

UNIVERSIDAD RICARDO PALMA

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA



**“SISTEMA DE LLENADO AUTOMÁTICO DE
BOTELLAS CON CONTROL DE NIVEL
UTILIZANDO PROCESAMIENTO DIGITAL DE
IMÁGENES”**

TESIS

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO ELECTRÓNICO

PRESENTADO POR

YON PALOMINO PUMA

JOSE ANTONIO MANRIQUE HERNANDEZ

Lima - Perú

AÑO: 2015

*DEDICATORIA A Dios. A nuestros padres. A toda nuestra familia. A
nuestros amigos y compañeros de siempre.*

ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO	1
1.1 Marco Situacional	1
1.2 Problematización	4
1.3 Justificación	6
1.4 Objetivos	7
1.5 Antecedentes	8
CAPÍTULO II: FUNDAMENTOS TEÓRICOS	13
2.1 Fundamentos de imágenes digitales.....	13
2.2 Redes Neuronales Artificiales (RNA)	19
2.3 Estructura básica de una RNA	20
2.4 Red Neuronal Multicapa	21
CAPÍTULO III: DISEÑO DEL SISTEMA	34
3.1 Descripción del sistema	34
3.2 Procesamiento digital de imágenes.....	44
3.2.1 Comunicación entre la PC y el PIC	44
3.2.2 Obtención de la forma de la botella	46
3.3 Sistema de control.....	51
3.4 La banda transportadora.....	56
3.4.1 Partes de la banda transportadora	57
3.5 La Base circular giratoria y sus partes	62
3.5.1 La Base circular	64
3.5.2 Estación de llenado	71
3.5.3 Desecho	73
3.5.4 Enchapado	74
3.5.5 Clasificación	75
CAPÍTULO IV: RESULTADOS	78
4.1 Condiciones iniciales	79
4.2 Conexión entre la cámara y la PC.....	80

4.3 Detección y análisis de la botella.....	81
4.4 Estación de llenado	92
4.5 Segunda botella y la fase de desecho.....	95
4.6 Tercera botella y clasificación	98
4.7	
Producción.....	102
4.8 Análisis de costos	103
CONCLUSIONES	106
RECOMENDACIONES.....	1
08	
TRABAJOS FUTUROS	109
BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS	110
ANEXOS.....	1
14	

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Figura 1-1: Consumo per cápita anual de gaseosas en varios países	1
Figura 1-2: Producción de bebidas gaseosas en el Perú	2
Figura 1-3: Llenado de botellas de una planta que pertenece a la Corporación Lindley	3
Figura 1-4: Diferentes tipos de botellas que utiliza la empresa Bodegas Beronia S.A.	5
Figura 1-5: Llenado de botellas de una microempresa	5
Figura 1-6: Llenado desigual de botellas	6
Figura 1-7: Sistema automatizado controlado por visión artificial	9
Figura 1-8: Robot Manipulador Scrobot-ER 4u para el proceso de dos líquidos diferentes	10
Figura 1-9: Sistema de control de calidad para el llenado de botellas de vidrio	11
Figura 2-1: Imagen a color y (b) matriz representativa	14
Figura 2-2: Visualización de los pixeles	15
Figura 2-3: Imagen de 1bit, 2 colores.....	16
Figura 2-4: Imagen de 2 bits – 4 colores.....	16
Figura 2-5: Imagen de 16 bits – 65 536 colores.....	17
Figura 2-6: Niveles del Procesamiento digital de imágenes	18
Figura 2-7: Neurona natural y artificial	19
Figura 2-8: Red neuronal	21
Figura 2-9: Conversión a escala de grises	22
Figura 2-10: Conversión de la botella a escala de grises	23
Figura 2-11: Reducción de 640x480 pixeles a 20x20 pixeles	24
Figura 2-12 Algoritmo utilizado para la reducción de pixeles	25
Figura 2-13: Conversión de la imagen a blanco y negro.....	27
Figura 2-14: Red de neuronas de entrada, de salida e intermedias	28
Figura 2-15: Variación de los valores de eta “ η ”	31
Figura 3-1: Partes del Sistema	35
Figura 3-2: Diagrama de bloques del Sistema	36

Figura 3-3: Diagrama de Flujo del funcionamiento general del sistema	39
Figura 3-4: Diagrama de tiempo del funcionamiento general del sistema	43
Figura 3-5: Comunicación entre la PC y el PIC	45
Figura 3-6: Conexión entre la computadora y la cámara web	46
Figura 3-7: Cable Usb a serial.....	46
Figura 3-8: Botellas de diferentes formas	46
Figura 3-9: Conversión a escala de grises	47
Figura 3-10: Medida de la imagen capturada por la cámara.....	48
Figura 3-11: Imagen de botella en blanco y negro	49
Figura 3-12: Representación de las salidas de la Red Neuronal	49
Figura 3-13: Neurona Bias	50
Figura 3-14: Validación de la red neuronal	50
Figura 3-15: El error en función del número de iteraciones de aprendizaje	51
Figura 3-16: PIC 16F877A	53
Figura 3-17: Simulación del microcontrolador	54
Figura 3-18: Distribución de los pines del microcontrolador	55
Figura 3-19: Componentes estructurales de la banda transportadora	58
Figura 3-20: Motor DC reductor de 24Volt. 122 rpm	59
Figura 3-21: Polea de un Transportador de banda	60
Figura 3-22: Diodo emisor de luz infrarroja	60
Figura 3-23: Fototransistor	61
Figura 3-24: LED infrarrojo y el fototransistor	62
Figura 3-25: La Base circular giratoria y sus partes	62
Figura 3-26: Fases de la base circular giratoria	63
Figura 3-27: Acrílico de la base circular	65
Figura 3-28: Rueda de transporte	66
Figura 3-29: Ruedas que soportan a la base circular	67
Figura 3-30: Levas	68
Figura 3-31: Motores de las levas	70
Figura 3-32: Medición de llenado de la botella	71
Figura 3-33: Motor utilizado para el llenado de la botella	72
Figura 3-34: Los sensores de nivel	73
Figura 3-35: Botella en la fase de desecho	74

Figura 3-36: Enchapado de la botella	74
Figura 3-37: Brazo de madera para el enchapado	75
Figura 3-38: Almacenamiento de botellas	76
Figura 3-39: Partes del almacenamiento de botellas	76
Figura 4-1: Partes del Sistema	78
Figura 4-2: Condiciones iniciales	79
Figura 4-3: Conectar cámara y PC	80
Figura 4-4: La PC solicita el número de botellas que se va analizar	80
Figura 4-5: La PC espera la respuesta del controlador	81
Figura 4-6: El controlador recibe la señal de la PC	81
Figura 4-7: Solicitud para que ingrese la botella	81
Figura 4-8: Los sensores detectan la botella	82
Figura 4-9: Botella de plástico con fondo blanco	84
Figura 4-10: Imagen llevada a blanco y negro	84
Figura 4-11: Imagen sometida el procesamiento digital	85
Figura 4-12: Botella de plástico con fondo de madera de color marrón	85
Figura 4-13: Imagen llevada a blanco y negro	86
Figura 4-14: Imagen sometida el procesamiento digital	86
Figura 4-15: Una franela oscura como fondo para la botella de plástica	87
Figura 4-16: Imagen llevada a blanco y negro	87
Figura 4-17: Imagen sometida el procesamiento digital	88
Figura 4-18: Solicitud para que la PC analice la botella	88
Figura 4-19: Entrenamiento con 800 iteraciones	89
Figura 4-20: Entrenamiento con 7000 iteraciones	90
Figura 4-21: Entrenamiento con 15000 iteraciones	90
Figura 4-22: Botella número 1 de tipo A	91
Figura 4-23: La botella pasa a la fase 2	92
Figura 4-24: Nivel ideal de llenado de la botella	93
Figura 4-25: Botella muy llena	93
Figura 4-26: Botella con el nivel de llenado por debajo de lo aceptado	94
Figura 4-27: Nivel de llenado Vs número de pruebas	94
Figura 4-28: Nivel correcto de llenado	95
Figura 4-29: Solicitud para que ingrese la botella	95

Figura 4-30: Los sensores detectan a la botella	96
Figura 4-31: Solicitud para que la PC analice la botella	96
Figura 4-32: Botella número 2 de tipo B	96
Figura 4-33: La primera botella en la fase 3 y la segunda en la fase 2.....	97
Figura 4-34: Nivel correcto de llenado	98
Figura 4-35: Solicitud para que ingrese la botella	98
Figura 4-36: Los sensores detectan a la botella	99
Figura 4-37: Solicitud para que la PC analice la botella	99
Figura 4-38: Botella número 3 de tipo C	99
Figura 4-39: Botella seleccionada	100
Figura 4-40: La primera botella en la fase 4, la segunda en la fase 3 y la tercera en la fase 2.....	101

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4-1: Pruebas de detección variando la intensidad luminosa del sensor	.83
Tabla 4-2: Pruebas variando el número de iteraciones ..	91
Tabla 4-3: Eficacia del ingreso de las botellas en la clasificación de acuerdo al número de botellas	101
Tabla 4-4: Tiempo de producción en minutos	102
Tabla 4-5: Tiempo de producción por hora	102
Tabla 4-6: Tiempo de producción por hora después de la mejora	103
Tabla 4-7: Costos del proyecto	104
Tabla 4-8: Costos de materiales de metal	104

RESUMEN

Esta tesis propone el uso de procesamiento digital de imágenes para el control de clasificación, a través de redes neuronales, en un sistema de llenado automático de botellas. Las imágenes de las tres botellas fueron capturadas por una cámara web, dichas imágenes a través de algoritmos de MatLab pasaron a escala de grises y fueron almacenadas en una matriz de 20x20 que sirven como entrada a la red neuronal. Luego, la PC envió la información al sistema de control indicando el tipo de botella. De acuerdo a la información recibida el sistema de control activo el motor de la banda transportadora para hacer avanzar la botella hacia las estaciones de llenado, desecho, enchapado y selección. En la estación de llenado, el sistema de control activó los motores de llenado de acuerdo al tipo de botella. Si el llenado es muy alto o insuficiente, la base circular lleva a la botella a la posición de desecho. Si el llenado es el correcto, la base circular desplaza a la botella hacia la fase de clasificación. Se realizaron diferentes pruebas en el entrenamiento de la red neuronal en lo que respecta el número de iteraciones, donde se vio que 7000 iteraciones permiten que el reconocimiento sea eficiente. También para determinar la eficacia del llenado, se obtuvo que dos de cada diez botellas fueron rechazadas por mal llenado. En lo que respecta la productividad, con este sistema en media hora se puede tener hasta 38 botellas y en 8 horas hasta 608.

Palabras clave:

Procesamiento digital de imágenes; Clasificación; Redes Neuronales; Matriz.

ABSTRACT

This thesis proposes the digital image processing for classification control via neural networks, in automatic filling bottles. The pictures of the three bottles were captured by a webcam; the images through MatLab algorithms became grayscale and were saved in a 20x20 matrix which were as input to the neural network. The PC sent the information to the control system indicating the kind of bottle. According to information received the control system activated the conveyor belt move the bottle to the filling stations, waste, plating and selection. In the filling station, the control system activated the filling motors according to the type of bottle. If the filling is too high or insufficient, the circular base keeps the bottle in the position waste. If the filling is correct, the circular base moves the bottle in the classification position. We tested the neural network with different number of iterations, and discovered that 7000 iterations are enough for improve the performance. Also for test the quality of filling, two out of ten bottles were rejected by bad filling. In the productivity, hour and a half the system can fill 38 bottles and in 8 hours 608 bottles.

Keywords:

Digital image processing; Classification; Neural Networks; Matrix.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad muchas personas están optando por dejar las gaseosas debido a los males que trae con el tiempo, por esa razón en los últimos años se ha notado un incremento del consumo de bebidas naturales embotelladas, que en muchos casos son preparadas de forma casera.

Con el fin de mejorar la producción en las microempresas, en el presente trabajo se plantea un sistema automático de procesamiento que permite aumentar la producción sin la intervención de la mano humana en el proceso.

El sistema está diseñado para procesar tres diferentes tipos de botellas del mismo tamaño, para ello se utiliza un modelo existente de Redes Neuronales al cual se le conoce como Red Neuronal Multicapa. Para su correcta aplicación se realizaron diferentes pruebas en el entrenamiento del sistema para disminuir el número de errores en la identificación de las botellas.

Para el sistema automático de procesamiento se tiene una banda transportadora y una base circular giratoria que sumados permiten tener varias botellas en etapas diferentes (identificación, llenado, desecho y clasificación). Todo ello es controlado por una tarjeta que recibe las señales por medio de los sensores y envía señales a los motores para el correcto funcionamiento del sistema.

CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO

Este primer capítulo está enfocado a realizar un análisis situacional y justificar la elaboración del presente proyecto, además muestra trabajos anteriores que se hicieron para solucionar problemas similares al planteado en este trabajo.

1.1 Marco Situacional

La industria de embotellamiento está creciendo y expandiéndose en todo el Perú debido a la gran demanda de gaseosas, jugos y aguas embotelladas. Esto provoca que las grandes, medianas y pequeñas empresas utilicen sus instalaciones de embotellamiento para diversos productos. [1]

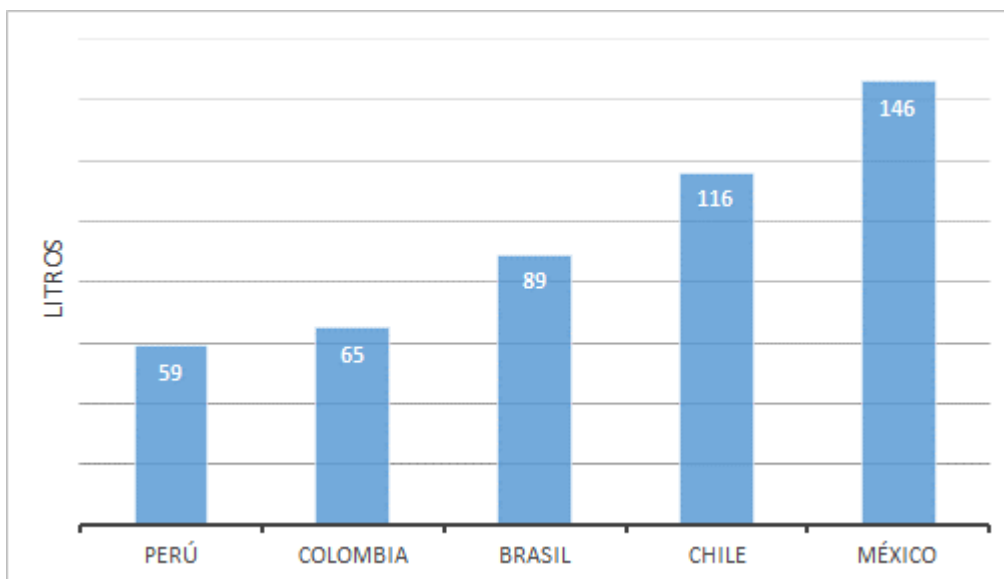


Fig. 1-1: Consumo per cápita anual de gaseosas en varios países (en litros) [1]

En la Figura 1-1 se ve que el consumo per cápita de bebidas gaseosas si bien ha venido creciendo en los últimos años aún se encuentra por debajo del promedio de Latinoamérica (70 litros). Así, el consumo per cápita anual en Perú alcanza 59 litros, por debajo del registrado en Colombia (65 litros), Brasil (89 litros), Chile (116 litros) y México (163 litros), según Oxfam [1].

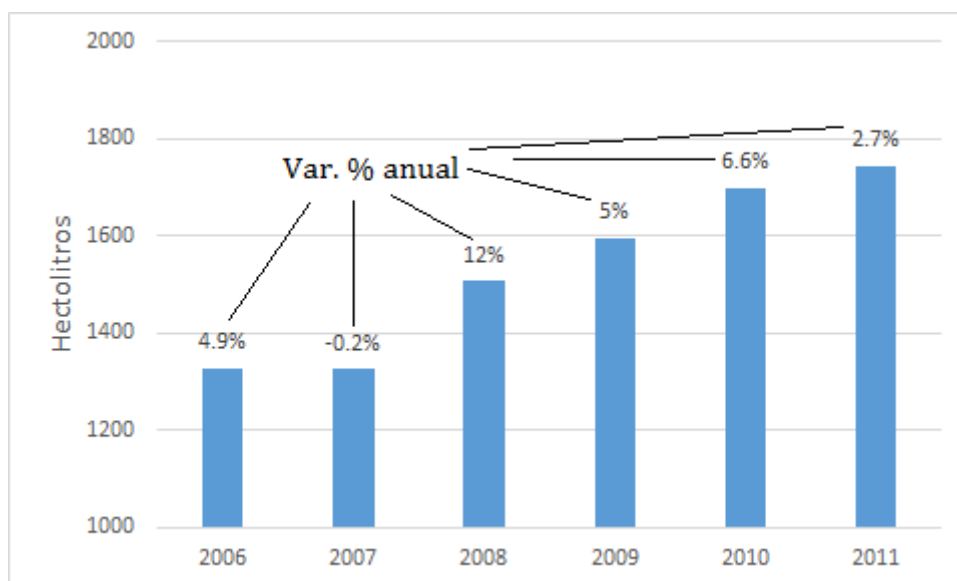


Fig. 1-2: Producción de bebidas gaseosas en el Perú (Millones de hectolitros y var. % anual) [1]

Según la Figura 1-2, durante el 2011 la producción de bebidas gaseosas alcanzó 1,744 millones de hectolitros, mayor en 2.7% respecto al 2010, aún así las gaseosas vienen perdiendo participación en el mercado de bebidas no alcohólicas debido al cambio en las preferencias de los consumidores. La expansión estaría liderada por la línea de aguas embotelladas, cuya producción crecería cerca de 15% en el 2012, impulsada por la mejora de los ingresos de la población, el bajo nivel de consumo per cápita y la mayor demanda en provincias. En ese sentido se prevé que continúe la tendencia del consumidor de preferir bebidas saludables, sin gas y con menor contenido de azúcar como aguas embotelladas, jugos y bebidas energizantes [1].

En la Figura 1-3 se aprecia la diversa producción que tiene la Corporación Lindley. En el ámbito empresarial, inició en el 2013 la construcción de una nueva planta en Pucusana (Lima) que concentrará las operaciones que se realizan actualmente en la planta del Rímac (Lima). La empresa viene evaluando ampliar su presencia en el segmento de jugos con leche e incursionar en las categorías de yogur y bebidas probióticas con el fin de continuar diversificando su producción y convertirse en una empresa de alimentos líquidos. De otro lado, la empresa prevé seguir lanzando nuevos productos en los segmentos de jugos (Frugos), además de incursionar en el segmento de té helado [1].



Fig.1-3: Llenado de botellas de una planta que pertenece a la Corporación Lindley. [2]

También en el mercado de los jugos embotellados hay muchas microempresas, como Silvia S.R.L. que se encarga de producir jugos naturales [3]. Este tipo de empresas no cuentan con grandes instalaciones, teniendo así muchas limitaciones.

1.2 Problematización

En la actualidad se puede ver grandes empresas de bebidas que producen grandes cantidades en corto tiempo para atender al mercado, pero también hay microempresas que producen una variedad de bebidas y que no cuentan con instalaciones modernas.

Se identificó tres problemas comunes en las microempresas:

A. Variedades de botellas

Algunas microempresas con la intención de presentar productos variados al mercado utilizan diferentes tipos de botellas para sus productos, en la Figura 1-4 se muestran las cinco botellas diferentes que la empresa Bodegas Beronia S.A. utiliza y que tiene como

problema el tiempo que tarda su embotelladora en el cambio de automatización para llenar un tipo diferente de botella creando así retrasos en la producción [4].



Fig.1-4: Diferentes tipos de botellas que utiliza la empresa Bodegas Beronia S.A. [4]

B. Intervención de la mano humana en el proceso

Tal como se muestra en la Figura 1-5, en estas empresas interviene de forma constante la mano humana. Debido a ello, para las microempresas es necesario tener un funcionamiento constante e ininterrumpido para tener más presencia en el creciente mercado.



Fig. 1-5: Llenado de botellas de una microempresa [5]

C. Mal llenado de botellas

Como se puede ver en la Figura 1-6 un problema en una microempresa es el mal llenado de las botellas, creando así la necesidad de un control de calidad que pueda mejorar el producto final.



Fig.1-6 Llenado desigual de botellas [6]

1.3 Justificación

Para aumentar la productividad y competitividad de las empresas embotelladoras es necesario plantear soluciones técnicas y económicamente visibles a los problemas antes mencionados. Por lo cual el prototipo de sistema planteado en esta tesis, Ofrece los siguientes beneficios:

- Llenar en botellas diferentes tres tipos de líquidos, sin necesidad de hacer algún cambio de automatización o configuración.
- Permite el funcionamiento automático del sistema, haciendo que la mano humana no sea necesaria en el proceso.
- Mide el nivel de las botellas llenadas permitiendo mantener un estándar en el producto final, además de generar ahorros si en caso la botella fuera llenada por encima del nivel establecido.

1.4 Objetivos

Objetivo General

- Diseñar un Sistema de llenado automático de botellas con control de nivel utilizando procesamiento digital de imágenes.

Objetivos Específicos

- Construir una banda transportadora de un sentido, para el desplazamiento de botellas.

Implementar una rueda para el transporte de las botellas que lleve hacia las estaciones de llenado, desecho, enchapado y selección.

Instalar en la rueda transportadora dos levas que permitan desechar y seleccionar las botellas.

- Desarrollar el mecanismo para el llenado y control de nivel de las botellas utilizando tres líquidos diferentes.
- Elaborar un mecanismo de enchapado para las botellas.
- Diseñar un programa en Matlab usando redes neuronales para procesar las imágenes en tiempo real para así poder determinar las formas de las botellas.

- Implementar un sistema de control conectado a la computadora para manejar la secuencia automática del embotellamiento.

1.5 Antecedentes

José Porras y Miguel De la Cruz [7]. Como se ve en la Figura 1-7, el proyecto trató de un sistema automatizado controlado por visión artificial, que utilizó hardware (sensor de luz, control de motor a pasos) y software (control por MATLAB). El principio básico de funcionamiento fue transportar objetos de color (rojo, verde y azul) por una faja transportadora, detectarlos con un sensor, capturar la imagen con una cámara web común y procesarla por MATLAB para clasificarlos en tres distintos contenedores. Con este proceso lograron una clasificación de objetos eficaz tanto en color y forma.

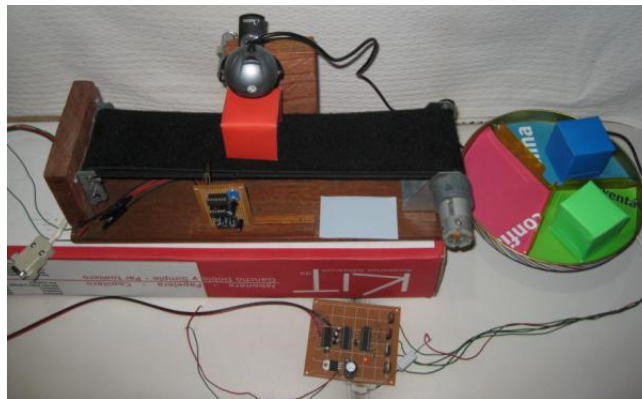


Fig. 1-7: Sistema automatizado controlado por visión artificial [7]

Este proyecto tiene varias similitudes al proyecto que se quiere desarrollar, pero la diferencia es que dicho sistema se utilizó para clasificar objetos en diferentes contenedores, mientras que en nuestro proyecto propuesto la clasificación servirá para la automatización del sistema de embotellamiento.

W. Nieto, J Mora y E. Moncayo [8]. El proyecto se desarrolló utilizando un Robot Manipulador Scorbot-ER 4u para facilitar el proceso de envase de dos

tipos de líquidos diferentes, en botellas clasificadas por color y almacenadas de la misma forma. Para su implementación utilizaron el Robot Manipulador Scorbot-ER 4u, dos sensores de proximidad, una banda transportadora, dos motobombas alimentadas por 12VDC los mismos que inyectaron los líquidos en las botellas respectivas. El funcionamiento de tal proyecto consiste en que los envases son transportados por una banda de caucho pasando por dos sensores de proximidad los mismos que serán los que indiquen el color del envase, una vez identificado el color del envase este es seleccionado por el brazo robótico que según su color lo transporta hasta el lugar de llenado de uno de los dos líquidos. En la Figura 1-8 se muestra el esquema completo.



Fig. 1-8: Robot Manipulador Scorbot-ER 4u para el proceso de dos líquidos diferentes [8]

Este proyecto utilizó sensores de proximidad para determinar el color y el brazo robot como clasificador para el llenado, mientras que el proyecto planteado en este informe será con procesamiento digital de imágenes para determinar la forma, y por medio de un sistema de automatización se realizará el llenado, ahorrando así más tiempo que utilizando un brazo robot.

