

Evaluación experimental de esquemas de iluminación aplicados a un proceso de clasificación de piezas basado en visión de máquina



José Ignacio Ortega Ortega

Jesús David Erazo

Universidad del Cauca

Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones

Departamento de Electrónica, Instrumentación y Control

Ingeniería en Automática Industrial

Popayán – Cauca

2018

Evaluación experimental de esquemas de iluminación aplicados a un proceso de
clasificación de piezas basado en visión de máquina



Monografía presentada como requisito parcial para optar por el título de ingenieros
en Automática Industrial

Director: Mg. Francisco Franco Obando

Codirectora: Judy Cristina Realpe

Universidad del Cauca

Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones

Departamento de Electrónica, Instrumentación y Control

Ingeniería en Automática Industrial

Popayán – Cauca

2018

Tabla de contenido

Resumen	9
Introducción.....	10
Capítulo 1. Generalidades	11
1.1. Proceso de iluminación en sistemas con visión de máquina.....	11
1.2. El espectro electromagnético.....	12
1.3. Propiedades de la luz.....	13
1.3.1. Reflexión	13
1.3.2. Absorción	14
1.3.3. Transmisión.....	14
1.4. Características generales de las fuentes de iluminación.....	16
1.4.1. Distribución espectral.....	16
1.4.2. Flujo Luminoso.....	16
1.4.3. Rendimiento luminoso.....	16
1.4.4. Iluminancia o Nivel de iluminación (lux).....	17
1.4.5. Intensidad luminosa (candela).....	17
1.4.6. Luminancia.....	18
1.5. Fuentes de iluminación	18
1.5.1. Lámparas incandescentes.....	18
1.5.2. Tubos fluorescentes.....	19
1.5.3. Iluminación LED.....	20
1.5.4. Iluminación Laser.....	20
1.6. Esquemas de iluminación	21
1.6.1. Iluminación frontal.....	21
1.6.2. Retroiluminación difusa.....	22
1.6.3. Iluminación por campo oscuro (Dark Field).....	22
1.6.4. Iluminación coaxial.....	23
1.6.5. Iluminación difusa tipo domo	23
1.6.6. Iluminación lateral	24
1.6.7. Iluminación por contraste (backlight)	24
1.6.8. Iluminación Laser o luz estructurada	25
1.7. Criterios definidos que permiten elegir esquemas de iluminación	26
1.7.1. Implementable físicamente en la banda.....	27
1.7.2. Posición de la cámara.....	27
1.7.3. Flexibilidad.....	27
1.7.4. Reparación y mantenimiento.....	27
1.7.4. Equilibrio costo necesidad.....	27
1.8. Cámaras y sensores ópticos.....	34
1.8.1. Cámaras.....	34

1.8.2. Sensores	35
1.8.2. Elemento de captura de imagen en la Planta Clasificadora	36
1.9. Planta Clasificadora	36
Capítulo 2. Implementación del algoritmo para el proceso de clasificación.	38
2.1. Estado inicial de la planta clasificadora	38
2.2. Acondicionamiento de la planta de clasificación.	38
2.2.1. Selección de equipos	40
2.2.2. Comunicación de equipos en el proceso de clasificación.	41
2.2.3. Diagrama de flujo del proceso	42
2.2.4. Diagrama de P&ID	43
2.2.4.1. Control de velocidad.	43
2.2.4.2. Control de Piezas.	43
2.2.4.3. Control Posicionador.	43
2.3. Sistema de visión de máquina.	44
2.3.1. Elementos hardware	45
2.3.1.4. Selección del sistema embebido.	47
Capítulo 3. Resultados	57
3.1. Funcionalidad de la planta	57
3.2. Pruebas	60
3.2.1. Prueba 1: Primeras fotografías.	60
3.2.2. Prueba 2: Segmentación con fondo negro	60
3.2.1. Prueba 3: Cambio de fondo	61
3.3. Segmentación de imágenes bajo los tres esquemas de iluminación.	61
3.3.1. Prueba 1 Esquema Coaxial	62
3.3.2. Prueba 2 Esquema Dark Field	62
3.3.3. Prueba 3 Esquema Lateral	62
3.4. Incidencia de la luz en el plano HSV	63
3.4.1. Plano H (hue)	63
3.4.2. Plano S (saturation)	64
3.4.3. Plano V (Value)	64
3.6. Rendimiento del algoritmo clasificador por forma	67
3.6.1. Matriz de Confusión	67
3.6.2. Algoritmo de Forma	68
3.6.3. Resultados Matriz de Confusión Grupo 1 bajo Esquema Coaxial	69
3.6.4. Resultados Matriz de Confusión Grupo 1 bajo esquema Dark Field	70
3.6.4. Resultados Matriz de Confusión Grupo 1 bajo esquema Lateral	71
3.7. Rendimiento del algoritmo clasificador por color - Esquema Coaxial	72
3.7.1. Rendimiento del algoritmo clasificador por color - Esquema Dark Field	73

3.7.2. Rendimiento del algoritmo clasificador por color - esquema Lateral	74
3.8. Rendimiento del algoritmo clasificador con Filtro - esquema coaxial.....	75
3.8.1. Rendimiento del algoritmo clasificador por Forma con filtro - Esquema Dark Field.....	76
3.8.2. Rendimiento del algoritmo clasificador por forma con filtro - esquema Lateral.....	77
Conclusiones.....	78
Referencias	79

