b>



Dept.	Technical reference <b>milímetros</b>	Created by <b>L. A. ÁNGELES-HURTADO 21/03/2022</b>	Approved by	
		Document type <b>PRESUPUESTO</b>	Document status	
		Title <b>estructuraCompleta</b>	DWG No.	
		Rev.	Date of issue	Sheet <b>5/7</b>



Banda de color negro, vulcanizada de PVC, para transportar botellas de plástico vacías.

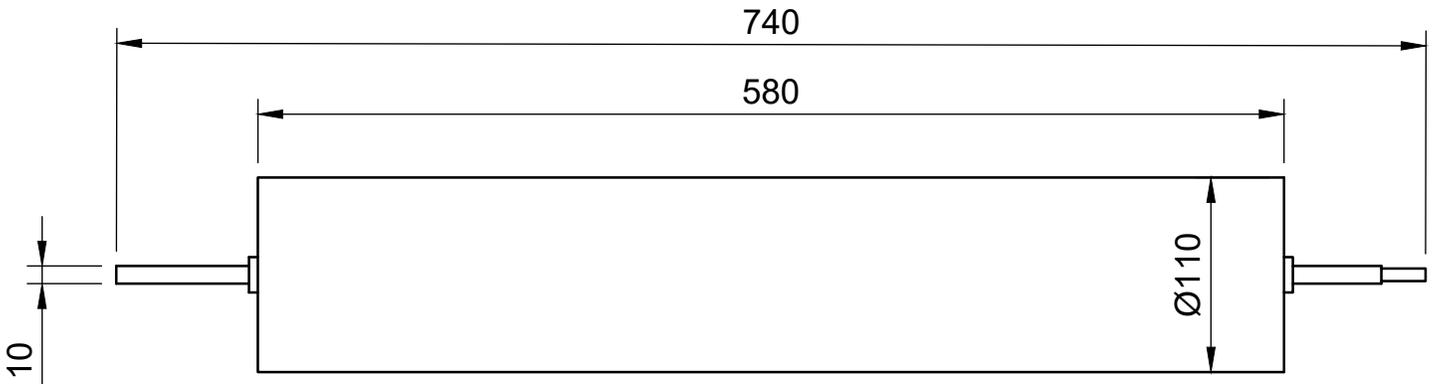
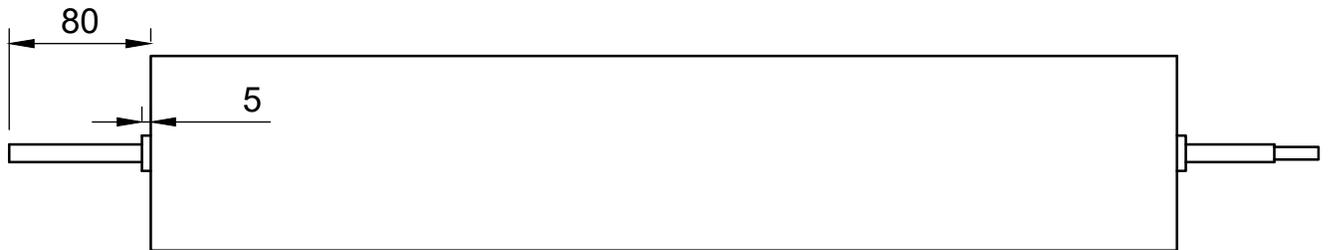
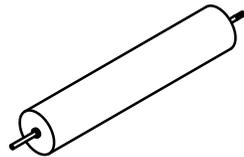
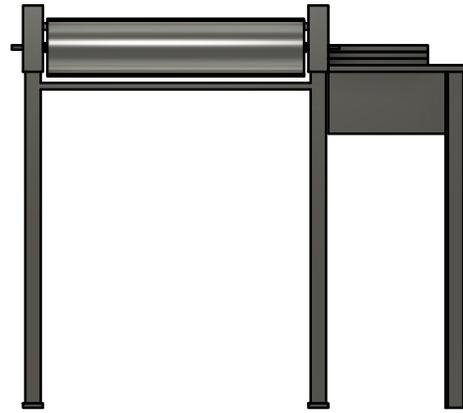
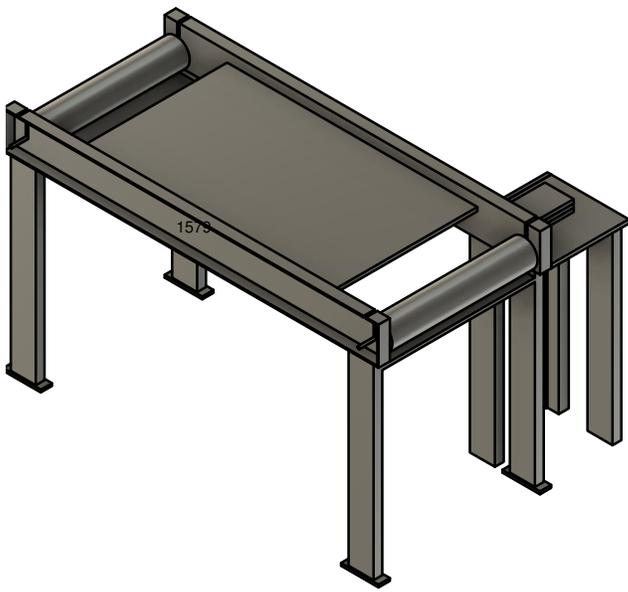