Gavilénez F, Héctor M. y otros [9]. El proyecto trata de un sistema de control de calidad para el llenado de botellas de vidrio mediante la ayuda del programa

LabView y el toolkit de visión artificial. El sistema consta de una banda transportadora que permite el movimiento de botellas hasta una cámara, la misma que obtiene las imágenes de cada una de las botellas para su posterior análisis. En la Figura 1-9 se muestra el esquema completo.

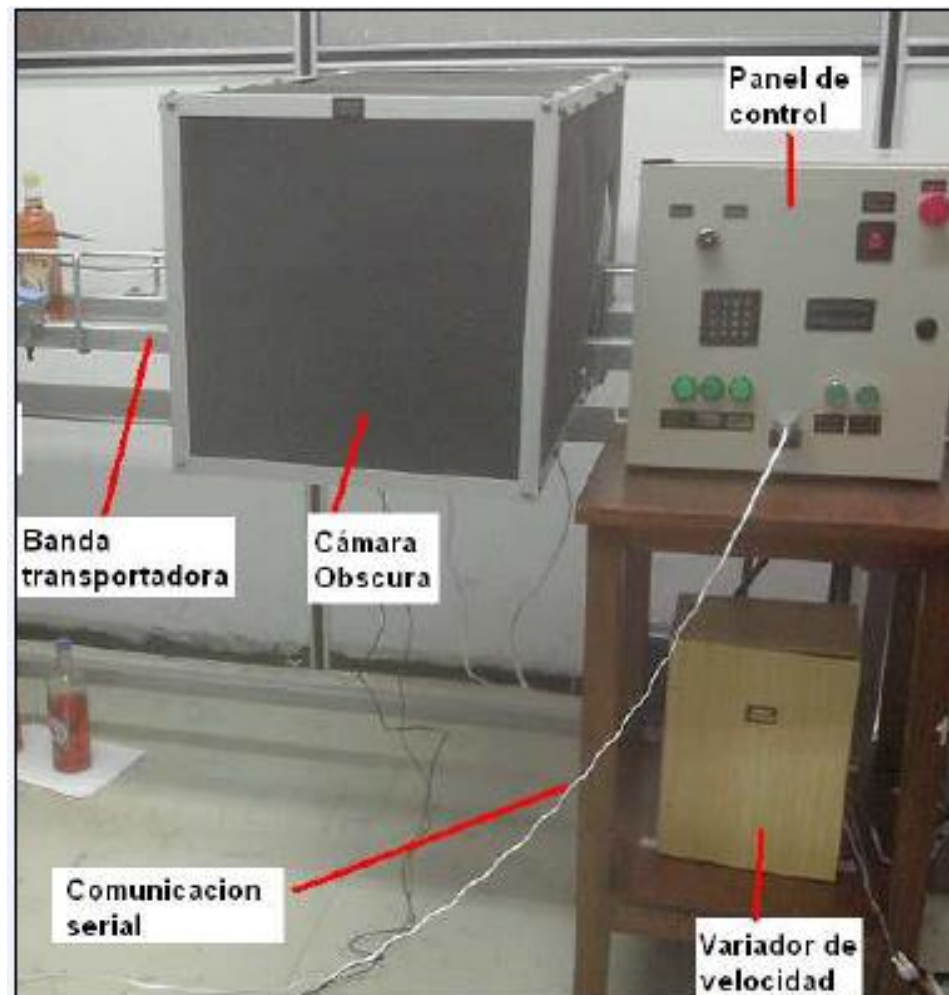


Fig. 1-9: Sistema de control de calidad para el llenado de botellas de vidrio [9]

Este proyecto utilizó el programa LabView y el toolkit de visión artificial para el control de calidad de botellas de vidrio, mientras que el proyecto planteado en este informe será con redes neuronales y podrá ser útil para botellas de plástico.

CAPÍTULO II: FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Este segundo capítulo está enfocado a tratar aspectos teóricos del procesamiento digital de imágenes así como también las ecuaciones matemáticas de la red neuronal para la identificación del tipo de botella.

2.1 Fundamentos de imágenes digitales

La historia se remonta a la década de los 60 y está directamente ligada con el desarrollo y evolución de las computadoras. Su progreso ha ido de la mano con el desarrollo de las tecnologías de hardware, ya que requiere un alto poder y recursos computacionales para almacenar y procesar las imágenes. De igual manera el desarrollo de los lenguajes de programación y los sistemas operativos han hecho posible el crecimiento continuo de aplicaciones relacionadas al procesamiento de imágenes, tales como: imágenes médicas, satelitales, astronómicas, geográficas, arqueológicas, biológicas, aplicaciones industriales, entre otras [10].

Una imagen digital a colores está formada por 3 matrices de $M \times N$ elementos numéricos cuyos valores posibles van del 0 (negro) al 255 (blanco), siendo este número la intensidad luminosa en cada una de las bandas espectrales del RGB (Rojo, Verde, Azul), de cada punto o píxel, a diferencia de las imágenes en escala de grises, las imágenes a color requieren de la combinación de las 3 bandas de color, para representar el color de un píxel. [11] En la Figura 2-1 se encuentra un ejemplo de lo explicado.



(a)

R=255	R=255	R=255	R=255	R=255
G=0	G=0	G=0	G=0	G=0
B=0	B=0	B=0	B=0	B=0
R=0	R=0	R=0	R=0	R=0
G=255	G=255	G=255	G=255	G=255
B=0	B=0	B=0	B=0	B=0
R=0	R=0	R=0	R=0	R=0
G=0	G=0	G=0	G=0	G=0
B=255	B=255	B=255	B=255	B=255
R=255	R=255	R=255	R=255	R=255
G=255	G=255	G=255	G=255	G=255
B=255	B=255	B=255	B=255	B=255
R=0	R=0	R=0	R=0	R=0
G=0	G=0	G=0	G=0	G=0
B=0	B=0	B=0	B=0	B=0

(b)

Fig.2-1: (a) Imagen a color y (b) matriz representativa (0=negro y 255=blanco en cada una de las bandas espectrales RGB) [11]

Las imágenes digitales se crean formando una retícula rectangular formada por celdillas. Cada una de las celdillas recibe el nombre de píxel. Este nombre proviene de la expresión que se obtiene al unir las palabras inglesas *picture* y *element*. Los píxeles son las unidades de color que componen la imagen. Un píxel no tiene una medida concreta, no se puede decir si mide 1 mm. o 1 cm. o 1 m., simplemente es la medida de división de una retícula en celdillas. En la Figura 2-2 se puede ver los cuadrados que se forman por la ampliación de la zona marcada, dichos cuadrados son los píxeles

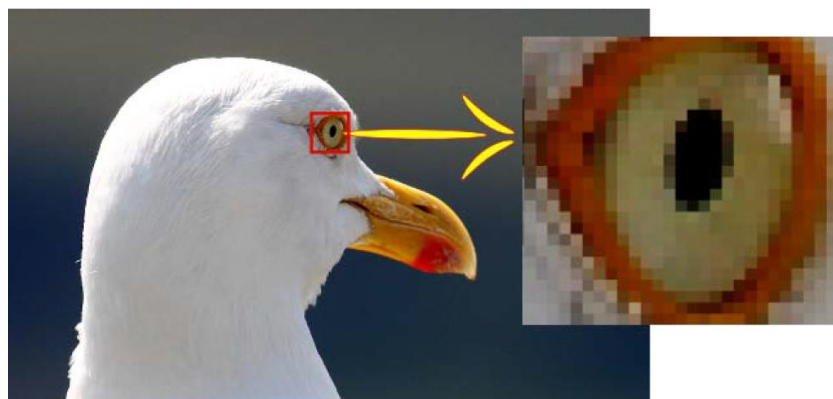


Fig. 2-2 Visualización de los píxeles [11]

Una imagen digital está formada por una matriz de píxeles (**a** x **b** x **c**), donde **a** y **b** representan la anchura y altura, **c** es la profundidad de color o profundidad de bit, se puede decir que es la tercera dimensión de la matriz, la que permite que cada píxel pueda tener un número determinado de colores distintos.

La profundidad de píxel es una unidad de medida binaria porque cada píxel está formado por bits. Cuando se dice que la profundidad de píxel es de 1 bit, la imagen solamente tiene dos colores o dos niveles de gris representados por los valores 0 y 1; por ejemplo: solamente puede ser o blanco o negro. Esto se puede apreciar en la Figura 2-3.

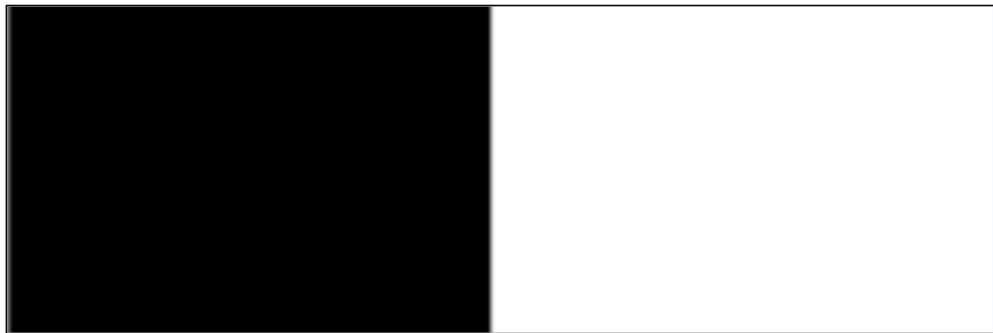


Fig. 2-3 Imagen de 1bit, 2 colores [11]

Una profundidad de píxel de 2 bits permite que cada píxel pueda tener 4 colores distintos o 4 niveles distintos de grises, como se puede ver en la Figura 2-4.



Fig. 2-4 Imagen de 2 bits – 4 colores [11]

Si la profundidad del píxel es de 16 bits se puede llegar a 65 536 colores distintos en cada píxel, tal como se muestra en la Figura 2-5.

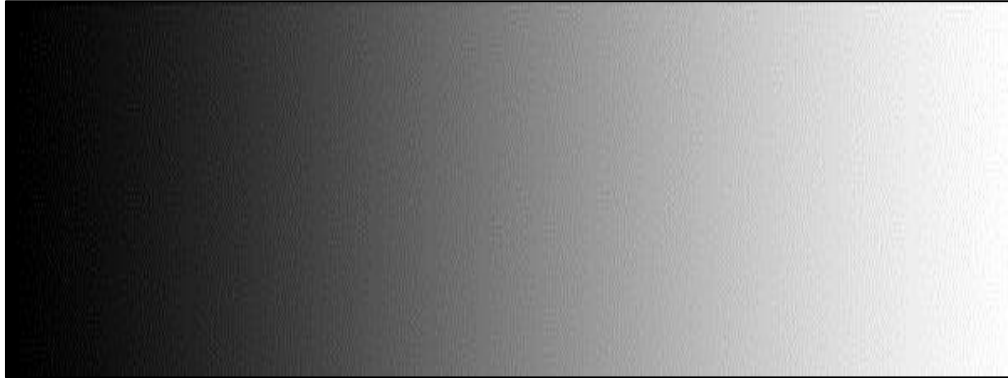


Fig. 2-5 Imagen de 16 bits – 65 536 colores [11]

Cada píxel solamente puede ser de un color, cuando se dice que una imagen es de 256 colores, se quiere decir que cada píxel puede tomar uno de esos 256 colores.

Si la profundidad es de 24 bits, se tiene la posibilidad de manejar millones de colores con la combinación de los tres primarios: rojo (red), verde (green) y azul (blue), es el llamado modo RGB. Cada canal de color tiene 8 bits para controlar cada color, por lo tanto, los colores que se puede obtener son $256 \times 256 \times 256 = 16.777.216$, por eso se llama "millones de colores" y se conoce como color real.

Con esta cantidad de colores es suficiente para que el ojo humano perciba las imágenes con calidad fotográfica.

El procesamiento digital de imágenes se refiere a procesar las imágenes del mundo real de manera digital por medio de un computador. Es un tema muy amplio, en el que se incluyen estudios de física, matemáticas, ingeniería eléctrica, computación. Estudia los fundamentos conceptuales de la adquisición y despliegue de imágenes y con detalle los fundamentos teóricos y algorítmicos del procesamiento como tal.

La Visión Artificial puede ser definida como los procesos de obtención y caracterización de información de imágenes. Estos procesos pueden ser subdivididos en

cinco áreas principales y están agrupados de acuerdo a la complicación y delicadeza que lleva su implementación [12], tal como se aprecia en la Figura 2-6.

Procesos del PDI
1. Captura/adquisición
2. Preprocesamiento
3. Segmentación
4. Descripción
5. Reconocimiento

Fig.2-6: Niveles del procesamiento digital de imágenes (PDI) [12]

- La captura o adquisición es el proceso a través del cual se obtiene una imagen digital utilizando un dispositivo de captura como una cámara digital, video cámara, escáner, satélite, etc.
- El preprocesamiento incluye técnicas tales como la reducción del ruido, realce del contraste, realce de ciertos detalles, o características de la imagen.
- La segmentación es el proceso que divide una imagen en objetos que sean de nuestro interés de estudio.
- La descripción es el proceso que obtiene características convenientes para diferenciar un tipo de objeto de otro, como: la forma, el tamaño, área, etc.
- El reconocimiento es el proceso que identifica los objetos, como por ejemplo: una llave, un tornillo, moneda, coche, etc. [12]

2.2 Redes Neuronales Artificiales (RNA)

Las redes neuronales están inspiradas en el comportamiento del cerebro humano. Esto significa que cuando se desarrolla un modelo de una red neuronal se está tratando de imitar el comportamiento del cerebro humano. Una red neuronal artificial está

compuesta por un conjunto de elementos que imitan los componentes neuronales biológicos, se puede decir que están compuestas por neuronas artificiales. [13].

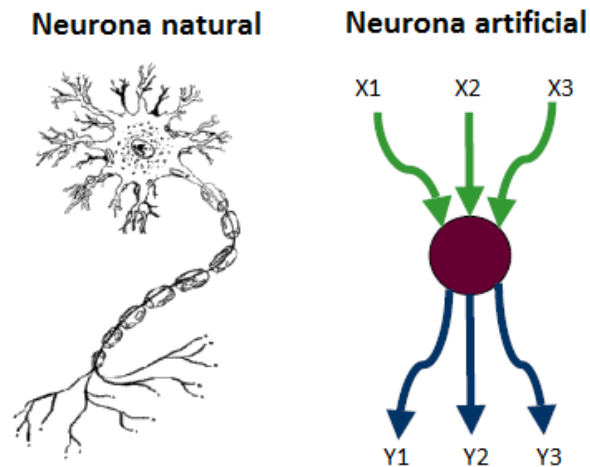


Fig.2-7: Neurona natural y artificial [13]

En la Figura 2-7 se puede apreciar la similitud entre una neurona natural y la artificial. De manera general las redes neuronales tienen tres características principales [13]:

- La característica de aprendizaje se refiere a que una red neuronal tiene la capacidad de almacenar conocimiento por medio de un proceso de entrenamiento. Este conocimiento es almacenado por los pesos de las conexiones entre las neuronas que conforman la red [13].
- La generalización significa que se pueden obtener salidas razonables cuando se usan entradas diferentes a las utilizadas durante el proceso de entrenamiento [13].
- La característica de adaptabilidad se refiere a que una red neuronal puede ser reentrenada para funcionar adecuadamente ante cambios en el medio ambiente [13].

2.3 Estructura básica de una RNA

La estructura de una RNA está determinada por el número de capas o niveles, el número de neuronas por nivel, el patrón de conexión y el flujo de información.

En una RNA multicapa la distribución de las neuronas se lleva a cabo formando capas o niveles con un número determinado de éstas y según el lugar en donde se encuentren se clasifican en tres tipos [13], tal como se aprecia en la Figura 2-8.

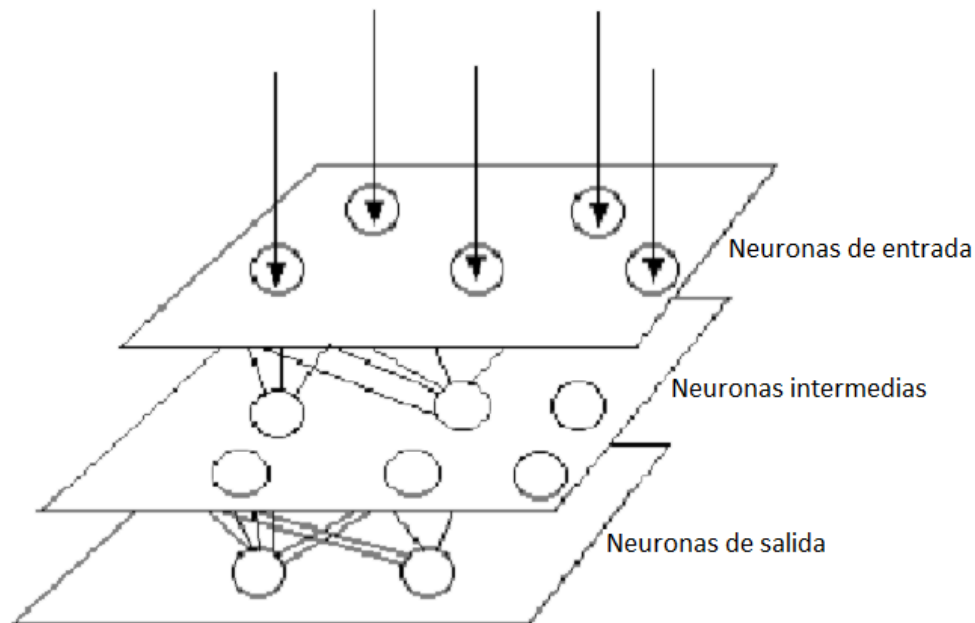


Fig. 2-8: Red neuronal [13]

Neuronas de entrada: Reciben señales desde el entorno, las que pueden ser provenientes de sensores o de otros sectores de sistema.

Neuronas intermedias u ocultas: Aquellas cuyas entradas y salidas se encuentran dentro del sistema, sin contacto con el exterior.

Neuronas de salida: Envían la señal fuera del sistema. Pueden controlar directamente otros sistemas [13].

2.4 Red Neuronal Multicapa

En las redes multicapa (de 2 o más capas), las neuronas se encuentran agrupadas en varias capas. Normalmente, las neuronas de una capa oculta reciben información de la capa anterior más próxima a la entrada de la red, y transmiten la información procesada a las neuronas de una capa posterior más próxima a la salida de la red. Este tipo de conexión es denominada conexión hacia adelante o *feed forward* [13].

La red neuronal multicapa puede tener conexiones hacia adelante y hacia atrás. En una red con conexiones hacia adelante, toda la información se propaga hacia adelante a través de las capas que conforman la red. En el caso de una red con conexión hacia adelante-atrás, cuando la red se encuentra en funcionamiento la información es transferido hacia adelante por medio de conexiones tipo *feed forward* y hacia atrás a través de conexiones tipo *feedback* [13].

Para aplicar las redes neuronales primero la cámara captura la imagen a colores y luego es llevada a escala de grises, para ello existen filtros matemáticamente simples para convertir imágenes de color a imágenes grises. En la Figura 2-9 se muestran los resultados de un filtro para la conversión de una imagen de color a una imagen en escalas de grises.

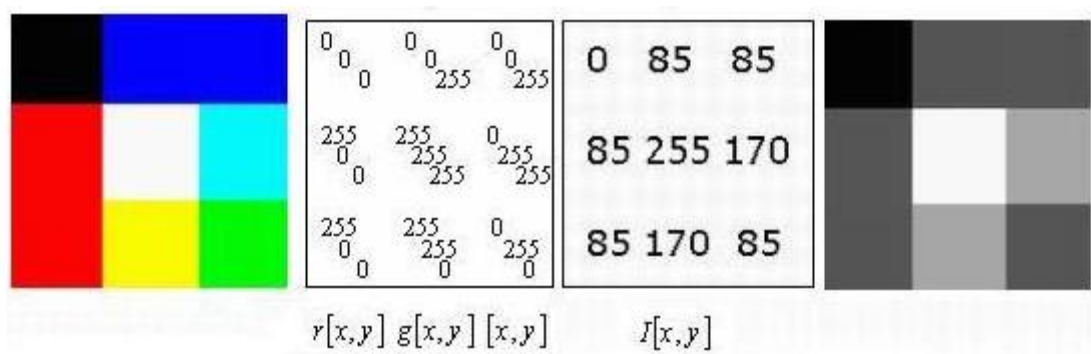


Fig. 2-9: Conversión a escala de grises [13]

Para esa conversión se utiliza la siguiente ecuación (1)

$$I[x, y] = \frac{r[x, y] + g[x, y] + b[x, y]}{3} \quad (1)$$

El filtro genera la escala gris $I [x,y]$, calculando el promedio de las intensidades en los canales $r[x,y]$, $g[x,y]$ y $b[x,y]$. Este filtro:

No afecta los pixeles negros o blancos de la imagen de color.

Convierte al rojo, al verde y al azul a la misma escala de grises ($I = 85$).

Convierte al amarillo y al magenta a la misma escala de grises ($I = 170$). [13]

Este método aplicado a una botella se puede apreciar en la Figura 2-10,

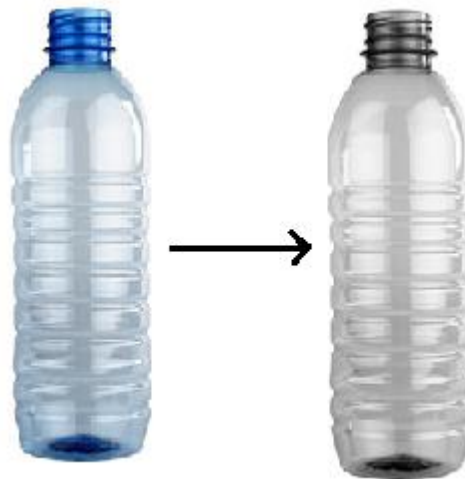


Fig.2-10: Conversión de la botella a escala de grises. Fuente: Propia

Se debe tener en cuenta que la cámara captura las imágenes con una resolución de 640×480 pixeles ó 307200 pixeles, de modo que habrá 307200 entradas causando que el procesamiento de imágenes se vuelva muy lento, por esta razón es necesario reducir la cantidad de pixeles. Se ve conveniente reducirlo a 20×20 pixeles por ser múltiplo de 640×480 , además de tener el tamaño suficiente para la identificación de la botella (ver Figura 2-11).

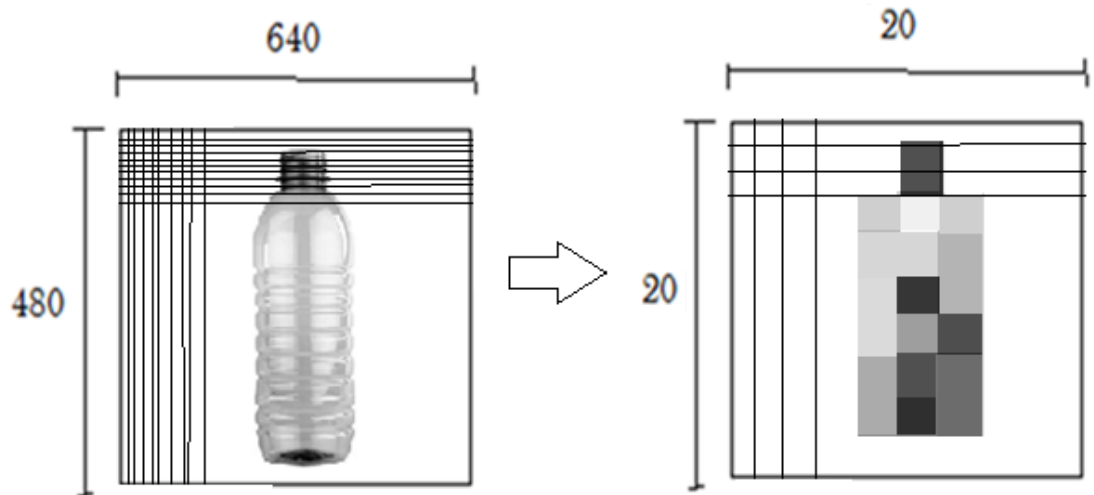


Fig.2-11: Reducción de 640x480 pixeles a 20x20 pixeles. Fuente: Propia

Para reducir la imagen a 400 pixeles primero se realiza el siguiente cálculo (2).

$$\frac{640}{32} = 20 \quad y \quad \frac{480}{24} = 20 \quad (2)$$

La división 640/32 indica que por cada 32 pixeles se forma un pixel y la división 480/24 por cada 24 pixeles.

En la Figura 2.12 se observa el algoritmo utilizado en el programa MatLab para la reducción de 640x480 pixeles a 20x20:

```

1. Iz = imread('1.jpg','jpg')
2. ii = 1;
3. for I = 1:24:480
4.     jj = 1;
5.     for J = 1:32:640
6.         im = Iz(I:I+23,J:J+31);
7.         im = sum(sum(im))/400;
8.         Inueva20(ii,jj) = round(im);
9.         jj = jj + 1;
10.    end
11.    ii = ii + 1;
12.end

```

Fig.2-12: Algoritmo utilizado para la reducción de pixeles.