Lista de Figuras

Figura. 1. Componentes de un sistema de visión artificial.	11
Figura. 2. Espectro visible por el ojo humano.	12
Figura. 3. Comportamiento de la luz (reflexión, absorción y transmisión).	13
Figura. 4. Fenómeno de reflexión de la luz.	14
Figura. 5. Reflexión especular (superficie uniforme) y reflexión difusa de la luz.	14
Figura. 6. Transmisión directa.	15
Figura. 7. Transmisión difusa de la luz.	15
Figura. 8. Transmisión selectiva de la luz.	15
Figura. 9. Gráfico de Distribución Espectral para lámpara de sodio de alta presión y para lámpara de halogenuros metálicos.	16
Figura. 10. Gráfico representativo del nivel de iluminancia para un área de 1 m ²	17
Figura. 11. Luminancia de una fuente de luz.	18
Figura. 12. Gráfico de distribución espectral de una lámpara incandescente.	19
Figura. 13. Lámpara incandescente con sus partes.	19
Figura. 14. Tubo fluorescente con sus partes.	20
Figura. 15. Esquema de Iluminación Frontal.	22
Figura. 16. Esquema de Iluminación Dark Field.	23
Figura. 17. Esquema de Iluminación Coaxial.	23
Figura. 18. Esquema de Iluminación difusa Tipo Domo.	24
Figura. 19. Esquema de Iluminación Lateral.	24
Figura. 20. Esquema de Iluminación por contraste.	25
Figura. 21. Esquema de Iluminación Laser.	25
Figura. 22. Toma de imagen esquema Retroiluminación Difusa.	29
Figura. 23. Escenas captadas sin iluminación frontal y con iluminación frontal.	29
Figura. 24. Captura de imagen para esquema de Iluminación Frontal.	30
Figura. 25. Captura de imagen para esquema de Iluminación Frontal.	31
Figura. 26. Captura de imagen para esquema de Iluminación Dark Field sobre una moneda.	31
Figura. 27. Captura de imagen de elemento altamente reflectante mediante esquema de iluminación Coaxial.	32
Figura. 28. Captura de imagen para esquema Tipo Domo sobre una superficie reflectando.	32
Figura. 29. Captura de imagen para esquema de Iluminación lateral, gracias a este esquema es posible extraer características muy puntuales de un objeto.	33
Figura. 30. Captura de imagen para esquema de Iluminación Backlight.	34
Figura. 31. Gráfico de un sensor tipo CCD.	35
Figura. 32. Gráfico de un sensor tipo CMOS.	35

Figura. 33. Planta Clasificadora de Laboratorio de Control de Procesos.....	37
Figura. 34. Estado inicial de la planta clasificadora. a) Panel en campo. b) Panel frontal c) Tablero de control d) Planta clasificadora.	39
Figura. 35. Planta clasificadora rediseñada.....	40
Figura. 36. Elementos seleccionados para la Planta Clasificadora.....	41
Figura. 37. Interfaz de usuario de la planta clasificadora.	41
Figura. 38. Recepción y envío de señales discretas entre el PLC y los diferentes equipos para el proceso de clasificación de piezas.	42
Figura. 39. Diagrama de flujo proceso clasificación de piezas	43
Figura. 40. Diagrama P&ID del sistema de clasificación de piezas	44
Figura. 41. Diagrama de bloques: proceso de captura y recepción de la imagen.	45
Figura. 42. Cuarto donde se alojan los dispositivos de visión.....	46
Figura. 43. Lámpara SN6000K.	46
Figura. 44. Sensor de presencia infrarrojo RIKO.....	46
Figura. 45. Webcam Logitech C210.	47
Figura. 46. Imágenes capturadas con una cámara Logitech c210 sobre un mismo escenario..	48
Figura. 47. Circuito de adecuación de señales discretas.	48
Figura. 48. Se presentan las principales características de la librería OpenCV. Como se observa, tiene múltiples funciones para el área de visión y procesamiento de imágenes.....	50
Figura. 49. Piezas de prueba utilizadas con diferente iluminación.....	51
Figura. 50. Piezas de forma geométricas para banda transportadora de clasificación.....	51
Figura. 51. Ejecución del script diagrama de flujo general.	52
Figura. 52. Extracción de la cabecera del algoritmo principal.	53
Figura. 53. Fracción del algoritmo-configuración.....	53
Figura. 54. Fracción del algoritmo-captura de imagen.	54
Figura. 55. Fracción del algoritmo- recorte de imagen.	54
Figura. 56. Recorte fotografía a ser procesada.	54
Figura. 57. Segmentación de una imagen por umbralización manual.	55
Figura. 58. Fracción del algoritmo por Forma.....	55
Figura. 59. Contorno que dibuja el algoritmo en una ficha cuadrada.	56
Figura. 60. Fracción del algoritmo por color.	56
Figura. 61. Mejoras en el desplazamiento del clasificador	58
Figura. 62. Mejoras realizadas al módulo de visión.....	59
Figura. 63. Estudiantes de automática en el Laboratorio de instrumentación y control.	59
Figura. 64. Escenas captadas con un objeto cuadrado de diferente color.....	60
Figura. 65. Imágenes segmentadas	60