DERECHA

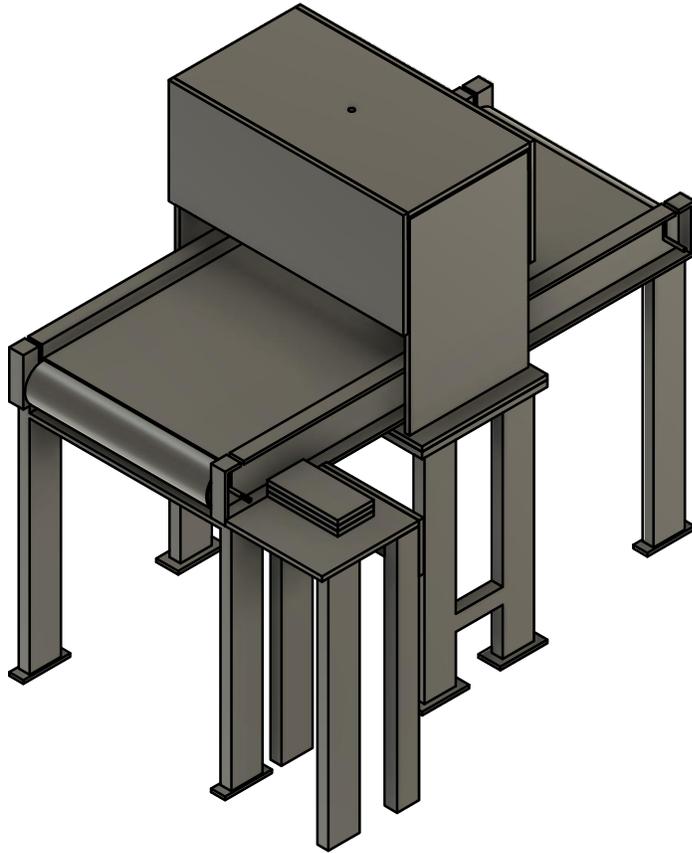
FRENTE

Largo Total de la banda =  $(1380+55+55)*2 = 2980$  mm

Dept.	Technical reference milímetros	Created by L. A. ÁNGELES-HURTADO 21/03/2022	Approved by	
		Document type PRESUPUESTO BANDA	Document status	
		Title Banda de 3 metros	DWG No.	
		Rev.	Date of issue	Sheet 6/7



Dept.	Technical reference <b>milímetros</b>	Created by <b>L. A. ÁNGELES-HURTADO 21/03/2022</b>	Approved by	
		Document type <b>PRESUPUESTO</b>	Document status	
		Title <b>Rodillo</b>	DWG No.	
		Rev.	Date of issue	Sheet <b>7/7</b>



Dept.	Technical reference <b>milímetros</b>	Created by <b>L. A. ÁNGELES-HURTADO 21/03/2022</b>	Approved by	
		Document type <b>PRESUPUESTO</b>	Document status	
		Title <b>estructuraCompleta</b>	DWG No.	
			Rev.	Date of issue