Línea 1: El comando “imread” lee la imagen de la botella representada por el archivo 1.jpg en escala de grises, y la almacena en la matriz Iz. Dicha imagen es de 640x480.

Línea 2: Condición inicial.

Línea 3: Este primer condicional “for” cuenta las filas de la matriz Iz en grupos de 24, hasta llegar a la fila 480. $I=1, 25, 49, \dots, 457$.

Línea 4: Condición inicial.

Línea 5: Este Segundo condicional “for” cuenta las columnas de la matriz Iz en grupos de 32, hasta llegar a la columna 640. $J=1, 33, 65, \dots, 609$.

Línea 6: Se crea la matriz im de 32x24, dicha matriz a lo largo de todo el proceso se crea 400 veces. Es decir cada valor de I con cada valor de J.

Línea 7: Se suma los elementos de la matriz im y a dicho resultado se le divide entre 400 porque la matriz resultante es de 20x20.

Línea 8: El redondeo del resultado anterior se va almacenado en la matriz Inueva20 y de acuerdo a la actualización de jj é ii , los elementos de dicha matriz se irán almacenando de la siguiente manera: $Inueva20_{11}; Inueva20_{12}; Inueva20_{13}; \dots; Inueva20_{120}; Inueva20_{21}; Inueva20_{22}; Inueva20_{23}; \dots; Inueva20_{220}; Inueva20_{31}; Inueva20_{32}; Inueva20_{33}; \dots; Inueva20_{320}; \dots; Inueva20_{2020}$.

Línea 9: Actualización del número de columna de la matriz Inueva20.

Línea 10: Fin del segundo condicional “For”. Cada vez que termina este segundo “for” se ha llenado una fila de la matriz Inueva20

Línea 11: Actualización del número de fila de la matriz Inueva20.

Línea 12: fin del primer condicional “For”. Al finalizar por completo el conteo de este primer “for” se habrán llenado todas las filas y columnas de la matriz Inueva20.

Como resultado de todo el proceso se obtiene la matriz 20x20, “Inueva20”, en escala de grises.

Luego, la figura debe ser llevada a blanco y negro, para ello se usa la siguiente ecuación (3):

$$A_{[x,y]} = 255 \times \text{Round} \left(\frac{I_{[x,y]}}{255} \times 0.99 \right) \quad (3)$$

Se considera un umbral de 99%. El valor de $I_{[x,y]}$ hallada en la ecuación (1), dividido entre 255 y multiplicado por el umbral debe ser redondeado y multiplicado por 255. De este modo se tendrán solo dos valores para $A_{\{x,y\}}$, 255 ó 0. Si $A_{\{x,y\}} = 255$ el pixel toma el color negro y si $A_{\{x,y\}} = 0$ el pixel será de color blanco. De este modo se podrá tener la imagen en blanco y negro tal como la Figura 2-13.

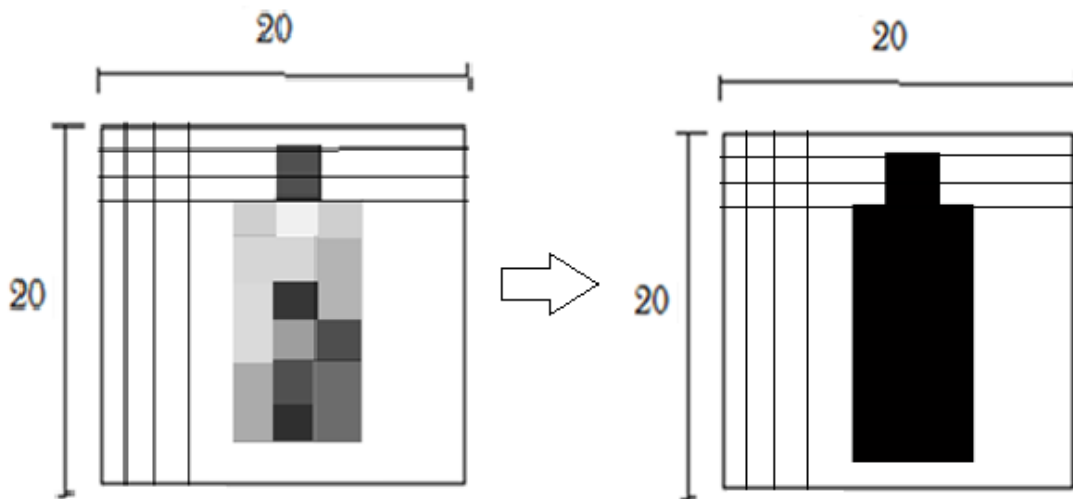


Fig. 2-13: Conversión de la imagen a blanco y negro.

Fuente: Propia

Con la ecuación (4) se obtiene la binarización de la imagen. Este proceso es realizado para cada botella antes de la puesta en marcha del sistema.

$$B[x,y] = -1 \times \frac{A_{[x,y]} - 255}{255} \quad (4)$$

Si: $A_{[x,y]} = 0$ $B_{[x,y]} = 1$ \longrightarrow

$A_{[x,y]} = 255$ $B_{[x,y]} = 0$ \longrightarrow

Ahora, tomando como ejemplo tres botellas de diferentes formas para analizar se deben definir el número de neuronas de salida e intermedias.

La cantidad de neuronas de salida es definida por el número de botellas que se quiere identificar. Por esa razón se tienen tres neuronas de salida.

El número de neuronas intermedias influye en el entrenamiento de la red neuronal para la identificación de la botella, para ello el número de neuronas intermedias debe ser igual o mayor al número de neuronas de salida para garantizar un correcto resultado. Además, a mayor número de neuronas intermedias aumenta el tiempo de análisis, por esa razón se tienen tres neuronas intermedias. Esto se puede apreciar en la Figura 2-13.

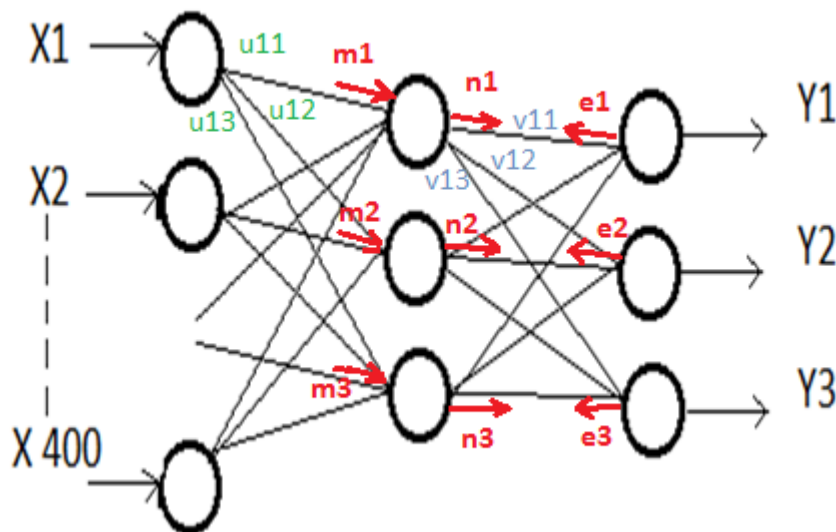


Fig.2-14: Red de neuronas de entrada, de salida e intermedias

. Fuente: Propia

Teniendo 400 entradas, estas irán a la capa intermedia dando origen a las variables m_1 , m_2 y m_3 según las siguientes ecuaciones (5):

$$\begin{aligned}
 m_1 &= u_{11} \cdot x_1 + u_{21} \cdot x_2 + u_{31} \cdot x_3 + u_{41} \cdot x_4 + \dots + u_{400\ 1} \cdot x_{400} \\
 m_2 &= u_{12} \cdot x_1 + u_{22} \cdot x_2 + u_{32} \cdot x_3 + u_{42} \cdot x_4 + \dots + u_{400\ 2} \cdot x_{400} \\
 m_3 &= u_{13} \cdot x_1 + u_{23} \cdot x_2 + u_{33} \cdot x_3 + u_{43} \cdot x_4 + \dots + u_{400\ 3} \cdot x_{400}
 \end{aligned} \quad (5)$$

La salida de la capa intermedia será hallada con la función de activación Sigmoidea tipo 1, dada por las siguientes ecuaciones por cada salida (6)

$$n_1 = \frac{1}{1 + e^{-m_1}}$$

$$n_2 = \frac{1}{1 + e^{-m_2}} \quad (6)$$

$$n_3 = \frac{1}{1 + e^{-m_3}}$$

Las ecuaciones de cada salida serian (7):

$$y_1 = v_{11} \cdot n_1 + v_{21} \cdot n_2 + v_{31} \cdot n_3$$

$$y_2 = v_{12} \cdot n_1 + v_{22} \cdot n_2 + v_{32} \cdot n_3 \quad (7)$$

$$y_3 = v_{13} \cdot n_1 + v_{23} \cdot n_2 + v_{33} \cdot n_3$$

Para el entrenamiento se utiliza el tipo Batch porque calcula cada derivada guardando cada resultado, después saca el promedio y actualiza, como lo indica la siguiente expresión (8):

$$J = \frac{1}{2} e_1^2 + \frac{1}{2} e_2^2 + \frac{1}{2} e_3^2 + \dots + \frac{1}{2} e_N^2 \quad (8)$$

$$J = \sum_{K=1}^N \frac{1}{2} (y_k - \bar{y}_k)^2$$

En este entrenamiento 'u' y 'v' se actualizan con información de todos los patrones. Por esa razón para hallar los valores de 'v' se tienen las siguientes ecuaciones (9):

$$v_{11} = v_{11} - \eta \frac{dJ}{v_{11}}$$

$$v_{12} = v_{12} - \eta \frac{dJ}{v_{12}} \quad (9)$$

$$v_{13} = v_{13} - \eta \frac{dJ}{v_{13}}$$

⋮

$$v_{33} = v_{33} - \eta \frac{dJ}{v_{33}}$$

Para hallar los valores de ‘u’ se tienen las siguientes ecuaciones (10):

$$u_{11} = u_{11} - \eta \frac{dJ}{u_{11}}$$

$$u_{12} = u_{12} - \eta \frac{dJ}{u_{12}}$$

$$u_{13} = u_{13} - \eta \frac{dJ}{u_{13}} \quad (10)$$

⋮

$$u_{33} = u_{33} - \eta \frac{dJ}{u_{33}}$$

En dichas ecuaciones “η” es el ratio de aprendizaje. Los valores de “η” deben estar entre 1 y 0, que serán asignados dependiendo del número de etapas.

- Si η es grande, hay mayor rapidez de convergencia pero puede divergir.
- Si η es pequeño, la convergencia es lenta pero segura.

Esto se puede apreciar en la Figura 2 -14:

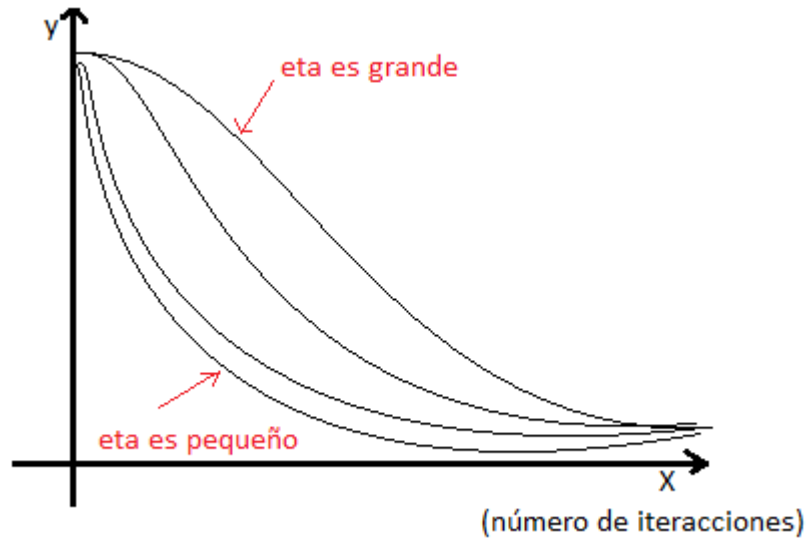


Fig.2 -15: Variación de los valores de eta “η”

Derivando la ecuación en razón de la variable ‘v’ se obtiene las siguientes expresiones (11):

$$\frac{dJ}{dv_{11}} = (y - \bar{y})n_1$$

$$\frac{dJ}{dv_{12}} = (y - \bar{y})n_1$$

$$\frac{dJ}{dv_{13}} = (y - \bar{y})n_1$$

$$\frac{dJ}{dv_{21}} = (y - \bar{y})n_2$$

$$\frac{dJ}{dv_{22}} = (y - \bar{y})n_2 \quad (11)$$

$$\frac{dJ}{dv_{23}} = (y - \bar{y})n_2$$

$$\frac{dJ}{dv_{31}} = (y - \bar{y})n_3$$

$$\frac{dJ}{dv_{32}} = (y - \bar{y})n_3$$

$$\frac{dJ}{dv_{33}} = (y - \bar{y})n_3$$

Derivando en razón de 'u' se obtiene las siguientes ecuaciones (12):

$$\frac{dJ}{du_{11}} = (y - \bar{y})v_{11} \cdot \frac{dn_1}{dm_1} \cdot x_1$$

$$\frac{dJ}{du_{12}} = (y - \bar{y})v_{21} \cdot \frac{dn_2}{dm_2} \cdot x_1 \quad (12)$$

$$\frac{dJ}{du_{13}} = (y - \bar{y})v_{31} \cdot \frac{dn_3}{dm_3} \cdot x_1$$

En la ecuación de arriba se muestran las tres primeras para la entrada X_1 . Las 400 entradas tendrán la misma combinación de variables, es decir 3x400 ecuaciones.

Derivando cada función se obtiene las siguientes expresiones (13):

$$\frac{dn_1}{dm_1} = n_1(1 - n_1)$$

$$\frac{dn_2}{dm_2} = n_2(1 - n_2) \quad (13)$$

$$\frac{dn_3}{dm_3} = n_3(1 - n_3)$$

Para optimizar el análisis de las redes neuronales, es necesario calcular los errores retropropagados, que es la resta de la salida obtenida con la salida deseada, tal como lo indica la siguiente ecuación (14):

$$e_1 = y_1 - \bar{y}_1$$

$$e_2 = y_2 - \bar{y}_2 \quad (14)$$

$$e_3 = y_3 - \bar{y}_3$$

Para el entrenamiento de las redes neuronales es también necesario obtener los valores ideales de los errores retropropagados, como se muestra en las siguientes ecuaciones (15):

$$\begin{aligned}\bar{e}_1 &= (v_{11} \cdot e_1 + v_{21} \cdot e_1 + v_{31} \cdot e_1) \cdot \frac{dn_1}{dm_1} \\ \bar{e}_2 &= (v_{12} \cdot e_2 + v_{22} \cdot e_2 + v_{32} \cdot e_2) \cdot \frac{dn_2}{dm_2} \\ \bar{e}_3 &= (v_{13} \cdot e_3 + v_{23} \cdot e_3 + v_{33} \cdot e_3) \cdot \frac{dn_3}{dm_3}\end{aligned}\tag{15}$$

CAPÍTULO III: DISEÑO DEL SISTEMA

En el presente capítulo se describe el funcionamiento de todo el sistema de forma detallada, como también las diferentes etapas por la que pasa la botella a lo largo del proceso desde la captura de la imagen hasta su clasificación.

3.1 Descripción del sistema

En la Figura 3-1, se indica una fotografía del módulo completo y de cada una de sus diferentes etapas. Primero se tiene la banda transportadora que es utilizada para llevar los diferentes tipos de botellas desde la captura de la imagen, que se realiza con una cámara web que se encuentra en un soporte de madera para mantenerse fija, hasta el inicio de la base circular giratoria, que permite llevar a la botella hacia su etapa de “llenado”, “desecho” (si fuera el caso de estar mal llenado ósea no cumplir con ninguno de los niveles de llenado ya establecidos, se retira la botella de la base circular por medio de una de las levas giratorias), “enchapado” (etapa en la cual se le coloca, sin presión, una tapa o chapa en el pico de la botella) y finalmente la “clasificación” etapa en la cual la botella llenada de manera correcta es retirada de la base circular por medio de una de las levas giratorias. Todo el sistema está manejado por la tarjeta de control que se encuentra en la parte trasera de los equipos y a su vez dicha tarjeta se encuentra gobernada por un PIC.

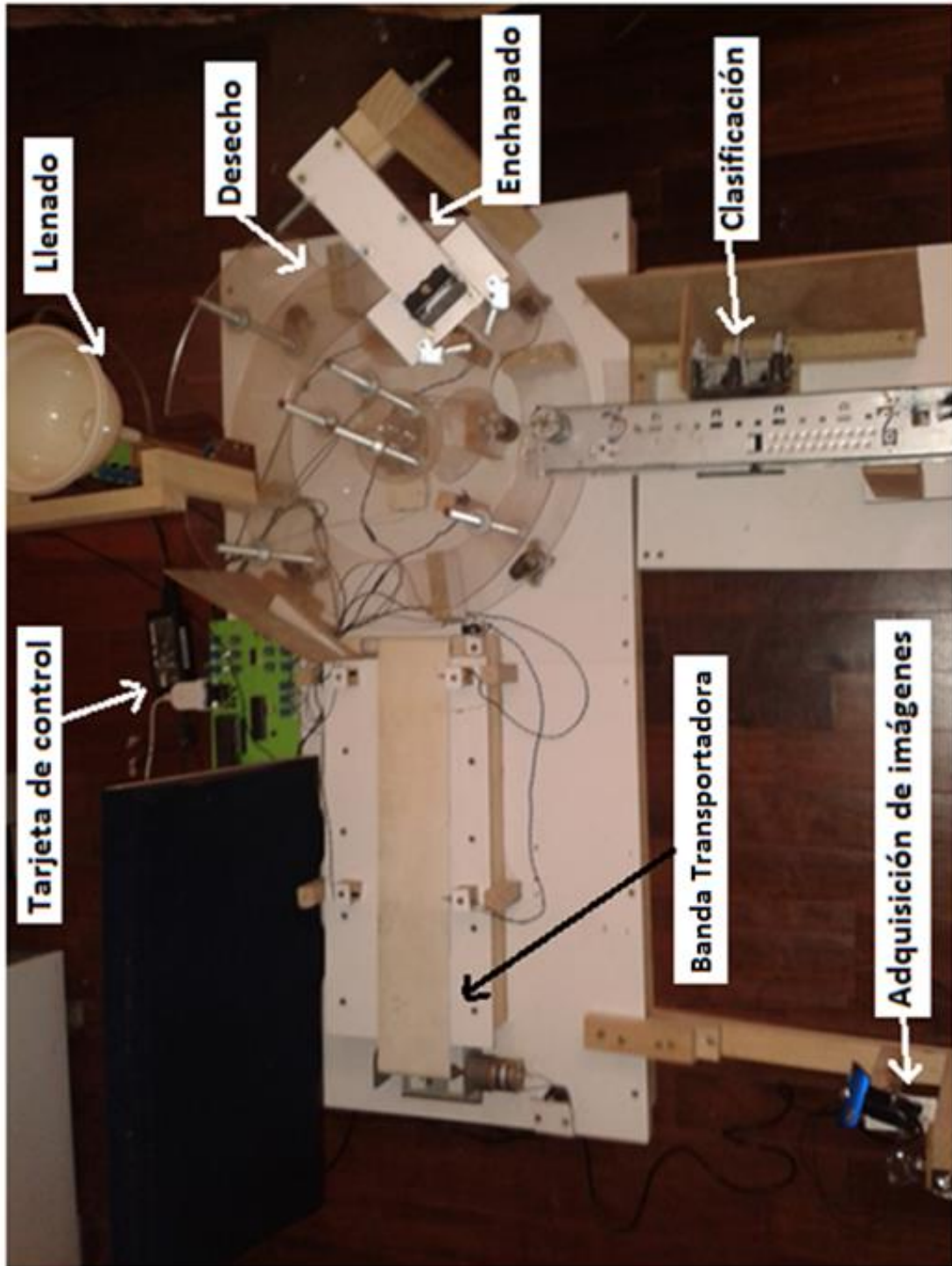


Fig. 3-1: Partes del Sistema.

Fuente: Propia

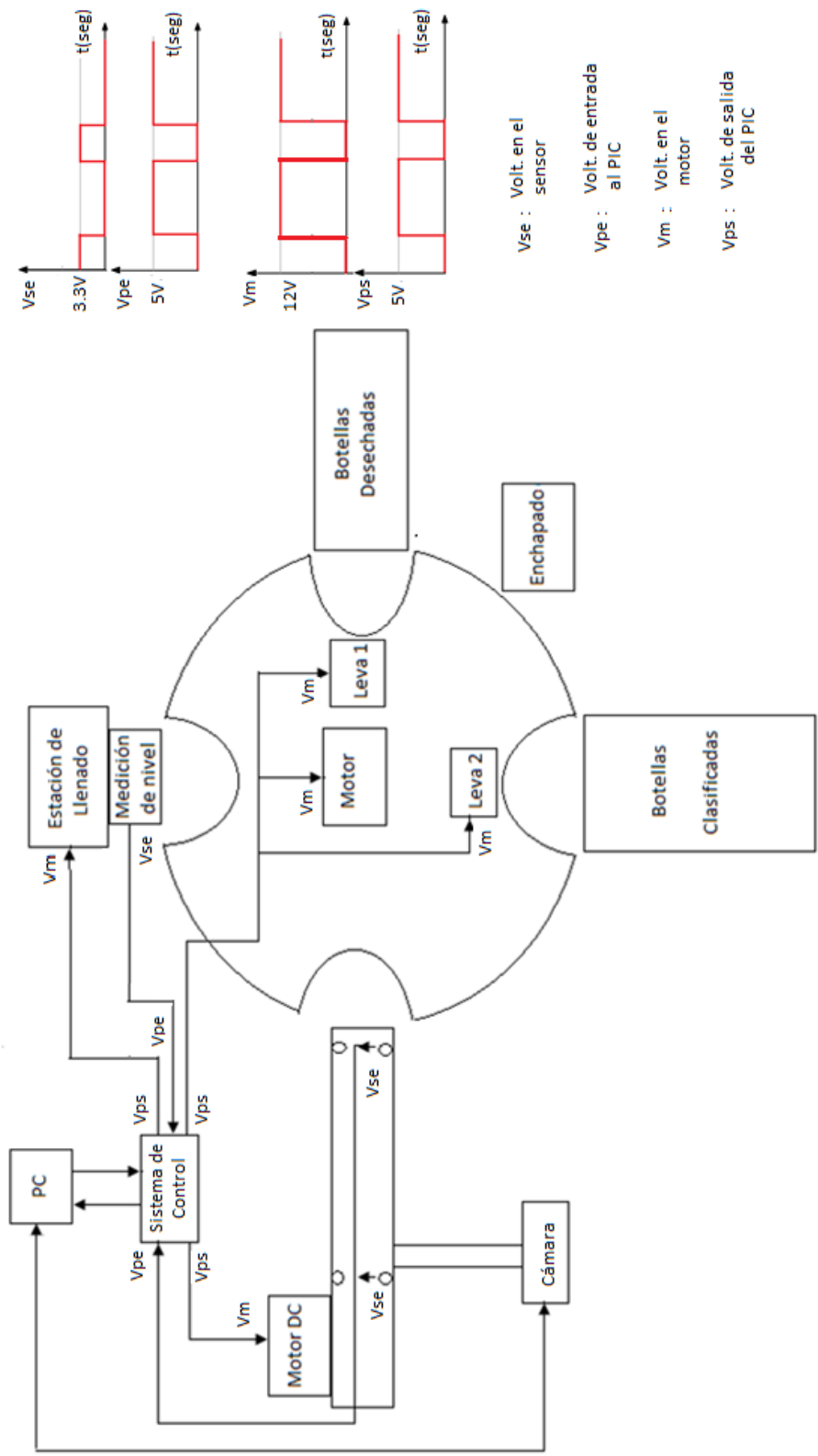


Fig. 3-2: Diagrama de bloques del Sistema.

Fuente: Propia

En la Figura 3-2 se puede apreciar el diagrama de bloques del Sistema donde se muestra las conexiones que tiene cada componente. El sistema de control recibe información de la PC que indica el tipo de botella, también recibe señales de los sensores que están en la banda transportadora que indican la posición de la botella, y los sensores que se encuentran en la estación de llenado informan si el nivel de llenado es el correcto. De acuerdo a la información recibida el sistema de control activa el motor de la banda transportadora para hacer avanzar la botella, también activa el motor de la base circular giratoria para llevar a las botellas a las estaciones de llenado, desecho, enchapado y selección. En la estación de llenado, el sistema de control activa los motores de llenado de acuerdo al tipo de botella, y en las estaciones de desecho y clasificación el sistema de control activa o mantiene apagados las levas de acuerdo al nivel de llenado.