Figura. 66. Resultado del experimento con escenario fondo blanco bajo tres esquemas	61
Figura. 67. Resultado del proceso de segmentación para un fondo blanco y negro sin fichas.	61
Figura. 68. Resultado del algoritmo de segmentación bajo esquema coaxial.	62
Figura. 69. Resultado del algoritmo de segmentación bajo esquema Dark Field.	62
Figura. 70. Resultado del algoritmo de segmentación bajo esquema lateral.	63
Figura. 71. Planos H pieza color verde tomado bajo los tres esquemas de iluminación.	63
Figura. 72. Plano S pieza color verde tomado bajo los tres esquemas de iluminación	64
Figura. 73. Plano V pieza color verde tomado bajo los tres esquemas de iluminación.	65
Figura. 74. Resultado de segmentación bajo esquema Coaxial y Dark Field	65
Figura. 75. Resultado de segmentación con nuevos rangos bajo esquema Dark Field	66
Figura. 76. Fotografía transición del esquema coaxial al Dark Field.....	66
Figura. 77. Apertura y cierre del diafragma.	66
Figura. 78. Matriz de confusión para dos clases.	67
Figura. 79. Piezas divididas en grupos para medir el rendimiento del clasificador.	68
Figura. 80. Resultados de la Matriz de Confusión usando el algoritmo Coaxial	69
Figura. 81. Resultados de la Matriz de Confusión usando el algoritmo bajo Dark Field	70
Figura. 82. Resultados de la Matriz de Confusión usando el algoritmo bajo	71
Figura. 83. Resultados de la Matriz de Confusión usando el algoritmo bajo Coaxial	73
Figura. 84. Resultados de la Matriz de Confusión usando el algoritmo bajo Dark Field	73
Figura. 85. Resultados de la Matriz de Confusión usando el algoritmo bajo Lateral	74
Figura. 86. Resultados de la Matriz de Confusión usando el algoritmo bajo Coaxial con filtro.....	75
Figura. 87. Resultados de la Matriz de Confusión usando el algoritmo bajo Dark Field con filtro. ..	76
Figura. 88. Resultados de la Matriz de Confusión usando el algoritmo bajo Lateral con filtro.....	77

Lista de Tablas

Tabla 1. Color que se percibe en función de la longitud de onda en nanómetros reflejada.	12
Tabla 2. Tabla comparativa de fuentes de iluminación.	21
Tabla 3. Resumen de principales ventajas y desventajas de algunos esquemas de iluminación. ..	26
Tabla 4. Ponderación de los esquemas de iluminación respecto a los criterios definidos.....	27

Resumen

La iluminación es un aspecto fundamental que se debe tener en cuenta en los sistemas de clasificación por visión de máquina; de la escogencia correcta de ésta depende la eficiencia y desempeño del sistema. Dependiendo de la aplicación, se requiere una técnica de iluminación adecuada que permita obtener una imagen correcta para su posterior procesamiento. Actualmente, gracias al desarrollo e investigación en esta área, se logra la construcción de sistemas de clasificación cada vez más robustos y confiables.

En este proyecto se muestra la evaluación experimental de tres esquemas de iluminación que son implementados, estudiados y validados en una Planta de Clasificación del laboratorio de Control de Procesos de la Universidad del Cauca.

Abstract

Lighting is a fundamental aspect that must be taken into account in machine vision classification systems; The efficiency and performance of the system depends on the correct choice of this. Depending on the application, an adequate lighting technique is required to obtain a correct image for further processing. Currently, thanks to the development and research in this area, the construction of increasingly robust and reliable classification systems is achieved.

This project shows the experimental evaluation of three lighting schemes that are implemented, studied and validated in a Classification Plant of the Process Control Laboratory of the University of Cauca.

Introducción

Una de las aplicaciones más frecuentes de la visión de máquina a nivel industrial son las plantas de clasificación de piezas; estos sistemas en ambientes controlados se componen básicamente de iluminación de la escena y una cámara que se encarga de capturar la imagen de un objeto, posteriormente, se realiza su procesamiento por medio de un software, el cual, incluye algoritmos para procesar y analizar cualquier tipo de información que se desea segmentar y por último, se activa un actuador final que es el encargado de posicionar el objeto para su clasificación.

Un factor determinante en el rendimiento de una planta de este tipo es la iluminación que se hace sobre el objeto que se va a clasificar. Todo objeto posee una absorción de radiación, con lo cual, la energía reflejada es función de sus características geométricas y del material, por lo tanto, la longitud de onda de absorción es afectada por el medio y el tipo de iluminación que se presente al instante de digitalizar una imagen, generando en ocasiones errores en las funciones del sistema de visión de máquina; esto obliga a incrementar la robustez de los algoritmos y por lo tanto, las capacidades de los procesadores para operar a la velocidad que el proceso industrial requiere, lo que evidentemente se refleja en un aumento en el costo de equipos de cálculo computacional.

Cada esquema de iluminación destaca ciertas características en una imagen, algunos resaltan la textura de la superficie, otros permiten imágenes con bordes bien definidos; de igual forma, se puede lograr capturar la estructura de un objeto dependiendo del tipo de proyector de luz que se utilice o el ángulo de incidencia que se maneje. Con lo anterior se concluye, que dependiendo de la aplicación, se requiere una técnica de iluminación adecuada (direccional, lateral, difusa, anillo, difusa axial, estructurada, contraluz, etc) que permita obtener una imagen correcta para su posterior procesamiento.

En este documento se presentan los principales resultados obtenidos de la evaluación experimental de tres esquemas de iluminación que fueron implementados en la Planta de Clasificación por visión de máquina del Laboratorio de Control de Procesos de la Universidad del Cauca. En el primer capítulo, se exponen los principales conceptos teóricos que permiten el entendimiento del documento, posteriormente, se muestra en detalle la definición de varios esquemas de iluminación y la elección de tres de ellos usando cinco criterios básicos. En el capítulo dos, se plantea el rediseño de la Planta de Clasificación, ya que sus condiciones iniciales no permiten ejecutar con éxito los objetivos planteados en este proyecto; posteriormente, se muestra la forma cómo los esquemas de iluminación seleccionados son implementados en la Planta de Clasificación rediseñada usando un sistema embebido adecuado. En el capítulo tres, se muestran los resultados más relevantes derivados del proceso de implementación y evaluación de los esquemas de iluminación. Finalmente, se presentan las conclusiones al respecto.