El funcionamiento del sistema se puede apreciar en la Figura 3-3. El sistema comienza al activar la tarjeta de control, entonces todo el sistema se pone en sus condiciones iniciales. Primeramente se establece una conexión entre la PC y el PIC, luego en la PC se ingresa el número de botellas que se quiere analizar, seguidamente el motor de la faja se activa y se detendrá cuando la botella sea detectada por el sensor 1. Estando la botella en la posición correcta la cámara capturará la imagen y la PC identificará el tipo de botella que es (A, B ó C). Luego el motor de la faja se activará y se desactivará cuando sea detectada por el sensor 2. Estando la faja desactivada el motor de la base circular se activará para llevar a la botella hacia la fase de llenado. Luego de ser llenado, el sensor 3 medirá los niveles.

Si el llenado es muy alto (3) o insuficiente (2), el motor de la base circular se activará para llevar a la botella a la posición de desecho, en dicha posición la base circular se desactivará y se activará la leva 1 para retirar a la botella.

Si el llenado es el correcto, el motor de la base circular desplazará a la botella hacia la fase de clasificación. En ese transcurso de tiempo la botella será enchapada, luego cuando llegue a la parte de clasificación la base circular se desactivará y se activará la leva 2 para poner a la botella en el grupo de clasificados.

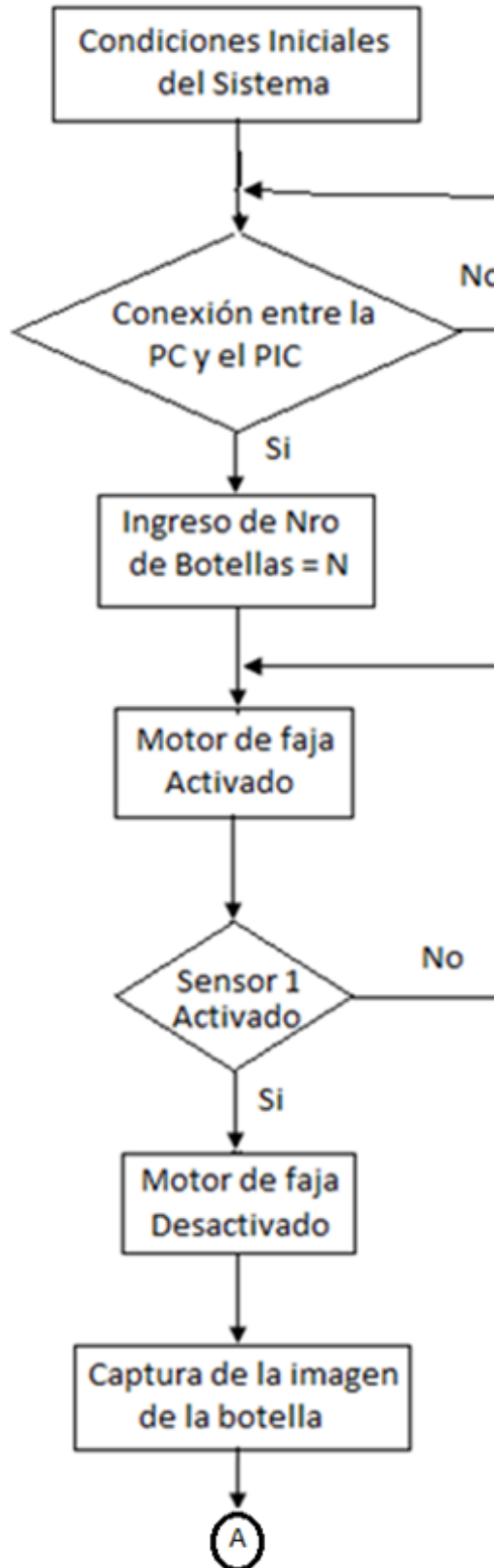


Fig. 3-3: Diagrama de Flujo del funcionamiento general del sistema.

Fuente: Propia

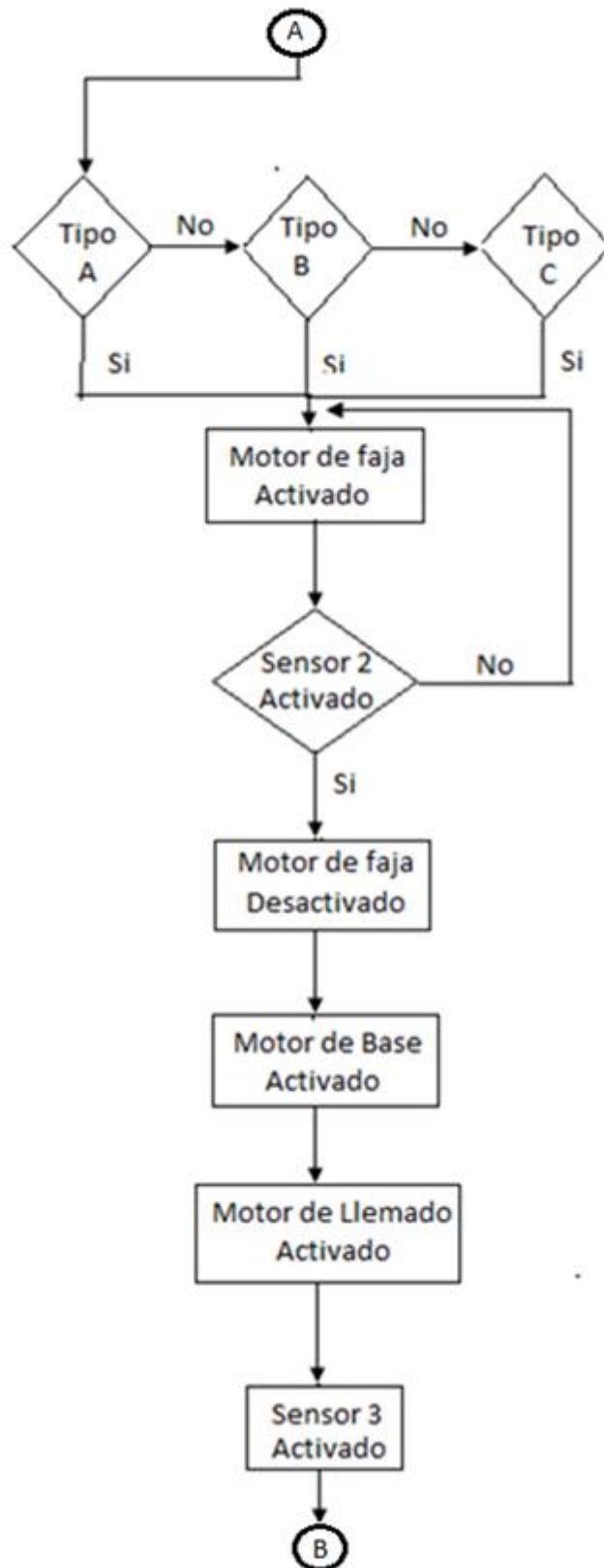


Fig. 3-3: Diagrama de Flujo del funcionamiento general del sistema.

Fuente: Propia

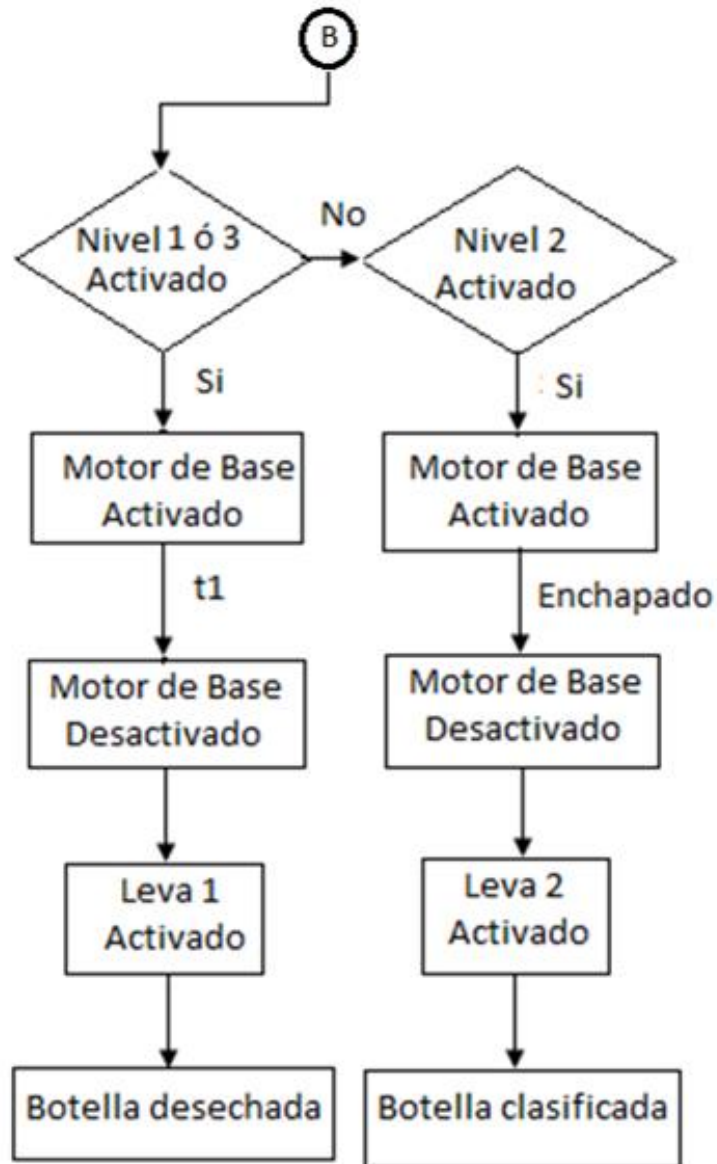


Fig. 3-3: Diagrama de Flujo del funcionamiento general del sistema.

Fuente: Propia

En el diagrama de tiempos de la Figura 3-4, se definen cuatro variables de tiempo:

t0: Captura y análisis de la imagen + transporte de la botella

t1: Giro de la rueda

t2: t0 + llenado de la botella

t3: t2 + tiempo estimado para el desecho

t4: t3 + clasificación de la botella

Inicialmente la botella 1 llega a la entrada de la rueda circular en un tiempo t0, luego la rueda gira en un tiempo t1 para que sea llevada a la fase de llenado. En un tiempo t2 el sistema empieza a analizar a la botella 2, lo lleva hasta la entrada de la rueda y seguidamente la botella 1 es llenada. Luego la rueda gira en un tiempo t1 para que la botella 1 pase a la fase de desecho y la botella 2 a la fase de llenado. En un tiempo t3 el sistema empieza a analizar a la botella 3 y lo lleva hasta la entrada de la rueda, seguidamente la botella 2 es llenada y la botella 1 es desechada si es que fue mal llenada. Luego la rueda gira en un tiempo t1 para que la botella 1 pase a la fase de clasificación, la botella 2 a la fase de desecho y la botella 3 a la fase de llenado. En un tiempo t4 el sistema empieza a analizar a la botella 4 y lo lleva hasta la entrada de la rueda, seguidamente la botella 3 es llenada, luego la botella 2 es desechada si es que fue mal llenada y la botella 1 es clasificada si es que no fue desechada en la fase anterior. De este modo las botellas pueden ir ingresando de forma constante.

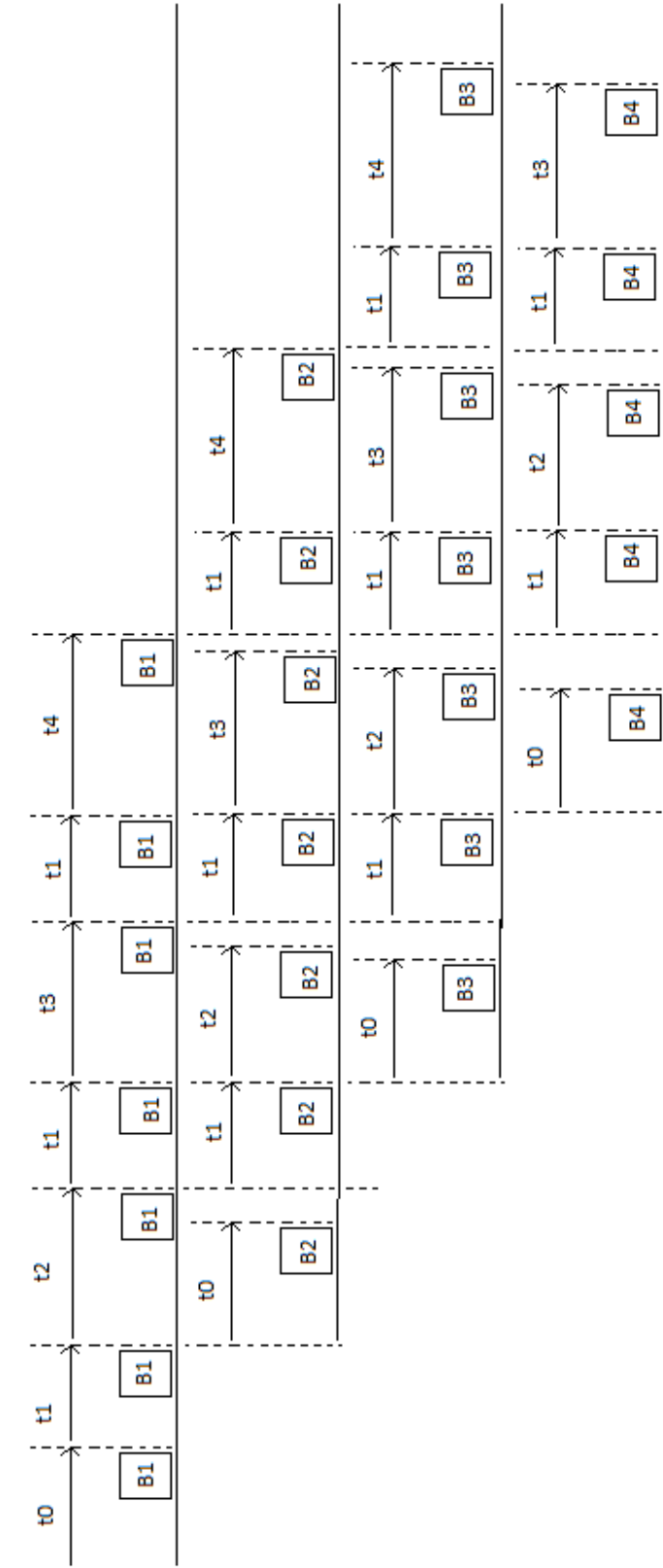


Fig. 3-4: Diagrama de tiempo del funcionamiento general del sistema.

Fuente: Propia

3.2 Procesamiento digital de imágenes

3.2.1 Comunicación entre la PC y el PIC

Como se puede ver en la Figura 3-5, el programa solicita ingresar el número de botellas (B), luego para establecer una conexión con el PIC, la PC le envía una solicitud (S) si el PIC lo recibe entonces le responde enviando la letra 'A'. Después asegurar la conexión con entre la PC y el PIC, el PIC envía la solicitud del análisis de la botella cuando la botella se encuentre en la posición correcta para hacer el análisis. Si la computadora recibe la señal, entonces se comienza el procesamiento digital de imágenes.

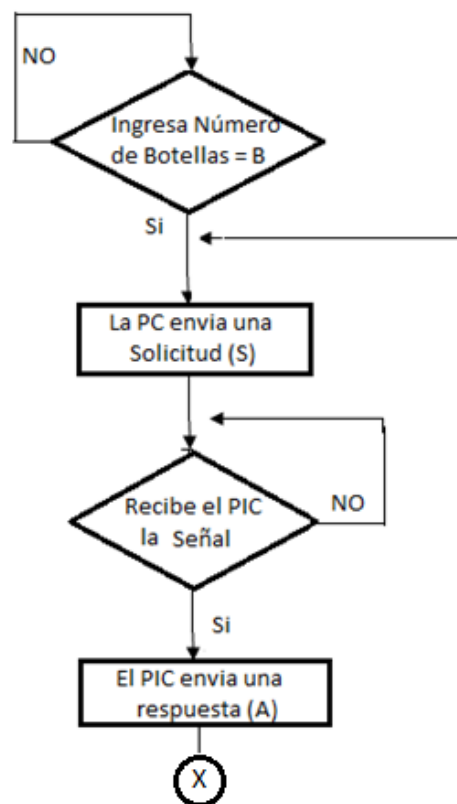


Fig.3-5: Comunicación entre la PC y el PIC.

Fuente: Propia

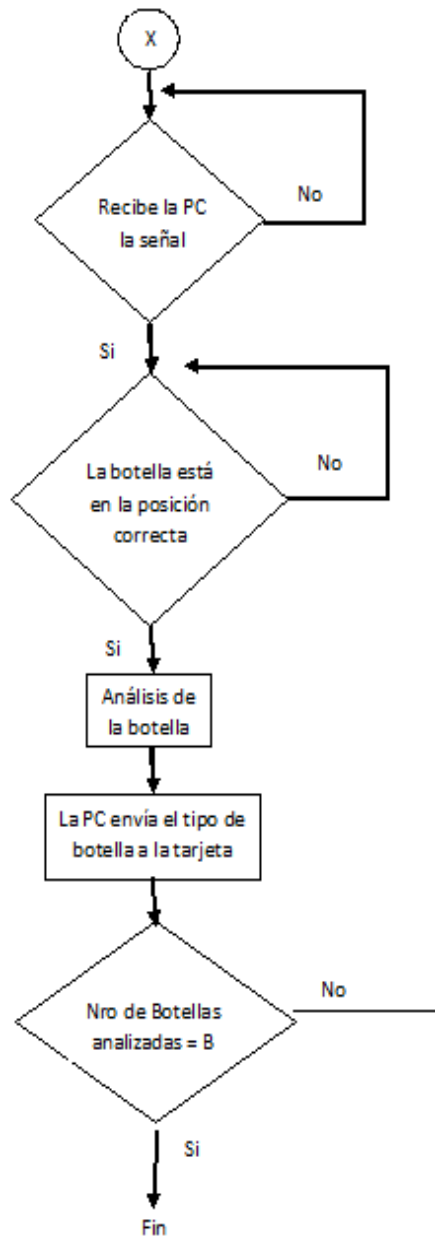


Fig.3-5: Comunicación entre la PC y el PIC.

Fuente Propia

3.2.2 Obtención de la forma de la botella

De acuerdo a la Figura 3-6, se puede observar que la cámara web está conectada a la computadora a través de un puerto USB y mediante algoritmos de Matlab de procesamiento de imagen se puede obtener la forma de la botella en el formato deseado (Matriz 20x20) y a blanco y negro, dicho proceso es realizado una sola vez para cada una de las tres botellas antes del funcionamiento del sistema, ya que primero es

necesario almacenar la información de cada botella que luego será utilizada para identificar la botella que ingrese cuando la red neuronal comience a funcionar.

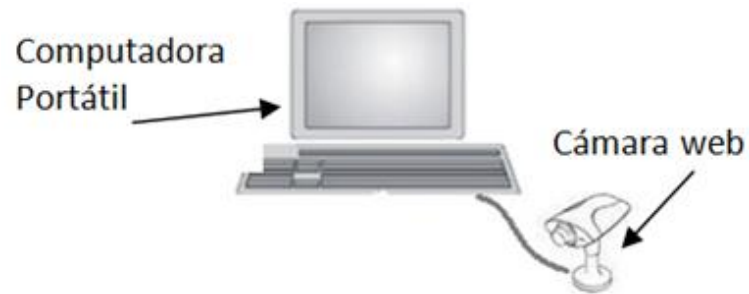


Fig. 3-6: Conexión entre la computadora y la cámara web.

Fuente: Propia

Para enviar la señal de la computadora al sistema de control, es necesario utilizar un cable Usb - puerto serial, tal como se indica en la Figura 3-7.



Fig. 3-7: Cable Usb a serial,

Fuente: Propia

La Figura 3-8 muestra botellas del mismo tamaño pero de diferentes formas que serán analizadas con el programa Matlab y de ese modo identificar las formas de las botellas.



Fig.3-8: Botellas de diferentes formas.

Fuente: Propia

Como se puede ver en la Figura 3-9, primero se captura la imagen y luego es pasada a escala de grises al eliminar la información del tono y la saturación de la imagen.



Fig.3-9: Conversión a escala de grises.

Fuente: Propia

Se debe tener en cuenta que la cámara captura las imágenes con una resolución de 640x480 píxeles ó 307200 píxeles, por esa razón es necesario reducir la cantidad de píxeles a 400 para disminuir el tiempo del proceso (ver Figura 3-10).

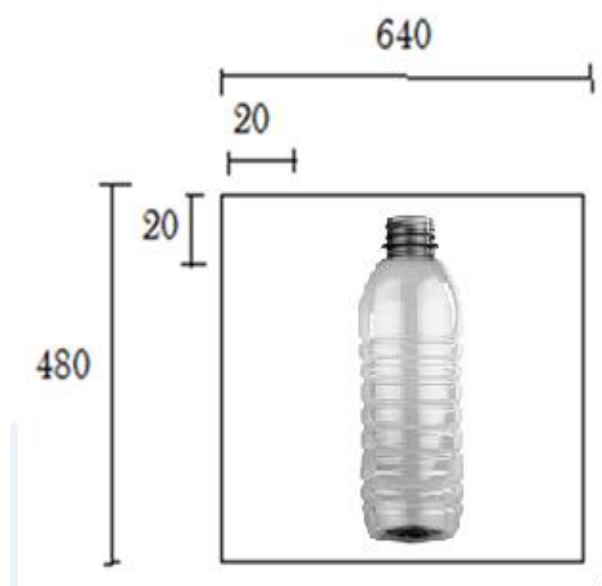


Fig.3-10: Medida de la imagen capturada por la cámara.

Fuente: Propia

Después que la imagen es reducida es representada por los valores 0 y 1, solamente por blanco y negro (ver Figura 3-11).



Fig.3-11: Imagen de botella en blanco y negro.

Fuente: Propia

Para la identificación de las tres botellas los datos de entrada y salida se pueden representar como se aprecia en la Figura 3-12.

X1 X2 X3 X400	Y1	Y2	Y3	
Datos	1	0	0	→ Botella 1
	0	1	0	→ Botella 2
	0	0	1	→ Botella 3

Fig. 3-12: Representación de las salidas de la Red Neuronal.

Fuente: Propia

Las salidas tienen los siguientes valores:

Botella 1: 1 0 0

Botella 2: 0 1 0

Botella 3: 0 0 1

Para mejorar el funcionamiento se agrega una neurona que tiene el valor igual a 1 (ver Figura 3-13):

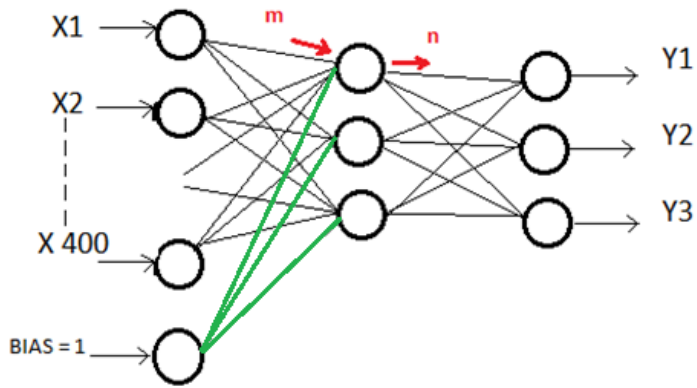


Fig. 3-13 Neurona Bias.

Fuente: Propia

La validación del sistema se puede apreciar en la Figura 3-14. Donde El Círculo rojo es la salida deseada y el asterisco azul es la salida real. Como ambos coinciden entonces la validación es correcta.

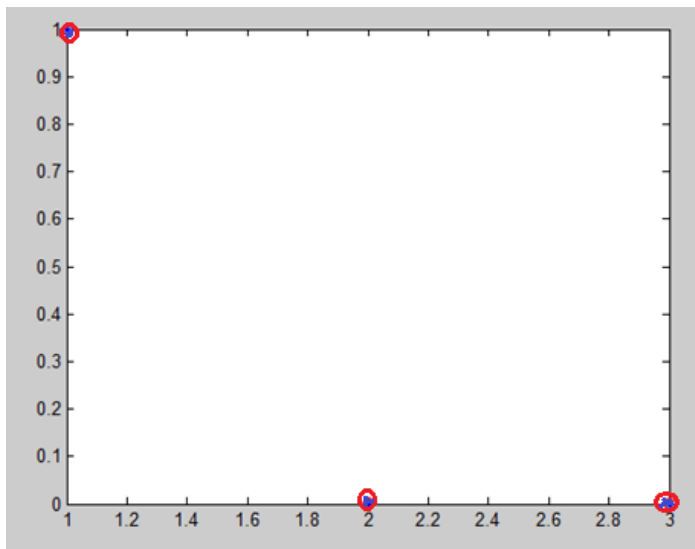


Fig. 3-14 Validación de la red neuronal.