Capítulo 1. Generalidades

En este capítulo se mencionan aspectos generales sobre las distintas tecnologías de iluminación que existen en el mercado para sistemas basados en visión artificial donde se relacionan sus principales ventajas y desventajas; adicionalmente, se exponen los esquemas de iluminación más comunes aplicados a visión de máquina y los tipos de dispositivos de captura de imagen. Posteriormente, se presenta una tabla con criterios definidos que permiten elegir qué tipos de esquemas son los más adecuados a implementar sobre la planta clasificadora y cuál es la tecnología de iluminación más conveniente a usar para la evaluación experimental. Finalmente, se lleva a cabo una descripción general del proceso de clasificación donde se evaluarán los esquemas de iluminación seleccionados.

1.1 Proceso de iluminación en sistemas con visión de máquina.

La iluminación juega un papel muy importante dentro de los sistemas de visión artificial; de la correcta escogencia de ella depende en gran parte la complejidad en la extracción de determinadas características del objeto inspeccionado, tanto así, que la instalación de un esquema de iluminación no adecuado incrementará la complejidad del algoritmo encargado de la segmentación de la imagen obtenida y podría no segmentar correctamente las características requerida por el usuario [1]. Por lo anterior, es sumamente necesario controlar la iluminación en un sistema de visión artificial y adaptarlo a los requerimientos del proceso para facilitar en análisis y posterior interpretación de la escena captada. A continuación, en la Figura. 1 , se muestran los principales componentes de un sistema con visión de máquina.

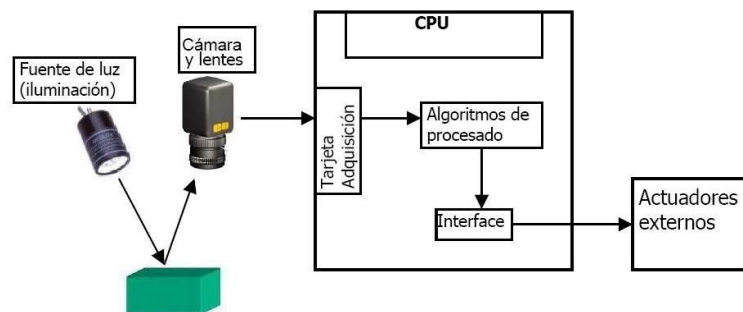


Figura. 1. Componentes de un sistema de visión artificial.

Tomado de: http://tecnologiainformaticasistemas.blogspot.com/2016/12/VisionArtificial_12.html

Partiendo de la importancia de la iluminación en estos sistemas, en primera instancia se debe entender que la luz es la radiación electromagnética que estimula nuestra respuesta visual y al comprender su comportamiento físico se puede decir que los datos obtenidos de una imagen no son más que la distribución espacial de ella sobre una escena [2].

El principio básico de visión ya sea biológico o artificial se basa en que cuando el objeto iluminado modifica la luz entrante de manera que los rayos salientes sean distintos a los rayos incidentes, es posible afirmar que el objeto genera contraste, el caso contrario en que el objeto no modifique el rayo de luz incidente de manera apreciable, entonces el objeto no es visible.

Expresando matemáticamente la distribución de energía espectral como $I(\varphi)$ donde φ es la longitud de onda perteneciente al espectro electromagnético visible (de 380 nm a 770 nm), la luz que se recibe desde un objeto opaco se puede expresar como:

$$I(\varphi) = R(\varphi) L(\varphi)$$

Donde $R(\varphi)$ representa el factor de reflexión del objeto y $L(\varphi)$ es la distribución de energía incidente, por tanto, el color que se percibe de un objeto no solo depende de la naturaleza que este posea sino de la naturaleza del haz de luz que inciden sobre él [3].

1.2 El espectro electromagnético.

Al flujo saliente de energía de una fuente en forma de ondas electromagnéticas se le denomina radiación electromagnética. Esta radiación puede ser de origen natural o artificial. El espectro electromagnético es el conjunto de todas las frecuencias (número de ciclos de la onda por unidad de tiempo) posibles a las que se produce radiación electromagnética [4].

El espectro visible por el ojo humano ocupa un pequeño intervalo dentro de todo el espectro electromagnético que contiene ondas tan distintas como lo son los rayos cósmicos, los rayos ultravioletas, rayos infrarrojos, ondas de radio o televisión etc. Cada tipo de onda comprende un intervalo definido por una magnitud llamada longitud de onda (l_{onda}), tal como se aprecia en la Figura. 2 y se especifica en la Tabla 1 [5].

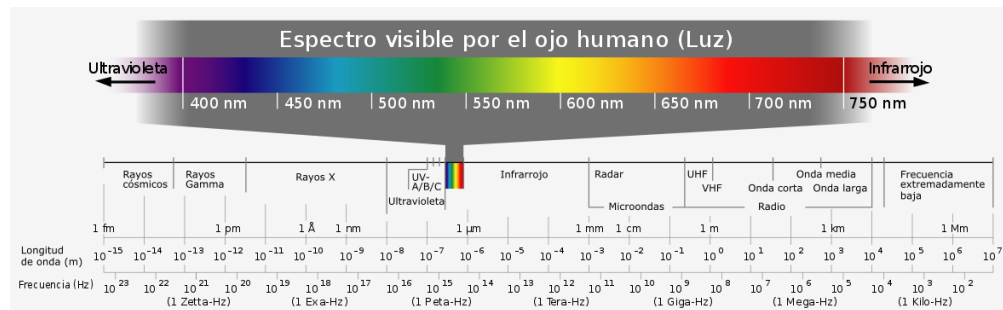


Figura. 2. Espectro visible por el ojo humano.