Fuente: Propia

En la Figura 3-15 se muestra el error en función al número de iteraciones (7000). Para que la validación funcione correctamente la curva debe ser lo más pequeña posible.

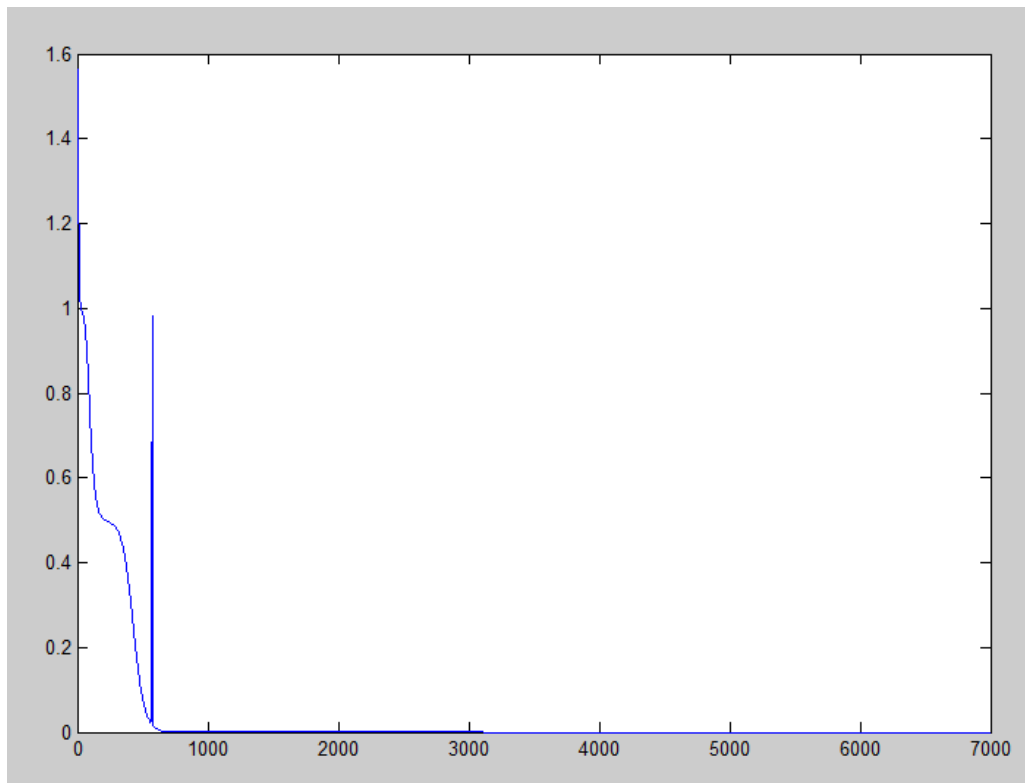


Fig. 3-15: El error en función del número de iteraciones de aprendizaje.

Fuente: Propia

De este modo se puede almacenar las características de cada botella y después pueden ser utilizadas para su identificación.

3.3 Sistema de control

Un microcontrolador es un circuito integrado o chip que incluye en su interior las tres unidades funcionales de una computadora: CPU, Memoria y Unidades de E/S, es decir, se trata de una computadora completa en un solo circuito integrado programable y se destina a gobernar una sola tarea con el programa que reside en su memoria. Sus líneas

de entrada/salida soportan el conexionado de los sensores y actuadores del dispositivo a controlar. [15]

Los microcontroladores negocian la velocidad y la flexibilidad para facilitar su uso. Debido a que se utiliza gran cantidad de espacio en el chip para incluir funcionalidad, como los dispositivos de entrada/salida o la memoria que incluye el microcontrolador, se ha de prescindir de cualquier otra circuitería [15]

El microcontrolador es un sistema cerrado. Todas las partes del computador están contenidas en su interior y sólo salen al exterior las líneas que gobiernan los periféricos. En la práctica cada fabricante de microcontroladores oferta un elevado número de modelos diferentes, desde los más sencillos hasta los más poderosos. Es posible seleccionar la capacidad de las memorias, el número de líneas de E/S, la cantidad y potencia de los elementos auxiliares, la velocidad de funcionamiento, etc [15].

Para el presente proyecto se utilizó el PIC 16F877A (Figura 3-15) por tener 40 pines que son suficientes para controlar los motores, el display y además permite recibir y transmitir las señales que vienen de la computadora a través del puerto paralelo.

40-Pin PDIP

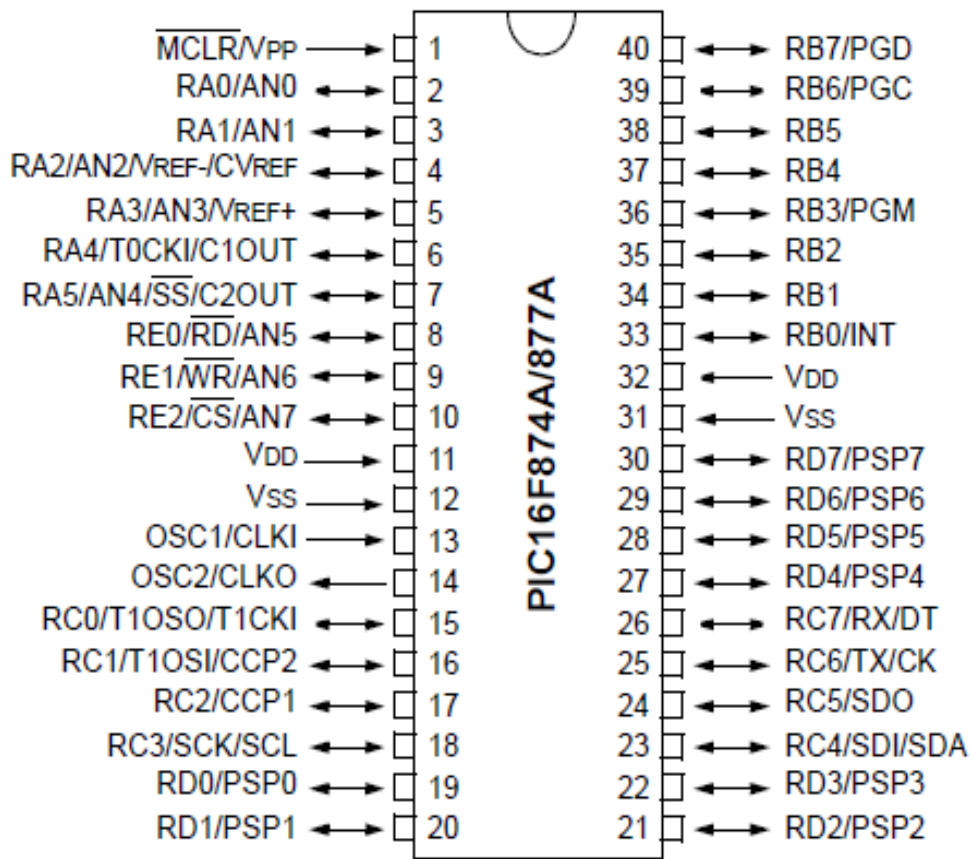


Fig. 3-16: PIC 16F877A [15]

Antes de la implementación física del sistema, primero se diseñó en el programa Proteus para así simular al microcontrolador con las diferentes partes del sistema, tal como se muestra en la Figura 3-16.

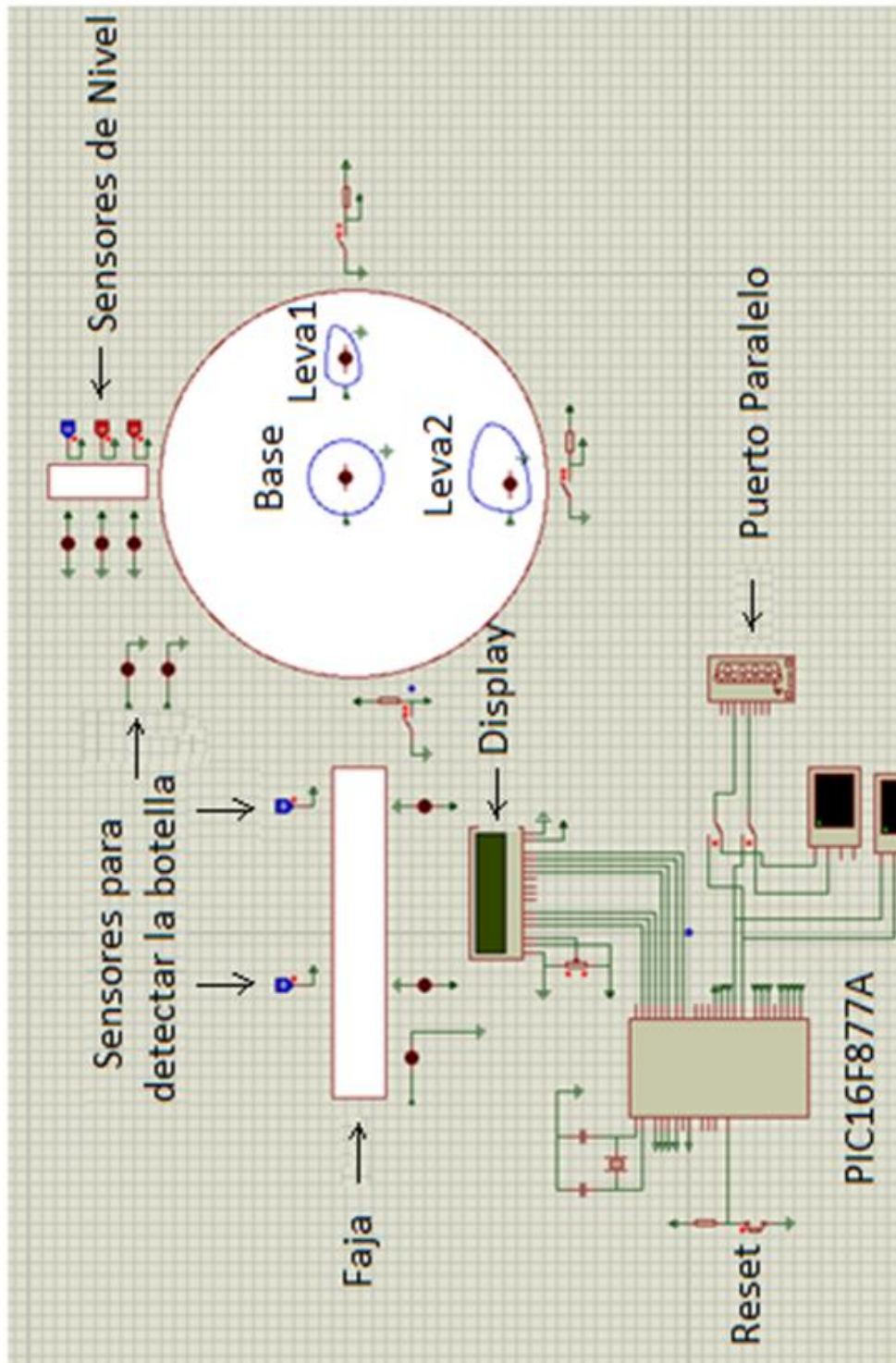


Fig. 3-17 Simulación del Microcontrolador.

Fuente: Propia

En la Figura 3-17 se puede observar:

- Puerto paralelo que permite la comunicación con la PC.
- Un display que sirve para transmitir mensajes sobre el proceso de embotellamiento
- Los diferentes sensores que están conectados en la banda transportadora y en la estación de llenado.
- La banda transportadora y la base circular giratoria junto son sus dos levass
- Botón para reiniciar el sistema.
- En la Figura 3-18 se puede apreciar la distribución de los pines a las diferentes partes ya mencionadas anteriormente.

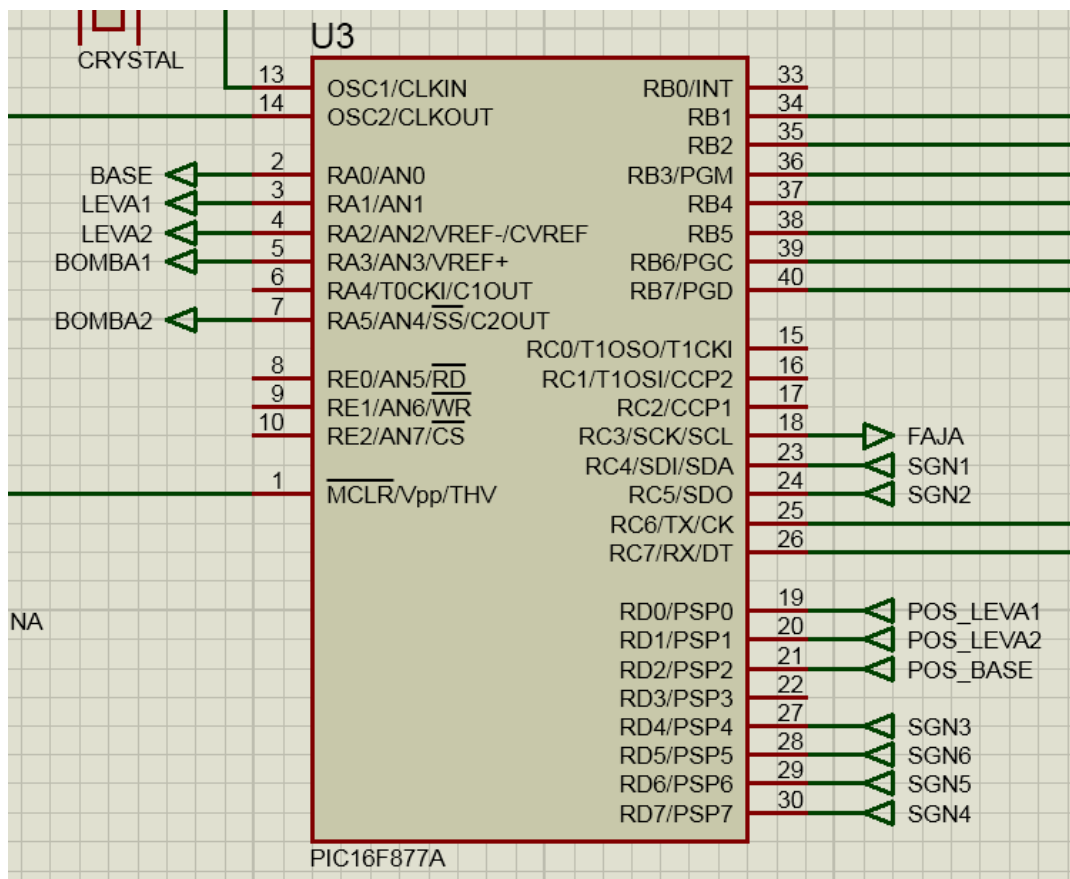


Fig. 3-18 Distribución de los pines del microcontrolador.

Fuente: Propia

El microcontrolador recibe señales de la PC y de sus sensores, así este puede activar y desactivar los motores para el correcto funcionamiento del sistema completo.

3.4 La banda transportadora

Las bandas y rodillos transportadores son elementos auxiliares de las instalaciones cuya misión es la de recibir un producto de forma más o menos continua y conducirlo a otro punto. Son aparatos que funcionan solos, intercalados en las líneas de proceso y que no requieren generalmente ningún operario que manipule directamente sobre ellos de forma continuada [16].

Se han inventado muchas formas para el transporte de materiales, materias primas, minerales y diversos productos, pero una de las más eficientes es el transporte por medio de bandas y rodillos transportadores, ya que estos elementos son de una gran sencillez de funcionamiento y una vez instalados en condiciones normales suelen dar pocos problemas mecánicos y de mantenimiento [16].

Las cintas transportadoras se usan como componentes en la distribución y almacenaje automatizados. Combinados con equipos informatizados de manejo de palés, permiten una distribución minorista, mayorista y manufacturera más eficiente, permitiendo ahorrar mano de obra y transportar rápidamente grandes volúmenes en los procesos, lo que ahorra costes a las empresas que envía o reciben grandes cantidades, reduciendo además el espacio de almacenaje necesario [16].

En el presente proyecto la banda transportadora funciona principalmente con un motor DC de 24 Volt con reductor de engranajes metálicos, el cual es el encargado de darle la movilidad suficiente a la banda para que este transporte a las botellas durante todo el proceso, dicho motor es manejado por el sistema de control.

En el recorrido de la botella sobre la banda transportadora, esta se encuentra con sensores que detectan su presencia para que la banda pueda detenerse, ya sea para capturar la imagen de la botella o para ser llevada a la base circular giratoria.

En el primer sensor la botella se detiene para poder capturar su imagen y saber qué forma posee, luego la banda se activa y cuando pase por el segundo sensor después de 2 segundos la banda se detiene para luego ser llevada a la base circular giratoria.

3.4.1 Partes de la banda transportadora

Los componentes estructurales de la banda transportadora se muestran en la Figura 3-19 y estos son sus componentes:

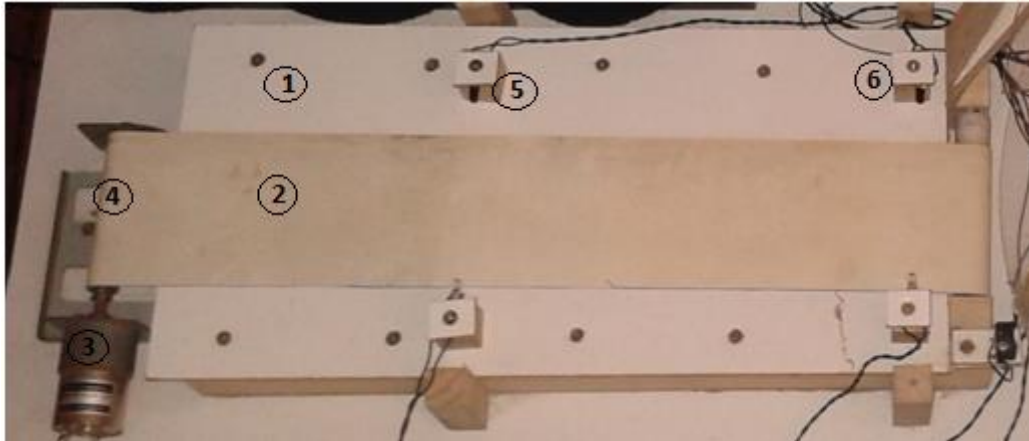


Fig. 3-19: Componentes estructurales de la banda transportadora.

Fuente: Propia

1. Soporte de madera en el tramo portante

Es una base de madera que sirve como soporte para poder transportar las botellas hasta el ingreso a la base circular giratoria.

2. Cinta transportadora

Es una cinta delgada que tiene dos diferentes texturas. La parte que da hacia la madera es liza para que pueda pasar fácilmente cuando se mueva y la parte que da hacia afuera está llena de líneas para que las botellas estén más estables cuando sean puestas encima.

3. Motor DC reductor de 24Volt. 122 rpm

En la Figura 3-20 se muestra el motor que es utilizado para mover la faja transportadora en el presente proyecto.



Fig. 3-20: Motor DC reductor de 24Volt. 122 rpm [17]

Es un robusto motor de corriente continua de 24V y 122 revoluciones con 16 kg /cm que se caracteriza por incluir un encoder o codificador de cuadrante que manda un tren de impulsos cuando gira el eje del motor, permitiendo así que un circuito externo pueda saber la velocidad real a la que está girando el eje y cuantas vueltas da. Este motor es de tamaño mediano por lo que está recomendado para bandas transportadoras con pesos de entre 5 y 10 Kg. El encoder está formado por dos sensores de efecto Hall que proporcionan un total de 588 pulsos por cada vuelta completa del rotor. El motor cuenta con condensadores internos de filtro que ayudan a minimizar el ruido y los parásitos generados por el motor al girar. El eje de salida es de 8mm de diámetro y encaja perfectamente en el casquillo de la rueda de 125 mm. Existe un soporte especialmente diseñado para este motor que permite una sujeción sencilla y robusta a cualquier superficie [17]

Polea: Es un tubo de hierro con un eje de acero a través del mismo. Las poleas se colocan en cada extremo. El eje de la polea gira sobre rodamientos (Figura 3-21), el cual representa el medio de impulso motriz para la banda [16].

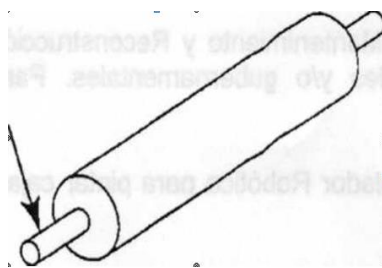


Fig. 3-21: Polea de un Transportador de banda [16]

5 y 6. Diodo emisor de luz infrarroja (LED IR)

El sensor infrarrojo requiere de una comunicación lineal entre transmisor y receptor, lo que hace impredecible la línea de vista para su efectiva transmisión por lo tanto siempre será uno a uno [18]. En la Figura 3-22 se puede apreciar el diodo emisor de luz.



Fig. 3-22: Diodo emisor de luz infrarroja [18]

Este LED emite un tipo de radiación electromagnética llamada infrarroja, que es invisible para el ojo humano porque su longitud de onda es mayor a la del espectro visible [18].

El fototransistor es un dispositivo que se diferencia de un transistor común porque su base ha sido sustituida por un cristal fotosensible que regula el flujo de corriente colector – emisor de acuerdo a la luz incidente sobre él [18]. En la Figura 3-23 se puede ver un modelo de fototransistor.



Fig. 3-23: Fototransistor [18]

El fototransistor, aunque con la apariencia de un LED común, debe conectarse con la patilla larga a masa y la corta a voltaje. Con los términos básicos aclarados, se puede ver en la Figura 3-24 el emisor y el receptor en funcionamiento [18].



Fig. 3-24: LED infrarrojo y el fototransistor [18]

3.5 La Base circular giratoria y sus partes

En la Figura 3-25 se puede apreciar La base circular giratoria y sus partes donde las botellas tienen que pasar hasta ser clasificadas. La base circular giratoria se encuentra al centro de todo para que la botella ingresada pase primero al llenado, desecho (si está mal llenado), enchapado y clasificación.

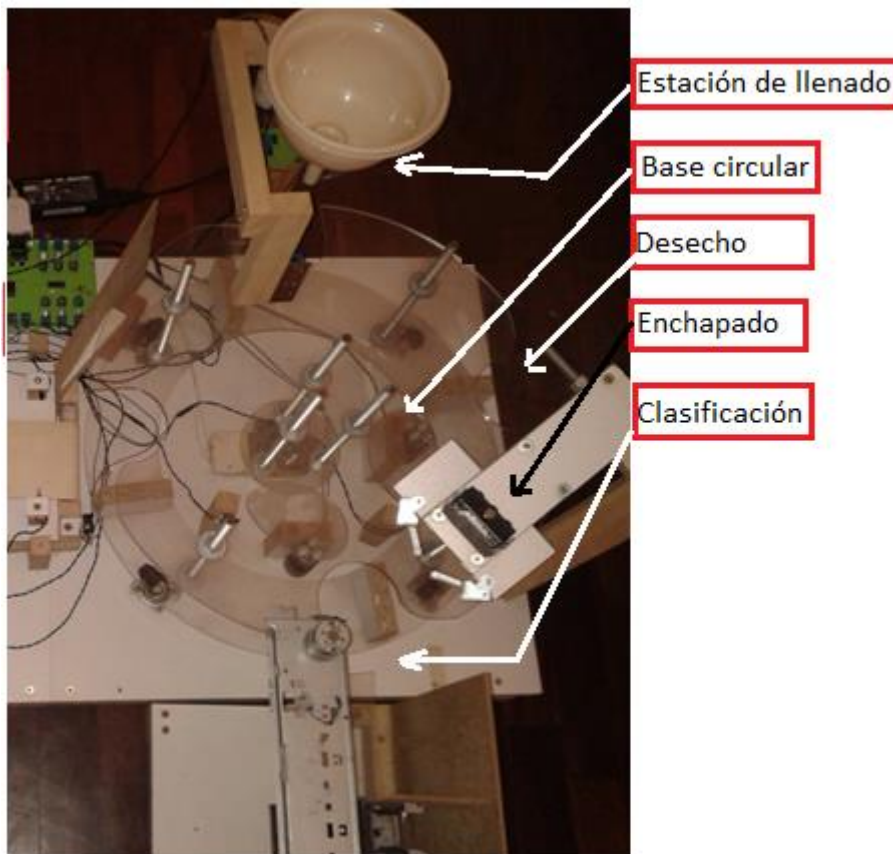


Fig.3-25: La Base circular giratoria y sus partes.

Fuente: Propia

Para poder explicar mejor el funcionamiento de la base circular giratoria en la Figura 3-26 se explica sus diferentes fases.