Tomado de: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Electromagnetic_spectrum-es.svg

Tabla 1. Color que se percibe en función de la longitud de onda en nanómetros reflejada.
Fuente: Elaboración propia.

COLOR	LONGITUD DE ONDA (Nm)
Violeta	380-435
Azul	435-495
Verde	495-565
Amarillo	565-590
Naranja	590-625
Rojo	625-780

1.3 Propiedades de la luz.

Para realizar el diseño de un sistema de iluminación, un factor importante a tener en cuenta es obtener un alto contraste entre el elemento y el fondo, así la tarea de extracción de características es mucho más sencilla y por tanto requerirá menor procesamiento computacional, por tanto, es necesario conocer los fenómenos básicos de la luz. Cuando un elemento es iluminado dicho contraste se genera debido a que una parte de la luz es reflejada y la otra parte es transmitida, ésta es la que constituye la entrada al sistema de visión; a partir de este comportamiento se pueden considerar tres fenómenos: reflexión, absorción y transmisión, como se muestra en la Figura 3.

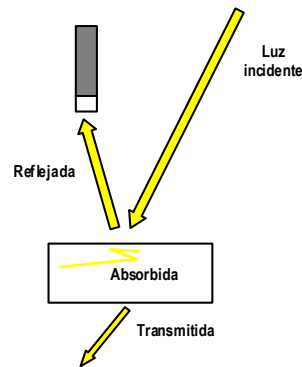


Figura. 3. Comportamiento de la luz (reflexión, absorción y transmisión).
Fuente: Elaboración propia.

1.3.1 Reflexión

La reflexión de la luz se define como el cambio de dirección de los rayos que ocurren en un mismo medio después de incidir sobre un medio distinto, este principio se rige por dos leyes:

- El rayo incidente, el reflejado y la normal a la superficie en el punto de incidencia están en el mismo plano.
- El ángulo del rayo incidente i y el de reflexión r son iguales.

No se cambia la velocidad de la luz v , ni su frecuencia f , ni su longitud de onda (λ) [4]. Este fenómeno se aprecia en la Figura 4.

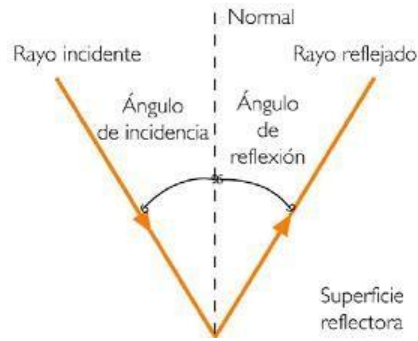


Figura. 4. Fenómeno de reflexión de la luz.
Tomado de: <https://definicion.de/reflexion-de-la-luz/>

Cuando el objeto iluminado presenta deformaciones en su superficie se presentan dos tipos de reflexiones de luz: reflexión especular y reflexión difusa, como se muestra en la Figura 5.

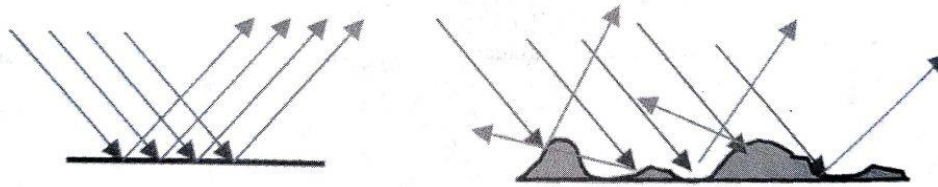


Figura. 5. Reflexión especular (superficie uniforme) y reflexión difusa de la luz (superficie no uniforme).
Tomado de <http://www.electrontools.com/Home/WP/2017/11/24/las-leyes-de-reflexion-de-la-luz/>

1.3.1.1 Reflexión especular: se llama así a la reflexión que produce la luz sobre una superficie uniforme o pulida (espejo) y cambia su dirección sin cambiar el medio por donde se propaga [6].

1.3.1.2 Reflexión difusa: Es la reflexión de la luz desde una superficie, por tanto el rayo incidente es reflejado en muchos ángulos a diferencia de la reflexión especular que se hace en un único ángulo. La visibilidad de un objeto se da gracias a la reflexión difusa, pues la luz reflejada por el objeto es la que permite formar la imagen en el ojo del observador [6].

1.3.2. Absorción

Cuando la luz choca contra un elemento, parte de esta luz es reflejada y parte es absorbida por el objeto, las longitudes de onda que son reflejadas son determinadas por el color que percibe el observador. Existen tres tipos de absorción: sencilla total, parcial y selectiva [7].

1.3.3. Transmisión

Propiedad de la luz cuando esta pasa a través de un elemento, este comportamiento se divide en tres: la transmisión directa, difusa y selectiva [7].

1.3.3.1 Transmisión directa: se da cuando la luz pasa a través de un elemento y no produce cambios en la dirección o calidad de la luz, esto se da en elementos como vidrio transparente o el aire (Figura 6) [7].

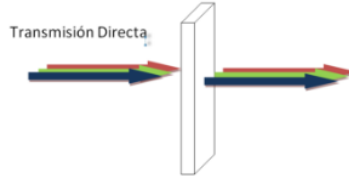


Figura. 6. Transmisión directa.
Tomado de <http://fotografiaenfasis.blogspot.com/2016/04/transmision-de-la-luz.html>

1.3.3.2 Transmisión difusa: Ésta se produce cuando la luz atraviesa un elemento de superficie no regular y da como resultado una luz más blanca, reduce sombras y genera menos contraste (Figura 7) [7].

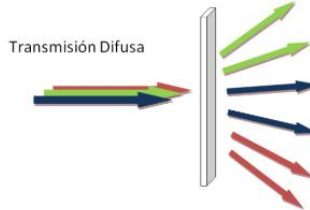


Figura. 7. Transmisión difusa de la luz.
Tomado de <http://fotografiaenfasis.blogspot.com/2016/04/transmision-de-la-luz.html>

1.3.3.3 Transmisión selectiva: Cuando la luz pasa a través de un filtro coloreado este absorbe determinadas longitudes de onda y deja pasar otras, por ejemplo, si se pone un filtro color azul absorberá ondas color rojas y verde de la luz blanca y transmitirá en su mayoría las ondas color azul (Figura 8) [7].

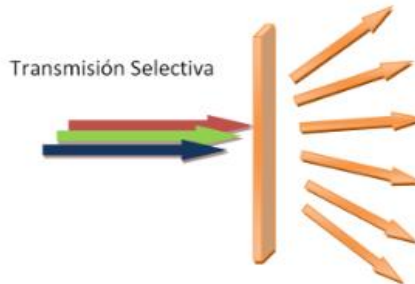


Figura. 8. Transmisión selectiva de la luz.
Tomado de <http://fotografiaenfasis.blogspot.com/2016/04/transmision-de-la-luz.html>

1.4. Características generales de las fuentes de iluminación.

La correcta selección de una fuente de iluminación depende de un número de factores que se deben estudiar para llegar a la correcta escogencia de ésta y poder dar solución al problema que se aborda, aspectos como características superficiales del elemento, geometría, condiciones de trabajo hacen que se tenga que decidir por una iluminación con características específicas según el caso, por lo tanto se listan los distintos factores y una vez conocidas se deberá escoger la más adecuada para el entorno de trabajo.

1.4.1. Distribución espectral.

Esta distribución representa la energía radiada por la luz en longitudes de onda dentro del espectro visible, en la Figura 9, se observa la distribución espectral para una lámpara de sodio de alta presión; en ésta la mayor parte de energía radiada se encuentra en los tonos amarillos y naranjas a diferencia de la lámpara de halogenuros metálicos que su distribución está repartida en todo el espectro visible, lo cual da como resultado una emisión de luz blanca [8]. Para excitar al sensor de la imagen y lograr una toma de imagen adecuada la distribución de la fuente de luz necesariamente debe estar incluida dentro de la respuesta espectral de la cámara.

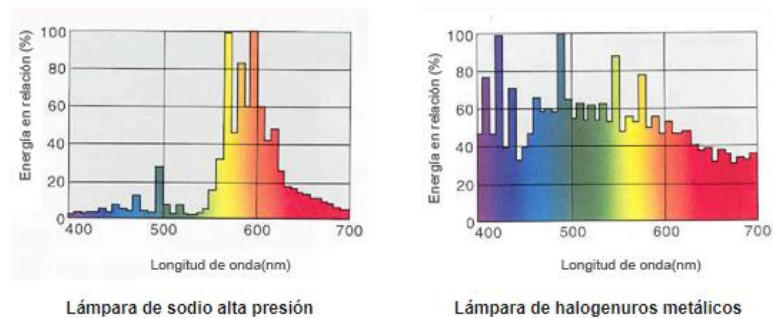


Figura. 9. Gráfico de Distribución Espectral para lámpara de sodio de alta presión y para lámpara de halogenuros metálicos.

Tomado de: <http://internal.schreder.com/es-cl/centro-formacion/esencial-alumbrado/spectral-distribution-of-a-light-source>.

1.4.2. Flujo Luminoso.

Se define como la cantidad de potencia (watts) emitida en forma de radiación luminosa que se encuentra dentro del espectro visible (390 a 750 nm) y por tanto será visible para el ojo humano, se representa con la letra griega Φ y su unidad es el lumen (Lm) [9].

1.4.3. Rendimiento luminoso.

Cuando una fuente de luz es encendida, no toda la energía es aprovechada en forma de luz, gran parte de esta se transforma en calor y otra en forma de luz, el rendimiento luminoso se define entonces como la iluminación efectiva [10] y se representa así:

$$n = \frac{\Phi}{P}$$

Donde: n = rendimiento lumínico [n]

Φ = flujo luminoso en lúmenes [Lm]

P = potencia eléctrica de la lámpara en watts [W]

1.4.4. Iluminancia o Nivel de iluminación (lux).

Representa la densidad del flujo luminoso sobre una superficie y se define como el flujo luminoso que choca contra una superficie y el tamaño de ésta (Figura 10), su unidad es el **lux**(lx) [10] y se representa de la siguiente manera:

$$E = \frac{\Phi}{S}$$

Donde: E = nivel de iluminación [Lx]

Φ = flujo luminoso [Lm]

s = superficie a iluminar [m^2]

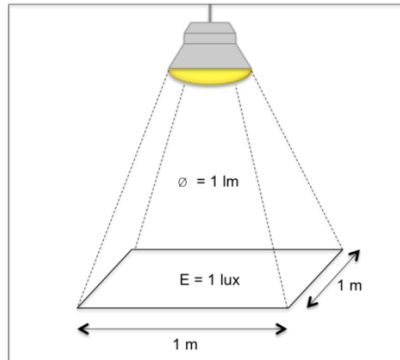


Figura. 10. Gráfico representativo del nivel de iluminación para un área de 1 m².