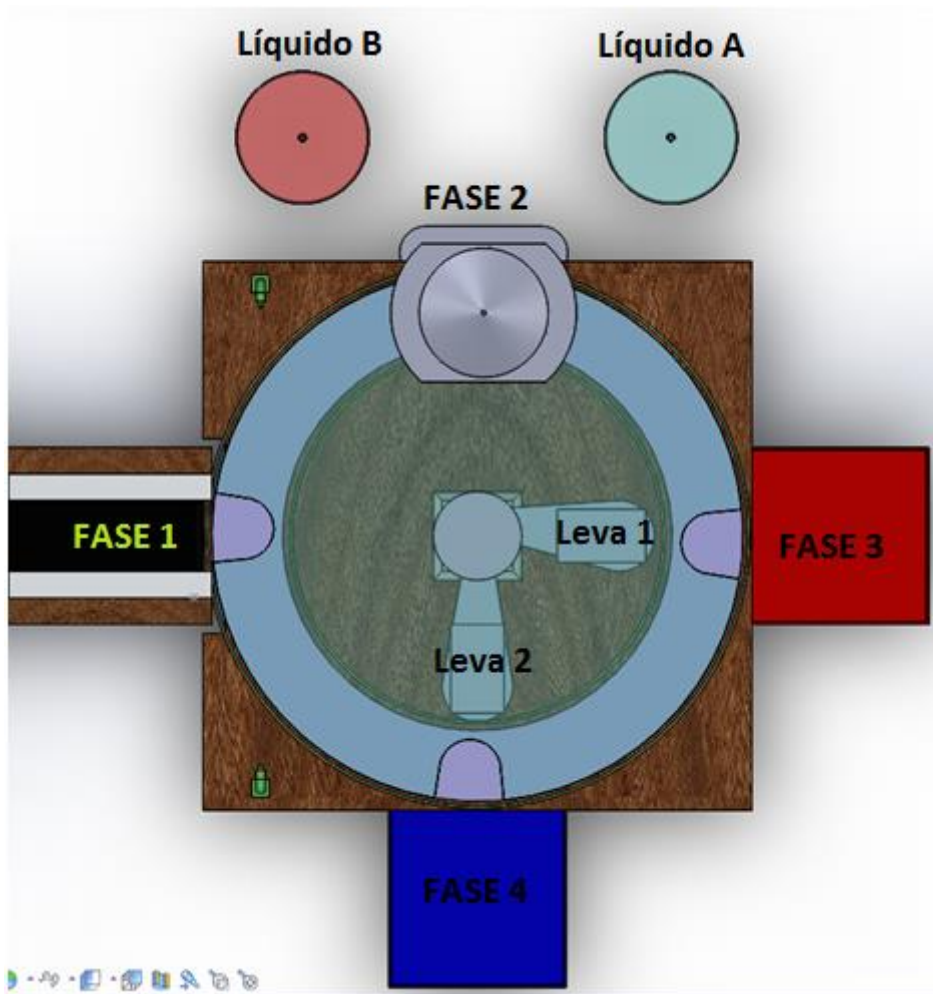


Fig 3-26: Fases de la base circular giratoria.

Fuente: Propia

Fase 1: Ingreso de la botella.- La banda transportadora coloca a la botella en la base circular.

Fase 2: Llenado de la botella.- La botella es llenada de acuerdo a su tipo.

Fase 3: Desecho de la botella.- Si la botella fue llenada por debajo o encima del nivel requerido, esta es desechada

Fase 4: Botella clasificada.- La botella es enchapada y retirada de la base circular.

La base circular giratoria funciona principalmente para trasladar las botellas de una fase a otra. El sistema comienza permitiendo el ingreso de la botella, luego en un determinado tiempo es llevado a la segunda fase donde es llenado y luego analizado

por sensores de nivel, después la botella es llevada a la tercera fase que es donde la botella es retirada si es que el llenado no fue correcto, y finalmente la botella es enchapada y clasificada.

3.5.1 Base circular

- Acrílico

Dentro de los plásticos de ingeniería el acrílico se puede encontrar como polimetilmetacrilato, también conocido por sus siglas PMMA. La placa de acrílico se obtiene de la polimerización del metacrilato de metilo y la presentación más frecuente que se encuentra en la industria del plástico es en gránulos o en placas. Los gránulos son para el proceso de inyección o extrusión y las placas para termoformado o para mecanizado [19].

Entre sus propiedades se destacan:

- Transparencia de alrededor del 93 %. El más transparente de los plásticos.
- Alta resistencia al impacto, de unas diez a veinte veces la del vidrio.
- Resistente a la intemperie y a los rayos ultravioleta. No hay un envejecimiento apreciable en diez años de exposición exterior.
- Excelente aislante térmico y acústico.
- Ligero en comparación con el vidrio (aproximadamente la mitad), con una densidad de unos 1190 kg/m^3 es sólo un poco más denso que el agua.
- De dureza similar a la del aluminio: se raya fácilmente con cualquier objeto metálico, como un clip. El metacrilato se repara muy fácilmente con una pasta de pulir [19].

Por las razones mencionadas se escogió este material. En la Figura 3-27 se muestra la base circular hecha de acrílico. Es de color transparente para que de este modo se pueda visualizar todo la parte interna, además de tener un grosor considerable para que pueda permitir el transporte de las botellas sin romperse o doblarse.

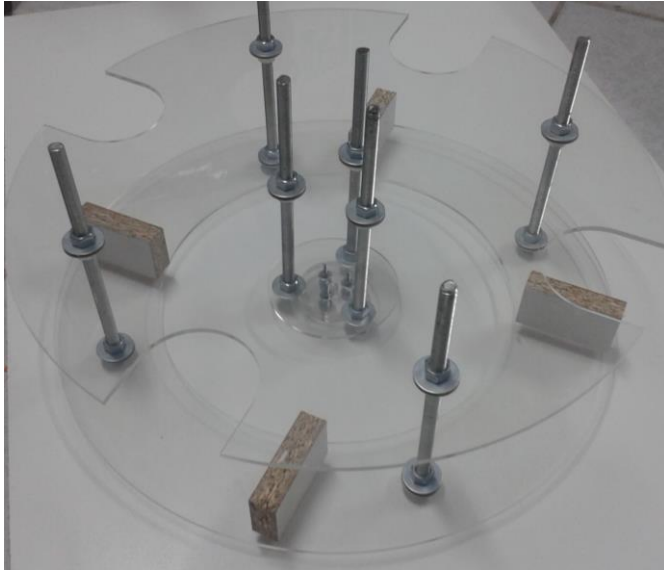


Fig.3-27: Acrílico de la base circular.

Fuente: Propia

- Ruedas

La utilidad del tren de rodadura aparece cuando se quiere arrastrar o empujar objetos reduciendo su rozamiento con el suelo (u otra superficie sobre la que se mueva). Su utilidad se centra en mantener la *rueda solidaria con el objeto* a la vez que *reduce la fricción* entre este y el suelo. [20]

La rueda empleada en el transporte necesita, al menos, dos elementos más para poder funcionar: una armadura y un eje.

A esto suele añadirse, al menos: un cojinete para reducir el rozamiento de la *rueda* con el *eje* (o el del *eje* con la *armadura*, como en el caso de la carretilla). En los automóviles y otros medios de locomoción más desarrollados lo normal es que también incluya un sistema de suspensión (colocado entre la *armadura* y el *soporte* y cuya misión es evitar que las imperfecciones del suelo se transmitan a la carga), uno de frenado y otro de dirección [20]. Tal como se muestra en la Figura 3-28

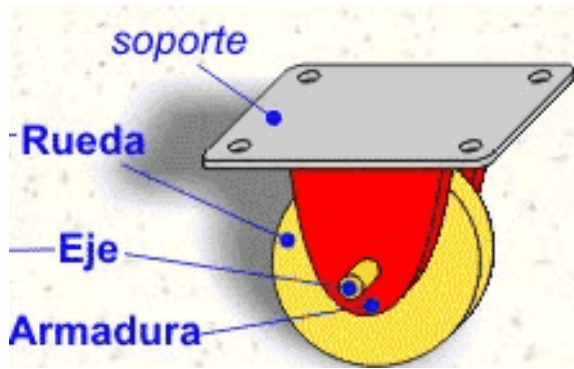


Fig. 3-28: Rueda de transporte [20]

Por dichas razones en el presente proyecto se utilizan 4 ruedas que sirven como soporte a la base circular para que de este modo pueda girar sin balancearse y rápidamente (Figura 3-29)

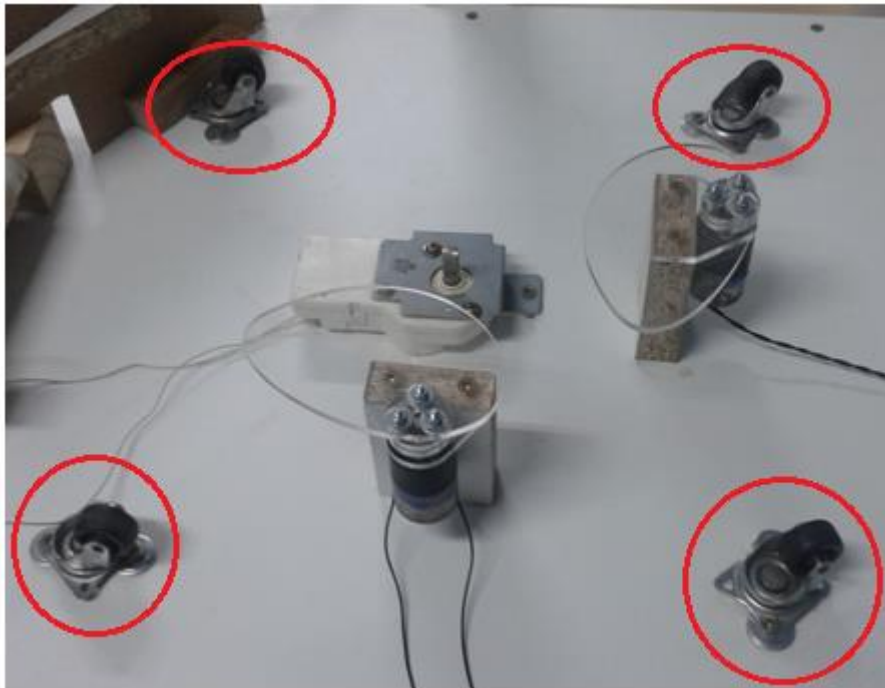


Fig.3-29: Ruedas que soportan a la base circular.

Fuente: Propia

- Levas

El proceso de trabajo de muchas máquinas conduce a la necesidad de tener componentes mecanismos, los cuales dan movimiento a sus eslabones finales para ser ejecutados rigurosamente por una ley dada y coordinadamente con el movimiento de

otros mecanismos. Para cumplir esta tarea los mecanismos más sencillos, seguros y compactos resultan ser las levas. Los mecanismos planos de leva contienen al menos un par cinemático superior, de dos movimientos, este mecanismo consta de dos elementos móviles, la leva y el seguidor montados en un marco fijo, el bastidor [21].

Una característica inigualable de las levas es que pueden impartir movimientos bien distintos a su seguidor, de hecho las levas pueden ser usadas para obtener movimientos inusuales o irregulares que serían muy difíciles de obtener con otros mecanismos, siendo esta su principal ventaja [21].

Por esa razón se eligieron dos levas (Figura 3-30) para retirar a las botellas de la base circular. Una leva es utilizada para retirar a la botella cuando esta no cumple con el estándar de calidad y la otra leva para colocar la botella como clasificada.



Fig.3-30: Levas.

Fuente: Propia

- Motores Reductores de velocidad

En general puede afirmarse que los motores son como el corazón de la industria. Pero ese corazón tiene diferentes ritmos y funciona a distintas velocidades, dependiendo del uso que se le quiera dar. Por eso los reductores de velocidad son indispensables en todas las industrias, desde los que producen cemento hasta los laboratorios de medicamentos requieren en sus máquinas estos mecanismos para la producción de medicinas [22].

Los reductores son diseñados a base de engranajes, mecanismos circulares y dentados con geometrías especiales de acuerdo con su tamaño y la función en cada motor [22].

El desarrollo de esta máquina y del sistema inteligente de medición le permite a las empresas ser mucho más competitivas y aumentar sus conocimientos. En pocas palabras los reductores son sistemas de engranajes que permiten que los motores eléctricos funcionen a diferentes velocidades para los que fueron diseñados [22].

Rara vez las máquinas funcionan de acuerdo con las velocidades que les ofrece el motor, por ejemplo, a 1.800, 1.600 o 3.600 revoluciones por minuto. La función de un motorreductor es disminuir esta velocidad a los motores (50, 60, 100 rpm) y permitir el eficiente funcionamiento de las máquinas, agregándole por otro lado potencia y fuerza [22].

Al emplear reductores o motorreductores se obtiene una serie de beneficios sobre estas otras formas de reducción. Algunos de estos beneficios son:

- Una regularidad perfecta tanto en la velocidad como en la potencia transmitida.
- Una mayor eficiencia en la transmisión de la potencia suministrada por el motor.
- Mayor seguridad en la transmisión, reduciendo los costos en el mantenimiento.
- Menor espacio requerido y mayor rigidez en el montaje.
- Menor tiempo requerido para su instalación [22].

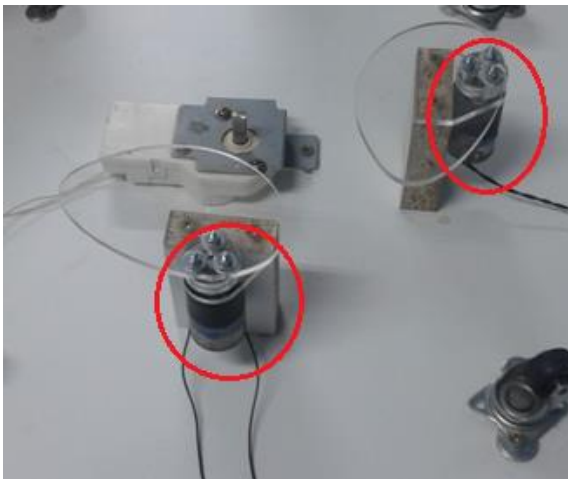


Fig.3-31: Motores de las levas.

Fuente:

Propia

En la Figura 3-31 se muestra el motor que es utilizado para mover las levas en el presente proyecto. Funciona con corriente continua de 12V con caja reductora que está especialmente indicado para su utilización en aplicaciones de baja velocidad, ya que proporciona 6 revoluciones por minutos en vacío con un consumo de 45mA. El eje del motor es de 6 mm y se acopla perfectamente con los diferentes casquillos y adaptadores de ruedas. Existe un soporte metálico que facilita el montaje en cualquier superficie.

3.5.2 Estación de llenado.

Cuando la botella ingrese a la base circular, esta gira por un tiempo determinado hasta llegar a la etapa de llenado para luego ser evaluado por unos sensores que miden su correcto nivel, tal como se aprecia en la Figura 3-32. En la estación de llenado se encuentran dos motores, un embudo y un conjunto de sensores de nivel.



Fig. 3-32: Medición de llenado de la botella.

Fuente: Propia

- Motor

En la Figura 3-33 se puede ver el motor de 12 Volt que es utilizado para bombear el agua desde un recipiente hacia un embudo que sirve para llenar la botella puesta.



Fig.3-33: Motor utilizado para el llenado de la botella [23]

- Sensores de nivel

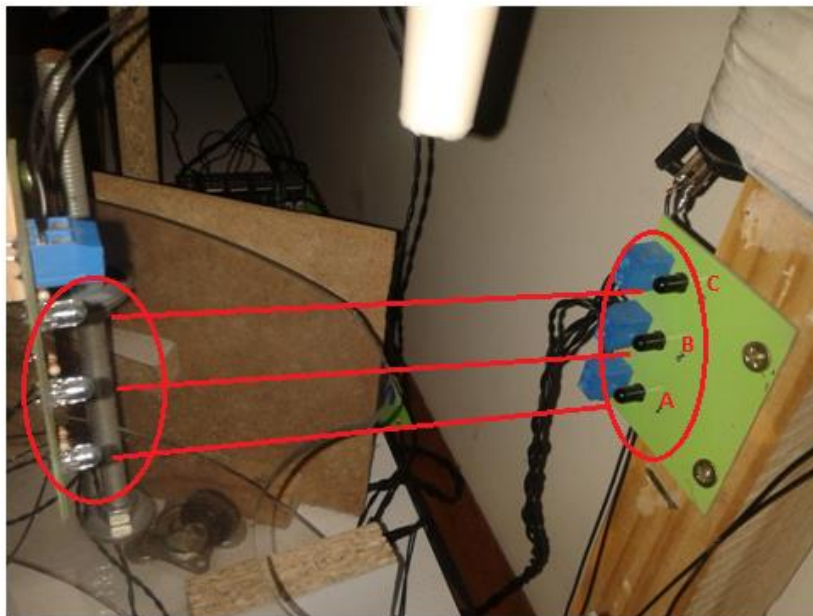


Fig.3-34: Los sensores de nivel.

Fuente: Propia

Como se muestra en la Figura 3-34 hay 3 sensores de nivel, los cuales tienen la siguiente representación:

Sensor A, B y C	→	Muy Lleno
Sensor A y B	→	Llenado correcto
Sensor A	→	Muy bajo

Los sensores utilizados en esta parte son los mismos utilizados en la banda transportadora para detectar las botellas, solo que en este caso la intensidad de luz es más fuerte para que solo detecte el líquido y no la botella de plástico.

3.5.3 Desecho



Fig.3.35: Botella en la fase de desecho.

Fuente: Propia

Si los sensores detectaron que el nivel de llenado es muy bajo o muy lleno estos sensores mandan la señal a la tarjeta controladora y esta activa la leva cuando la botella se encuentre en la fase de desecho. En la Figura 3-35 se muestra la botella en la fase de desecho antes de ser expulsada de la base circular.

3.5.4 Enchapado

Si la botella no ha sido retirada, esta pasa a la siguiente fase, pero en ese lapso la botella es enchapada. En la Figura 3-36 se observa el enchapado.



Fig. 3-36 Enchapado de la botella.

Fuente: Propia



Fig. 3-37 Brazo de madera para el enchapado.

Fuente: Propia

Para el enchapado se tiene un soporte que sostiene un brazo de madera. En la parte final de este hay dos pequeñas estructuras de metal que permiten detener todas chapas que se encuentran dentro del brazo y deja caer una chapa cuando la boquilla de una botella hace una pequeña presión en las pequeñas ruedas que se encuentran al final. Esto se puede ver en la Figura 3-37.

3.5.5 Clasificación

Después del enchapado la botella es sacada de la base circular por la acción de una leva, para luego ser almacenada, como se aprecia en la Figura 3-38.



Fig.3-38: Almacenamiento de botellas.

Fuente: Propia

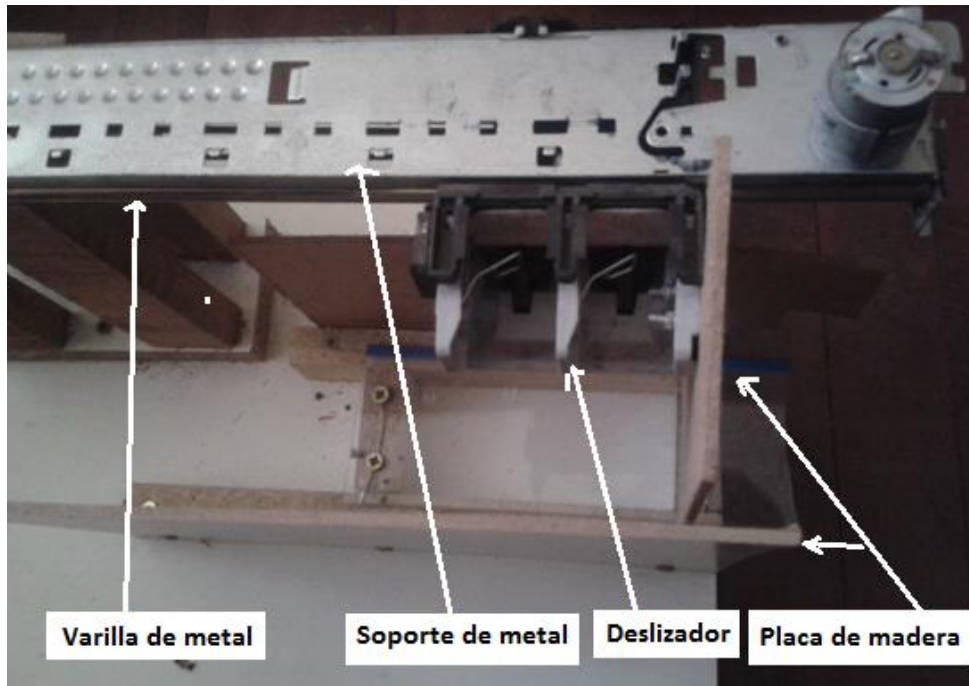


Fig. 3-39: Partes del almacenamiento de botellas.

Fuente: Propia

De acuerdo al Figura 3-39 el lugar donde se almacenan las botellas tiene diferentes partes. Hay una estructura de metal que sirve como soporte a una varilla liza de metal y junto a la varilla hay un deslizador de plástico que permite la conexión entre la varilla y la placa de madera, permitiendo de este modo que la botella ingresada pueda deslizarse sin caerse.

CAPÍTULO IV: RESULTADOS

Después de la elaboración del hardware y el diseño de la aplicación, en este capítulo se somete el sistema completo a diferentes pruebas con el fin de conocer si los objetivos planteados para este proyecto se han cumplido.

En la Figura 4-1, se indica una foto del módulo completo y sus partes, los cuales son sometidos a las diferentes pruebas de funcionamiento.

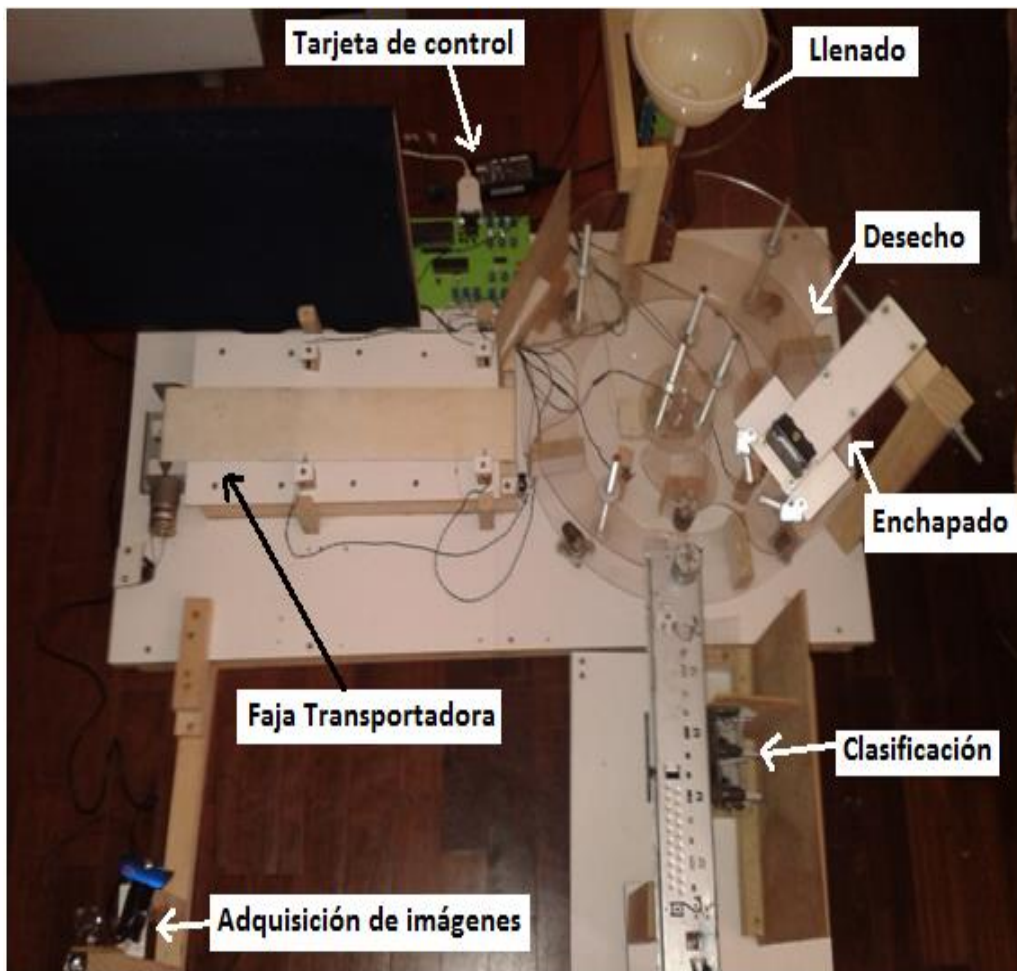


Fig. 4-1: Partes del Sistema.

Fuente: Propia

Se debe tener en cuenta lo siguiente:

Fase 1: Análisis de la botella

Fase 2: Llenado

Fase 3: Desecho

Fase 5: Enchapado y clasificación

4.1 Condiciones iniciales

Para que todo comience correctamente es necesario que la leva 1, leva 2 y la base circular estén en posiciones correctas, para cada paso el display muestra los mensajes, tal como se aprecia en la Figura 4-2.