Tomado de: <https://grlum.dpe.upc.edu/manual/fundamentosIluminacion-magnitudesLuminosas.php>

1.4.5. Intensidad luminosa (candela).

Se define como la cantidad de luz radiada por una fuente durante un segundo en una dirección dada y para un ángulo sólido de valor de estereorradián (Sr.), se representa por la letra I y su unidad es la candela Cd [12].

La intensidad luminosa de una fuente de luz se rige por la siguiente expresión:

$$I = \frac{\Phi}{w}$$

Donde: I = intensidad luminosa en la dirección dada [Cd]

Φ = flujo luminoso dentro del ángulo sólido [Lm]

w = valor del ángulo sólido en estereorradianes [Sr]

1.4.6 Luminancia.

Es la magnitud que mide el brillo de objetos iluminados tal y como son observados por el ojo humano, por ejemplo, si se ven dos objetos iluminados el ojo humano verá con mayor claridad el que posea un valor de luminancia más alto (Figura 11). [13], se representa por la siguiente expresión:

$$L = \frac{d^2 * F}{dS d\Omega \cos \theta}$$

Donde: F = flujo luminoso en lúmens [lm]

dS = superficie del elemento iluminado [m^2]

$d\Omega$ = elemento de ángulo sólido, en estereorradianes

θ = ángulo entre la superficie S [S_n] y la dirección considerada [d]

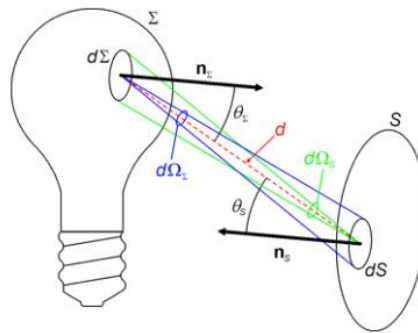


Figura. 11. Luminancia de una fuente de luz.

Tomado de: <http://www.efectoled.com/blog/que-es-la-luminancia/>

1.5 Fuentes de iluminación

Actualmente, existe en el mercado una amplia gama de fuentes de luz artificial con las que un diseñador puede contar, cada una de ellas con características de luminancia, iluminancia, costo y distribución espectral distintas, que según las necesidades del proceso deberán adaptarse para lograr resaltar las características deseadas de la escena captada. A continuación, se describen las fuentes más representativas:

1.5.1 Lámparas incandescentes.

Fue la primera forma de generar luz a partir de energía eléctrica, su principio de funcionamiento se basa en calentar un filamento generalmente de tungsteno o halógeno hasta la incandescencia aplicando corriente por él, este efecto produce la evaporación del filamento debido a las altas temperaturas hasta llegar a romperse, por esto se considera que tienen una vida útil media de 1000 horas. Son la fuente de luz más tradicional y su uso en los hogares es bastante extendido por su bajo costo económico y además no requieren equipos auxiliares para su encendido. Cuando los picos de distribución se encuentran cercanos a los tonos rojos o

amarillos (Figura 12), se observará un tono con mayor calidad, por eso son los más apetecidos para el hogar.

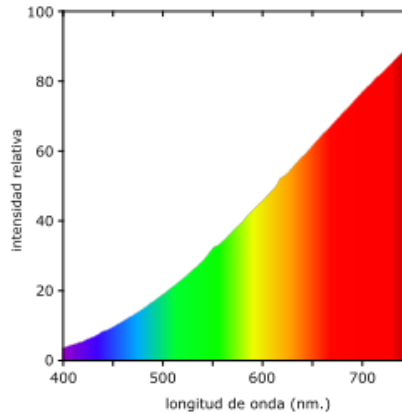


Figura. 12. Gráfico de distribución espectral de una lámpara incandescente. Tomado de <http://entrecieloytierra.com/articulos/feng-shui/la-luz-dep-spd-eficacia-luminosa/>

Este tipo de lámparas están compuestas por los siguientes elementos (ver Figura 13):

- Ampolla: Es una cubierta de vidrio generalmente de sodocalcio o vidrio blanco que da forma a la lámpara y protege el filamento del exterior, evitando que se queme, la ampolla puede ser transparente o de color [14].
- Filamento: Está fabricado en materiales como el tungsteno o halógeno, la eficacia de la lámpara depende directamente de la temperatura a la que este filamento es calentado, a mayor temperatura mayor cantidad de energía radiada dentro del espectro visible [15].
- Gas de relleno: Se trata de un gas inerte que incrementa la vida útil de la lámpara porque reduce la evaporación del filamento producida por la corriente aplicada, los gases más utilizados son el nitrógeno y el argón [16].