Fig. 4-2: Condiciones iniciales.

Fuente: Propia

4.2 Conexión entre la cámara y la PC

El controlador solicita la conexión con la PC (Figura 4-3)



Fig. 4-3 Conectar cámara y PC.

Fuente: Propia

La PC está conectada y solicita el número de botellas a ingresar (Figura 4-4).

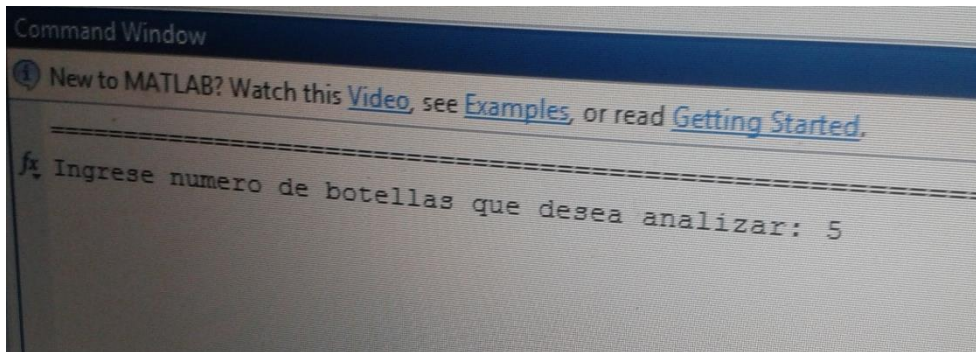


Fig. 4-4: La PC solicita el número de botellas que se va a analizar.

Fuente: Propia

La PC envía una señal al controlador y espera su respuesta (Figura 4-5), seguidamente el controlador recibe la Señal de la PC (Figura 4-6) y confirma su conexión enviando una señal a la PC.

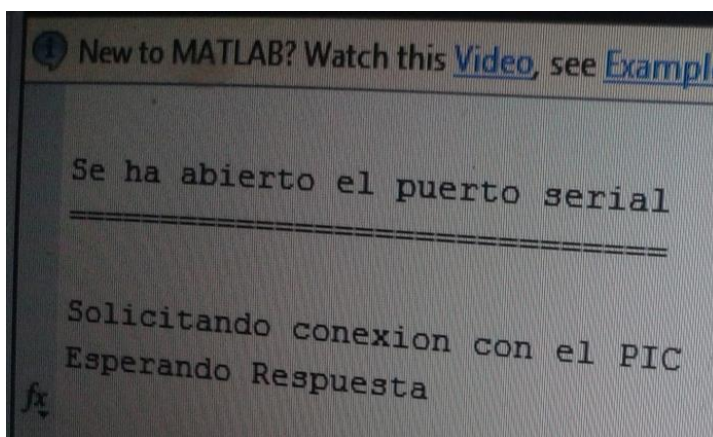


Fig. 4-5: La PC espera la respuesta del controlador.

Fuente: Propia



Fig. 4-6 El controlador recibe la señal de la PC.

Fuente: Propia

4.3 Detección y análisis de la botella

Después de establecerse la conexión entre la PC y el controlador, la faja comienza a correr al mismo tiempo que el display muestra un mensaje (Figura 4-7) hasta que el sensor detecte que se ingresó la botella.



Fig. 4-7: Solicitud para que ingrese la botella.

Fuente: Propia

Se necesita detectar la presencia de la botella para que la banda transportadora se detenga y de ese modo se pueda tomar la foto. En la Figura 4-8 se muestra posición que se encuentran los sensores y la botella.



Fig. 4-8: Los sensores detectan la botella.

Fuente: Propia

Para que los sensores puedan detectar a la botella es necesario que la intensidad luminosa que irradian los sensores deben ser los indicados, ya que se está empleando una botella casi transparente la cual dificulta su detección, por esa razón se realizaron 10 pruebas para cada grado de intensidad luminosa de los sensores. Esto se puede ver en la Tabla 4.1. Ahí se puede observar que la intensidad luminosa debe tener un nivel bajo para que pueda detectar la botella de plástico, en los otros casos la eficacia es nula o muy baja.

Intensidad luminosa del sensor	Eficacia de la detección
muy bajo	0%
bajo	100%
medio	50%
medio alto	0%
alto	0%

Tabla 4.1 Pruebas de detección variando la intensidad luminosa del sensor.

Fuente: Propia

También la iluminación se puede considerar como la parte más crítica dentro de un sistema de visión artificial, ya que las condiciones de iluminación deben ser las más adecuadas para que la cámara pueda capturar la imagen correctamente. Esto se vuelve más complejo cuando el objeto presenta formas complejas o superficies reflectantes como el plástico.

Para ello se realizaron diferentes pruebas con la iluminación y con el fondo donde es colocada la botella. Teniendo en cuenta que la botella es transparente, se probó con un fondo blanco tal como se muestra en la Figura 4-9.



Fig. 4-9: Botella de plástico con fondo blanco.

Fuente: Propia

Cuando la imagen es tomada con dicho fondo, el procesamiento digital de imágenes casi no reconoce la botella. En la Figura 4-10 se muestra la figura tomada en blanco y negro llevada a una matriz de 400 píxeles.

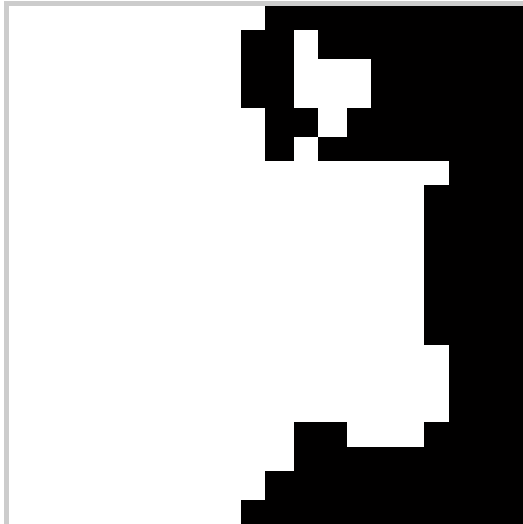


Fig.4-10: Imagen llevada a blanco y negro (400 pixeles).

Fuente: Propia

En la Figura 4-11 se muestra la misma imagen que la anterior pero cada pixel está representada de otra manera.

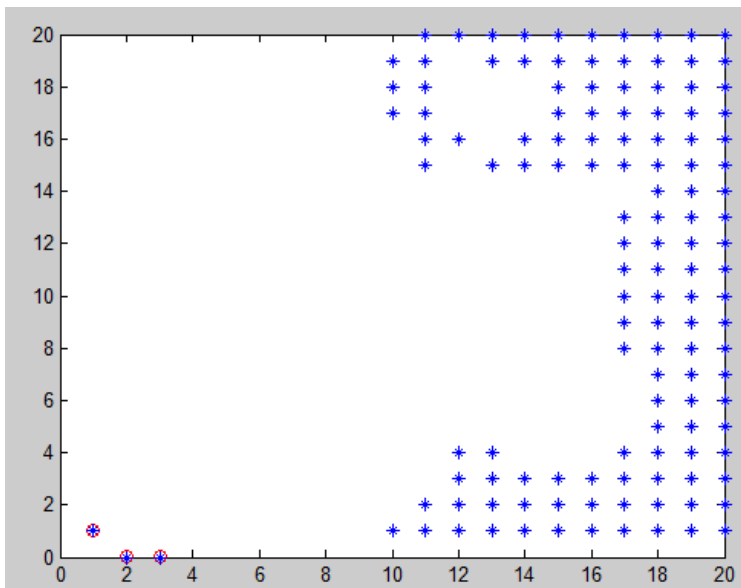


Fig.4-11: Imagen sometida el procesamiento digital (400 pixeles).

Fuente: Propia

Ahora se intenta con un fondo de madera de color marrón (Figura 4-12)



Fig. 4-12: Botella de plástico con fondo de madera de color marrón.

Fuente: Propia

Dicha imagen es procesada, y el resultado se muestra en la Figura 4-13 y 4-14.



Fig.4-13: Imagen llevada a blanco y negro (400 pixeles).

Fuente: Propia

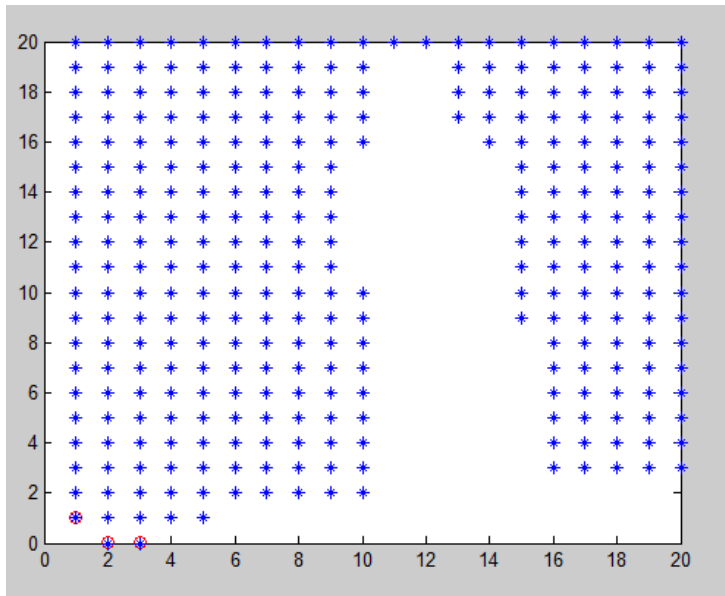


Fig.4-14: Imagen sometida el procesamiento digital (400 pixeles).

Fuente: Propia

Finalmente para obtener una mejor imagen se coloca una franela oscura para que no refleje la luz incidente y de ese modo obtener una mejor imagen de la botella (Figura 4-15).



Fig. 4-15: Una franela oscura como fondo para la botella de plástica.

Fuente: Propia

Dicha imagen es procesada, y el resultado se muestra en la Figura 4-16 y 4-17.



Fig.4-16: Imagen llevada a blanco y negro (400 pixeles).

Fuente: Propia

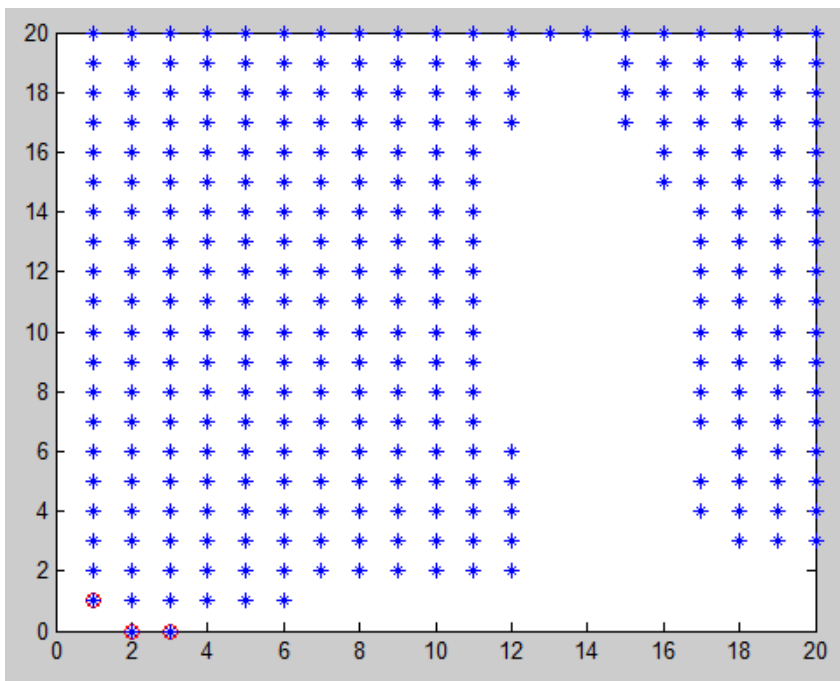


Fig.4-17: Imagen sometida el procesamiento digital (400 pixeles).

Fuente: Propia

Después de realizar estas pruebas se concluye que la mejor opción es tener la franela oscura como fondo ya que no refleja la luz incidente que puede variar debido a los cambios de ambientes.

Luego de detectar la botella el controlador envía una señal a la PC (Figura 4-18) para que comience a analizar.



Fig. 4-18: Solicitud para que la PC analice la botella.

Fuente: Propia

Para tener un mejor análisis en el reconocimiento del tipo de botella se hicieron diferentes pruebas variando los valores del número de iteraciones, manteniendo el valor de $\eta=0.1$.

Si el número de interacciones es 800 se obtiene una gráfica no adecuada por tener valores un poco altos de error (Figura 4-19). Dicho análisis toma 3 segundos.

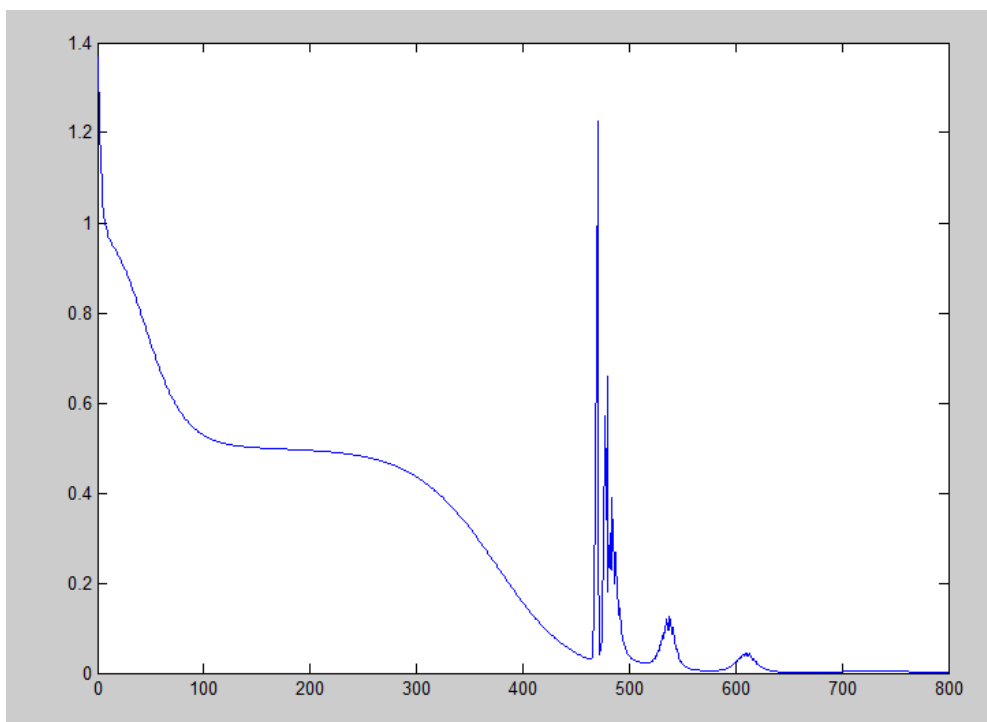


Fig.4-19: Entrenamiento con 800 iteraciones.

Fuente: Propia

Si el número de interacciones es 7000 se obtiene una gráfica adecuada para el análisis de las botellas (Figura 4-20). El análisis toma 5 segundos.

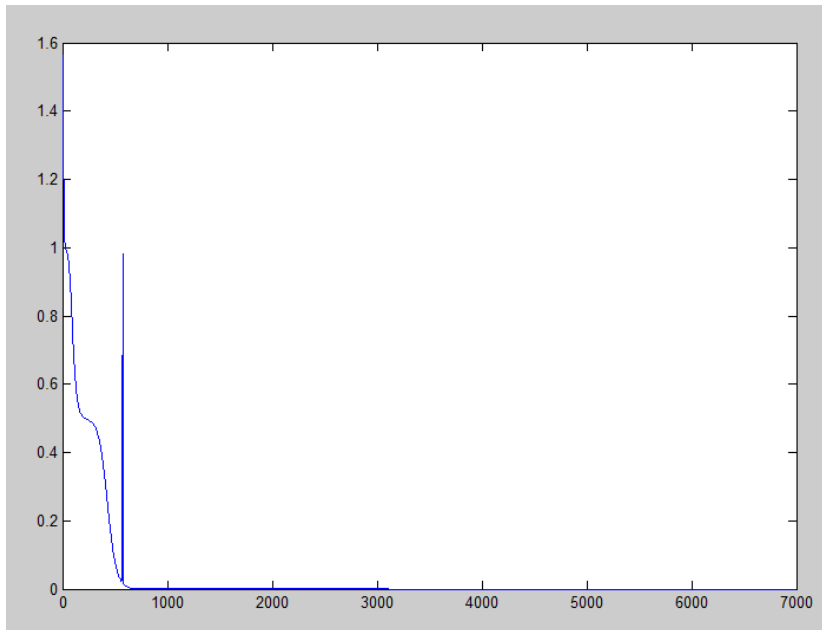


Fig.4-20: Entrenamiento con 7000 iteraciones.

Fuente: Propia

Si el número de interacciones es 15000. Se obtiene una gráfica adecuada para el análisis de las botellas, pero el análisis toma 10 segundos (Figura 4-21).

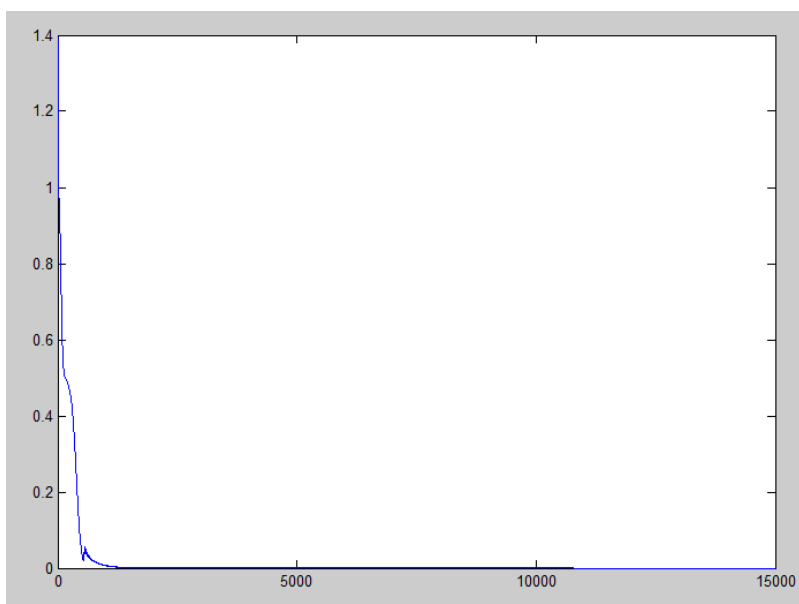


Fig.4-21: Entrenamiento con 15000 iteraciones.

Fuente: Propia

En la tabla 4.2 se tiene un resumen de todas las pruebas realizadas. A partir de 7000 iteraciones la eficacia es del 100%.

Nro de Iteraciones	Tiempo de entrenamiento	Eficacia del reconocimiento de imágenes (%)
800	3 seg	60
1500	3 seg	60
3000	4 seg	70
5000	5 seg	90
7000	5 seg	100
11000	7 seg	100
13000	8 seg	100
15000	10 seg	100

Tabla 4.2 Pruebas variando el número de iteraciones.

Fuente: Propia

Se puede ver que la mejor opción es con 7000 iteraciones porque toma solo 5 segundos de análisis además de tener un buen nivel de error.

Con el número de interacciones escogido se ingresó una botella y la red neuronal lo identificó como botella A.

Luego de ello, en el Display aparece un contador que indica el número de botellas que se está ingresando y el tipo. En esta caso, se ha ingresado la primera botella (N=001) y es de tipo A (AXXX). Esto se puede ver en la Figura 4-22.



Fig.4-22 Botella número 1 de tipo A.

Fuente: Propia

4.4 Estación de llenado

Con el primer giro de la rueda la botella pasa a la fase 2 y se activa la válvula de llenado (Figura 4-23).



Fig.4-23: La botella pasa a la fase 2.

Fuente: Propia

En el llenado de la botella se tiene 3 casos:

La botella es llenado con el nivel deseado. Esto es detectado por el primer y segundo sensor, comenzando desde abajo, tal como se muestra en la Figura 4-24.

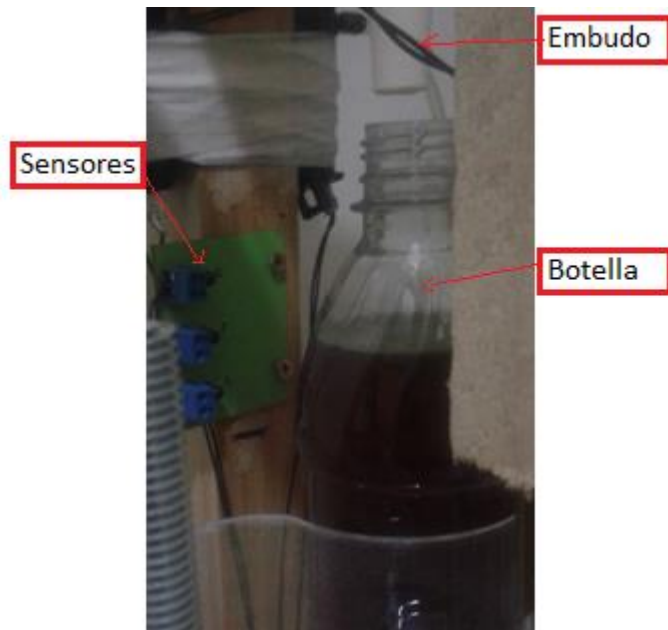


Fig.4-24: Nivel ideal de llenado de la botella.

Fuente: Propia

La botella está muy llena. Esto es detectado por el primer, segundo y tercer sensor, comenzando desde abajo. (Figura 4-25).



Fig.4-25: Botella muy llena.

Fuente: Propia

La botella tiene un nivel bajo de llenado. Esto es detectado por el primer, sensor, comenzando desde abajo. (Figura 4-26).



Fig.4-26: Botella con el nivel de llenado por debajo de lo aceptado.

Fuente: Propia

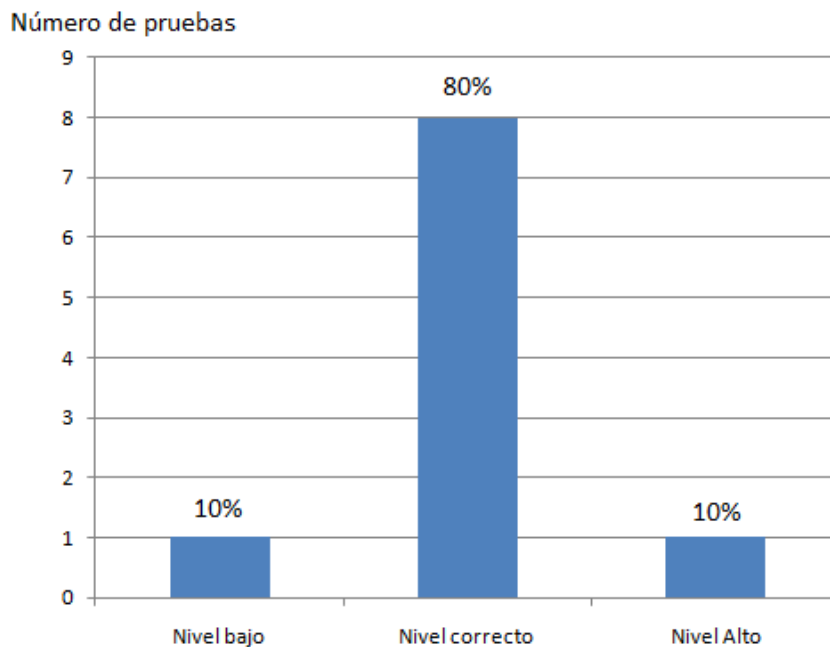


Fig.4-27: Nivel de llenado Vs número de pruebas.

Fuente: Propia

Se realizaron 10 pruebas para estar seguros de la correcta detección de los sensores, de los cuales 2 salieron erradas por no cumplir con el nivel requerido, es decir, el 20% de botellas llenadas fueron rechazadas, esto se muestra en la Figura 4-27.

Después que la botella ha sido llenada, los sensores miden el nivel del líquido que en este caso ha resultado correcto. Esa información es enviada al controlador y este muestra en el display un mensaje (Figura 4-28).



Fig. 4-28: Nivel correcto de llenado.

Fuente: Propia

4.5 Segunda botella y la fase de desecho

Antes que la botella pase a la tercera fase, primero debe esperar que la siguiente botella ingrese, por esa razón el controlador activa la faja y solicita que ingrese la siguiente botella (Figura 4-29).



Fig. 4-29 Solicitud para que ingrese la botella.

Fuente: Propia

Cuando la botella es detectada por el sensor (Figura 4-30), el controlador solicita a la PC para que haga el análisis (Figura 4-31).



Fig. 4-30: Los sensores detectan a la botella.

Fuente: Propia



Fig. 4-31: Solicitud para que la PC analice la botella. Fuente: Propia

La PC analiza la botella ingresada, siendo este del tipo B y envía la señal al controlador. El display muestra un mensaje al respecto (Figura 4-32).



Fig.4-32 Botella número 2 de tipo B.

Fuente:Propia

Seguidamente la faja se activa y lleva la botella hasta que ingrese a la rueda. Luego de ser detectada por un sensor la faja se detiene y la rueda se activa, esto hace que la primera botella pase a la fase 3 y la segunda botella a la fase 2. Teniendo en cuenta que la primera botella tenía el nivel correcto de llenado, entonces la leva 1 no lo desecha. La

segunda botella siendo este del tipo B es llenado con el líquido B. Esto se muestra en la Figura 4-33.



Fig.4-33: La primera botella en la fase 3 y la segunda en la fase 2.

Fuente: Propia

Luego que la segunda botella es llenada, los sensores se activan para medir el nivel de llenado. De acuerdo al nivel detectado el controlador muestra el resultado (Figura 4-34).

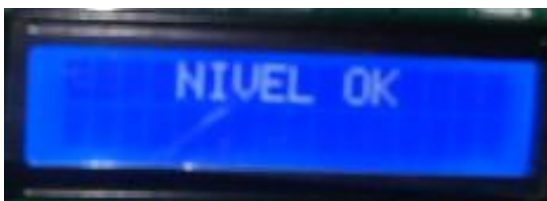


Fig.4-34: Nivel correcto de llenado.

Fuente: Propia

4.6 Tercera botella y clasificación

Antes que las botellas pasen a la siguiente fase, primero deben esperar que la tercera botella ingrese, por esa razón el controlador activa la faja y solicita que ingrese la siguiente botella (Figura 4-35).



Fig. 4-35: Solicitud para que ingrese la botella.

Fuente: Propia

Cuando la botella es detectada por el sensor (Figura 4-36), el controlador solicita a la PC para que haga el análisis (Figura 4-37).



Fig. 4-36 Los sensores detectan a la botella.

Fuente: Propia



Fig. 4-37 Solicitud para que la PC analice la botella.

Fuente: Propia

La PC analiza la botella ingresada, siendo este del tipo X y envía la señal al controlador. El display muestra un mensaje al respecto (Figura 4-38).



Fig.4-38: Botella número 3 de tipo C.

Fuente:Propia

Seguidamente la faja se activa y lleva la botella hasta que ingrese a la rueda. Luego de ser detectada por un sensor la faja deja de girar y la rueda se activa, esto hace que la primera botella pase a la fase 4, la segunda botella a la fase 3 y la tercera botella a la fase 2. Entonces, al mismo tiempo las tres botellas se encuentran en fases diferentes. La primera botella en la fase 4 es enchapada y luego seleccionada por la acción de la leva 2 (Figura 4-39).



Fig. 4-39: Botella seleccionada.

Fuente: Propia

En la fase 4 se realizaron varias pruebas de acuerdo al número de botellas que ingresan a la etapa de clasificación. La Tabla 4.3 indica que para el ingreso de la primera y de la tercera botella hay un pequeño margen de error.

Número de Botellas	Eficacia del ingreso
1ra botella	80%
2da botella	100%
3ra botella	90%

Tabla 4.3 Eficacia del ingreso de las botellas en la clasificación de acuerdo al número de botellas.

Fuente: Propia

La segunda botella en la fase 3 no es desechada por cumplir con el nivel de llenado, y la tercera botella siendo del tipo X es llenada con la combinación del líquido A y B. Esto se puede ver en la Figura 4-40.



Fig. 4-40: La primera botella en la fase 4, la segunda en la fase 3 y la tercera en la fase 2.

Fuente: Propia

De este modo el sistema siempre tendrá en cada fase una botella que avanza de fase al mismo tiempo que las demás. Este ciclo se repetirá hasta llegar al número de botellas que se ingresó inicialmente en la PC.

4.7 Producción

En la Tabla 4.4 se muestra que la primera botella demora 2.81 minutos en salir, luego a partir de la segunda botella el tiempo es de 0.72 min (43.2 seg), esto se debe a que en el momento inicial solo existe una botella en la primera fase y las otras fases están vacías, pero a medida que la primera botella avanza de fase, otras botellas ingresan, permitiendo que después de la primera botella las demás tomen menos tiempo en salir.

Tiempo de salida (min)	Número de botellas
2.81	1ra botella
3.53	2da botella
4.25	3ra botella
4.97	4ta botella

Tabla 4.4 Tiempo de producción en minutos.

Fuente: Propia

En la Tabla 4.5 se aprecia un cálculo estimado del número de botellas que se pueden obtener después de unas horas. En media hora se puede tener hasta 38 botellas y en 8 horas hasta 608.

Tiempo (horas)	Número de Botellas
0.5	38
1	76
3	228
5	380
8	608

Tabla 4.5 Tiempo de producción por hora.

Fuente: Propia

Sabiendo que por cada giro que da la base circular las botellas cambian de fase y luego el sistema pasa primero a clasificar, luego a desechar y por últimos a llenar, entonces para tener una mejor producción es necesario que la clasificación, el desecho y el llenado se den al mismo tiempo. Haciendo esos cambios en el controlador en media hora se puede tener hasta 42 botellas y en 8 horas hasta 678, tal como se aprecia en la Tabla 4.6.

Tiempo (horas)	Número de Botellas
0.5	42
1	84
3	252
5	420
8	678

Tabla 4.6 Tiempo de producción por hora después de la mejora.

Fuente: Propia

4.8 Análisis de Costos

Con el fin de dar un valor al trabajo realizado en este proyecto y los dispositivos requeridos, a continuación se presenta la Tabla 4.7 con el detalle de precios del proyecto:

	CANTIDAD	P.UNIT(S/.)	SUBTOTAL(S/.)
Base de madera del sistema	-	-	280
Banda transportadora	-	-	115
Motor con reductor engranajes metálicos 24 Volt.	1	30	30
Motor DC, alto torque 12 Volt	1	35	35
Motor con reductor engranajes metálicos 12 Volt.	2	25	50
Levas de acrílico	2	15	30
Base circular de acrílico	-	-	280
Estación de llenado	-	-	16
Bomba lava parabrisas	2	16	32
Placa del controlador	1	-	85.5
PIC 16f877a	1	16	16
Max 232	1	2.5	2.5
Sensores	6	0.9	5.4
Componentes electrónicos	-	-	60
Cámara web	1	25	25
Puerto paralelo	1	30	30
Varilla de aluminio cuadrada	1	13	13
Licencia de MATLAB	-	3000	3000
Mano de obra	-	-	500
Asesoría en la programación y control de motores		-	500
TOTAL (S/.)			5105.4

Tabla 4.7 Costos del proyecto.

Fuente: Propia

Si en vez de utilizar materiales de madera se usan materiales de metal, el costo estimado para las partes requeridas sería el siguiente:

	CANTIDAD	P.UNIT(S/.)	SUBTOTAL(S/.)
Base de metal del Sistema	-	-	800
Levas de metal	2	30	60
Base circular de metal	-	-	600

Tabla 4.8 Costos de materiales de metal.

Fuente: Propia

Como se puede apreciar en la Tabla 4.8 Los materiales de metal son más caros que los de madera, por lo tanto el costo total del proyecto aumentaría en S/. 870.

Comparando los precios con otro sistema elaborado con materiales de metal, una cabina cerrada para la captura de la imagen, el programa LabView y el toolkit de visión artificial para el control de calidad; tiene un costo total de S/. 8277 [9], la diferencia de costos es de S/. 3172.

CONCLUSIONES

1. La banda transportadora construida para desplazar a las botellas no presenta problemas respecto al transporte porque la botella es de plástico y además está vacía, de este modo el motor que mueve la faja no presenta inconvenientes. Sin embargo, los problemas se presentaron en la regulación de la intensidad luminosa de los sensores que utiliza la faja para detectar a la botella y determinar el giro o la parada de la faja. Por esa razón se realizaron diferentes pruebas donde se pudo observar que la intensidad luminosa de los sensores deben tener un nivel bajo, tal como se vio en la Tabla 4.1.
2. En la rueda circular giratoria que es la encargada de llevar a las botellas hacia las diferentes fases del sistema no se encontró problemas. Esto se debió al motor reductor de velocidad utilizado que permitió mantener la velocidad a pesar de transportar un número variado de botellas.
3. Las levas que están en la rueda circular que son utilizadas para desechar y seleccionar cumplen su función sin inconvenientes gracias a los motores reductores de velocidad que usan, además el peligro de las caídas de las botellas son evitadas porque al estar llenas de líquido hacen que el golpe de las levas no les provoque la caída.
4. El mecanismo para el llenado depende del funcionamiento del motor, que para el presente proyecto presentó 80% de eficiencia en las pruebas realizadas, eso se pudo observar en la Figura 4-27. El problema principal radica en el arranque del motor, ya que en algunos casos el motor demora 1 o 2 segundos en comenzar a funcionar generando así un mal llenado.
5. Respecto al control de nivel, los sensores pudieron detectar fácilmente el nivel del líquido debido al tono oscuro de estos, pero una limitación fue que solo se cuentan tres niveles como referencia.
6. El enchapado construido no presentó problemas por ser sencillo y sin un sello de seguridad, ya que dicho sistema requiere más materiales. Por esa razón solo se elaboró un mecanismo de madera que solo tape la boquilla de la botella.

RECOMENDACIONES

1. El programa diseñado en Matlab reduce el número de píxeles de la imagen tomada por la cámara web a 20x20 píxeles, siendo 400 el número de neuronas de entrada. Hay tres neuronas intermedias, ya que por razones de optimización estas no deben ser menores que el número de neuronas de salida (tres tipos de botellas). La red neuronal es utilizada para identificar el tipo de botella, y para ello es necesario que el entrenamiento de la red sea eficiente y que no dure mucho tiempo, por esa razón se realizaron diversas pruebas para su entrenamiento variando el número de iteraciones, donde se pudo ver que la mejor opción es con 7000 iteraciones porque toma solo 5 segundos de análisis además de tener un buen nivel de error, eso se pudo apreciar en la Tabla 4.2. Además, se tuvo que poner una franela oscura para que no refleje la luz incidente y de ese modo obtener una mejor imagen de la botella.
2. Se utiliza el PIC 16F877A por tener 40 pines que son suficientes para enviar señales a los motores y al display, recibir señales de los sensores y mantener la comunicación con la PC. La programación en el controlador permitió sin problemas controlar todas las secuencias del sistema.

TRABAJOS FUTUROS

1. Los materiales utilizados son de madera lo cual no garantiza una larga durabilidad de trabajo en un medio húmedo, por lo tanto una estructura metálica del sistema garantizaría su durabilidad.
2. Para aumentar la producción sin perder la eficiencia es necesario reducir el tiempo que demora el análisis del procesamiento digital de imágenes, ya que solo el análisis tarda 30 segundos. De modo que encontrar una programación que haga lo mismo en menos tiempo es lo ideal.
3. En el llenado se utiliza recipientes solo de prueba que no son de gran capacidad, por ello los correctos contenedores permitirían una producción eficiente.
4. El enchapado es muy simple por lo tanto la instalación de un enchapado profesional es lo ideal para que pueda salir al mercado.
5. El mecanismo diseñado para la clasificación da capacidad solo para tres botellas, por lo tanto se puede elaborar uno más grande que además de acumular botellas pueda llevarlos a contenedores especiales.

BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

[1] Departamento de estudios económicos, "Reporte Semanal". Scotiabank, Perú. Del 30 de Abril al 4 de Mayo del 2012.

[2] Gavilénez F, Héctor M. y otros, "Diseño e implementación de un sistema de control y verificación del nivel de llenado de botellas utilizando labview e imaq visión". Proyecto de grado para la obtención del título de ingeniero electrónico, Latacunga – Ecuador 2007.

[3] Ricardo Zelaya Moreno, "Estudio de Mercado de jugos y néctares en la ciudad de Arequipa ". [Online] <http://redsocialeducativa.euroinnova.es/pg/blog/read/631259/estudio-del-mercado-de-jugos-y-nctares-en-la-ciudad-de-arequipa>.(Marzo 2013)

[4] Electricitat BarberanS.L , "Proyecto de diseño del panel de control general de una línea embotelladora de vino". [Online] <http://upcommons.upc.edu/pfc/handle/2099.1/4298>. (Mayo 2013)

[5] Máquina llenadora de botellas artesanal. [Online]
<http://www.youtube.com/watch?v=nalfgNcd06M>. (Mayo 2013)

[6] Banda Transportadora con sistema de llenado. [Online]
<https://www.youtube.com/watch?v=-VO-x9DrJtM>.
(Setiembre 2011)

[7] José Porras y Miguel De la Cruz, “Clasification System base on computer vision”. Curso: Taller de Electrónica IV, Universidad Ricardo Palma. Julio 2011.

[8] W. Nieto, J Mora y E. Moncayo, “Proceso de Llenado automático de envases clasificado por color a través de un Robot Manipulador”. Programa de Tecnologías en Electricidad & Telecomunicaciones, Escuela Superior Politécnica Del Litoral. Guayaquil-Ecuador.

[9] Gavilénez F, Héctor M. y otros, "Diseño e implementación de un sistema de control y verificación del nivel de llenado de botellas utilizando labview e imagen visión". Proyecto de grado para la obtención del título de ingeniero electrónico, Latacunga – Ecuador 2007

[10] Eduardo Moran López, "Redes neuronales celulares aplicadas al procesamiento de imágenes". Diplomado para la actualización de profesorado, Universidad de Colima, México.

[11] Genaro Gutiérrez Becerril, "Análisis y detección de fallas estructurales en envases de vidrio utilizando procesamiento digital de imágenes". Tesis para obtener el grado de Maestro en Ciencias en Ingeniería, Instituto Politécnico Nacional, México D.F., Diciembre 2008.

[12] Ministerio de educación:"La imagen digital", Gobierno de España, GIMP Aplicaciones didácticas. Noviembre 2008.

[13] Pablo Roncagliolo B, "Redes Neuronales". Universidad de Valparaiso, Chile, Abril 2007.

[14] Jorge Rafael Valvert Gamboa, " Métodos y Técnicas de Reconocimiento de Rostros en Imágenes Digitales Bidimensionales". Trabajo de Graduación, Universidad de San Carlos de Guatemala. Junio 2006.

[15] Antonio Morán Cárdenas, Curso: "Control difuso y neuronal". Universidad Ricardo Palma, Marzo 2013.

[16] Banda Transportadora. [Online].
<http://www.slideshare.net/slufh3r/la-banda-transportadora>. (Mayo 2013)

[17] Motor Reductor. [Online].
<http://www.superrobotica.com/S330105.htm> (Junio 2002)

[18] Diodo emisor de luz infrarroja [Online].
<http://www.circuitoselectronicos.org/2010/05/sensor-de-infrarrojos-emisor-y-receptor.html> (Febrero 2011)

[19] Acrílico y policarbonato [Online].
<http://www.acrilico-y-policarbonato.com/acrilico.html>
(Marzo 2013)

[20] Tren de rodadura [Online].
[http://concurso.cnice.mec.es/cnice2006/
material107/mecanismos/mec_rueda_transporte.htm](http://concurso.cnice.mec.es/cnice2006/material107/mecanismos/mec_rueda_transporte.htm)
(Enero 2005)

[21] Leva
[Online].[http://concurso.cnice.mec.es/cnice2006/material1
07/operadores/ope_leva.htm](http://concurso.cnice.mec.es/cnice2006/material107/operadores/ope_leva.htm) (Julio 2005)

[22] Funcionamiento del motor reductor
[Online].[http://www.potenciaelectrome
canica.com/calculo-de-un-motorreductor](http://www.potenciaelectromecanica.com/calculo-de-un-motorreductor) (Junio 2013)

[23] Motores de limpiaparabrisas [Online].
[http://www.directindustry.es/prod
/osl-
italia/motorreductores-limpiaparabrisas-38050-
799789.html](http://www.directindustry.es/productos/osl-italia/motorreductores-limpiaparabrisas-38050-799789.html) (Setiembre 2005)

ANEXOS

Anexo 1: Características del PIC 16F877

CARACTERÍSTICAS	16F877
Frecuencia máxima	DX-20MHz
Memoria de programa flash palabra de 14 bits	8KB
Posiciones RAM de datos	368
Posiciones EEPROM de datos	256
Puertos E/S	A,B,C,D,E
Número de pines	40
Interrupciones	14
Timers	3
Módulos CCP	2
Comunicaciones Serie	MSSP, USART
Comunicaciones paralelo	PSP
Líneas de entrada de CAD de 10 bits	8
Juego de instrucciones	35 Instrucciones
Longitud de la instrucción	14 bits
Arquitectura	Harvard
CPU	Risc
Canales Pwm	2
Pila Harware	-
Ejecución En 1 Ciclo Máquina	-

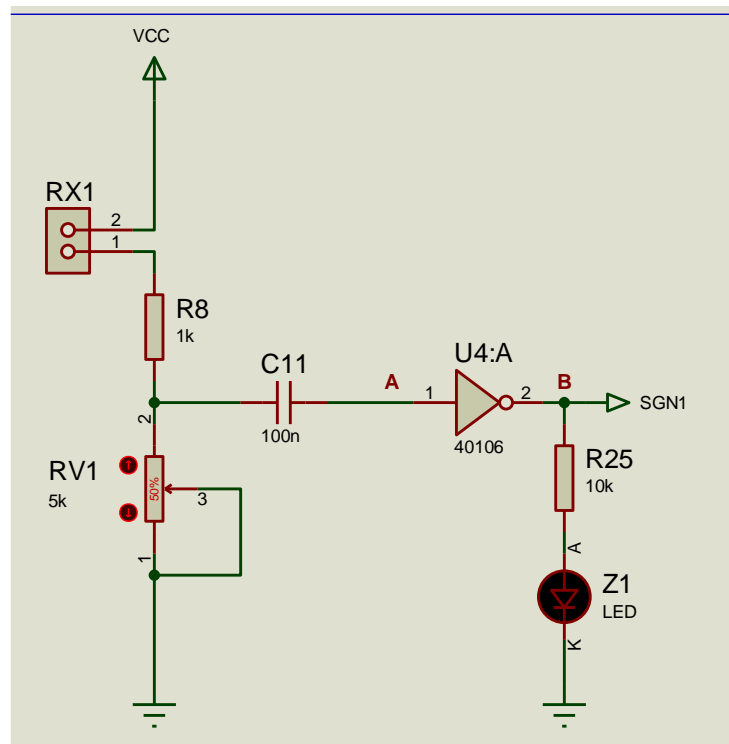
Anexo 2: Sensores Infrarrojos

El sistema cuenta con 5 sensores infrarrojos:

2 sensores de barrera infrarrojo colocados al inicio y al final de la faja.

3 sensores infrarrojos para medir el nivel de líquido de la botella llenada.

En la siguiente figura se muestra el esquema de conexión.

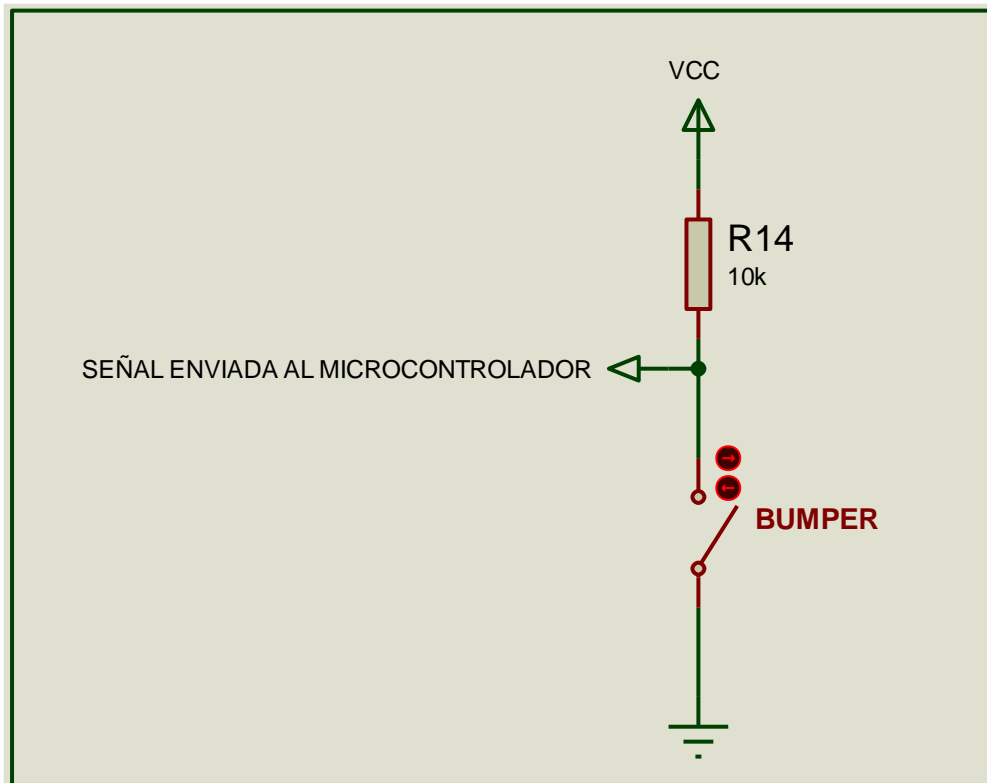


Esquema de conexión del sensor infrarrojo

Anexo 3: Bumpers o fines de carrera

El sistema cuenta con tres bumpers o fines de carrera que permiten detectar el momento en que el disco giratorio alcanza las posiciones angulares deseadas.

En la siguiente figura se muestra el esquema de conexión.



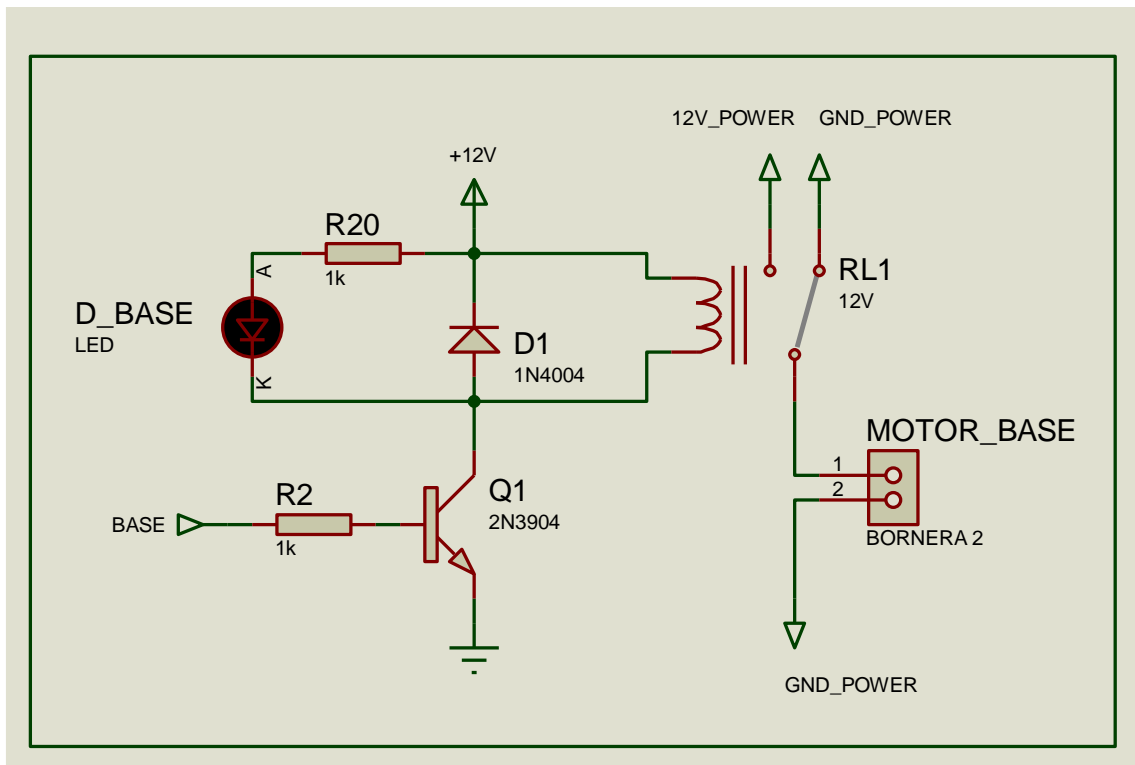
Esquema de conexión del Bumpers

Anexo 4: Actuadores

Respecto a los actuadores el sistema cuenta con 4 motores y 2 bombas:

- 1 Motor con reductor para el movimiento de la faja
- 1 Motor con reductor para el giro del disco circular de la base.
- 2 Motores con reductor para expulsión de la botella.
- 2 Bombas de agua.

Con el fin de desacoplar la parte lógica y la parte de potencia del sistema cada uno de estos motores y bombas son alimentados con una fuente independiente de 12V a través de un relay correspondiente a cada uno, tal como se muestra en la siguiente figura:



Esquema de conexión del actuador.