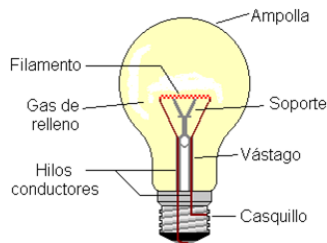


Figura. 13. Lámpara incandescente con sus partes. Tomado de <http://fisica1prepacl.blogspot.com/2015/05/lampara-incandescente.html>

1.5.2 Tubos fluorescentes.

El principio de funcionamiento está basado en incidir radiación ultravioleta sobre la película fluorescente que recubre la pared interior del tubo mediante una descarga eléctrica en el vapor de mercurio encerrado, tienen un rendimiento luminoso que puede estimarse entre 50 y 80 lúmenes por vatio (lm/W) y su vida útil es de 6000

horas [17]. En aplicaciones de visión artificial es fundamental hacer uso de tubos que operen al menos a 25kHz debido a que las cámaras son sensibles a su efecto de parpadeo, por lo cual se obtendrían imágenes con intensidad variable. Se compone de los siguientes elementos (ver Figura 14):

- Electrodo: Son filamentos de tungsteno enrollados en doble o triple espiral que están recubiertos por una sustancia por lo general de bario o cesio, éste emite gran cantidad de electrones cuando se le aplica una tensión eléctrica que produce incremento en la temperatura y en consecuencia emisión de electrones [18].
- Gas de relleno: Se trata de un gas fácilmente ionizable como el argón o el neón, dentro del tubo existe una pequeña cantidad de mercurio en estado líquido que pasa a un estado gaseoso cuando se pasa corriente a través del gas [18].
- Recubrimiento fluorescente: Es el encargado de transformar en luz visible las radiaciones ultravioletas producidas en la descarga, aproximadamente el 90% de la luz emitida se debe a este proceso [18].

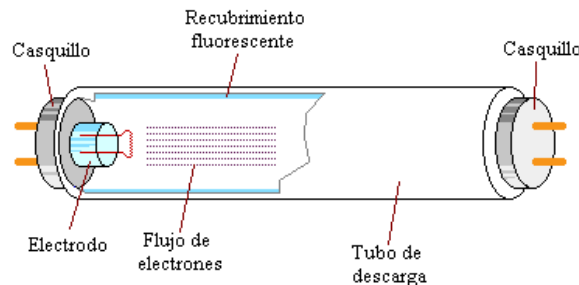


Figura. 14. Tubo fluorescente con sus partes.
Tomado de: <http://elbombilloinf.blogspot.com/2010/10/el-bombillo.html>

1.5.3 Iluminación LED.

Diodo emisor de luz semiconductor de tipo p-n, está recubierto de una resina epoxi que le brinda protección y provee un control óptico de la luz emitida pues incrementa el flujo luminoso y reduce las reflexiones en la superficie del semiconductor. Este tipo de lámparas generan una baja intensidad de luz por lo que es necesario formar agrupaciones de mayor o menor número según la intensidad luminosa deseada. La esperanza de vida de estos dispositivos es alta y bastante fiable, pues al carecer de filamento luminiscente son inmunes a las vibraciones presentes en entornos industriales [19]. El periodo de vida se estima es de 50.000 horas, por tanto, los costos de mantenimiento son mínimos.

1.5.4 Iluminación Laser.

Mediante este tipo de iluminación se logra obtener imágenes en tercera dimensión, el método usado se basa en posicionar la fuente de luz en un ángulo conocido respecto a la cámara y al objeto, posteriormente se procede a efectuar un barrido con un haz de luz plano de tal forma que si incide sobre una superficie no plana la cámara observará una distorsión sobre la línea proyectada. Esta distorsión será proporcional a la altura del objeto [20].

De acuerdo a la información anterior, se realiza una tabla comparativa donde se describen las ventajas y desventajas de cada fuente de iluminación.

Tabla 2. Tabla comparativa de fuentes de iluminación.

Fuente: Elaboración propia.

Fuente de iluminación	Ventajas	Desventajas
Incandescentes	*Bajo costo *Fácil instalación	*Genera mucho calor *Periodo de vida bajo
Tubos fluorescentes	*Buena luz difusa *Bajo costo *Bajo consumo energético	*Precisan balastos de alta frecuencia para su funcionamiento *Voluminosos.
LED	*No genera calor *Robustez *Bajo consumo energético *Bajo costo de mantenimiento *Baja tensión	*Alto Costo económico *Variedad limitada en comparación con otras fuentes de luz *Periodo de vida alto
Laser	*Imágenes en tres dimensiones *Seguridad ocular para los trabajadores *Frágil	*Alto costo económico

Después de conocer las diferentes fuentes de iluminación, se hace necesario discutir acerca de los esquemas de iluminación. La correcta escogencia del esquema iluminación en un sistema de visión artificial es tan importante que hace puede marcar la diferencia entre una segmentación exitosa y una no exitosa, así mismo, el tiempo de carga computacional se ve reducido cuando el sistema trabaja con la iluminación adecuada; por esto es vital llevar a cabo una buena escogencia del esquema, pues cada uno de ellos tiene un propósito distinto porque se resaltan diferentes características del objeto que se encuentra siendo observado. A continuación, se describen diferentes esquemas de iluminación reportados en la literatura.

1.6 Esquemas de iluminación

Cuando se desea captar con una cámara un objeto o una determinada característica, la luz proporcionada por la fuente de iluminación y que es reflejada por el objeto es recogida por la cámara, por lo tanto, la apariencia de la imagen tomada no solo dependerá de la posición de la fuente sino de la ubicación en que ésta se encuentre respecto al objeto y la cámara. Existen distintas técnicas para resaltar u opacar determinadas características de un objeto.

1.6.1 Iluminación frontal.

Se posiciona la cámara mirando al objeto en la misma dirección que la fuente de luz, esto reduce sombras y suaviza texturas, es recomendado para esta técnica usar anillos de luz porque distribuyen de manera uniforme los haces de luz sobre el

objeto. Este esquema se compone de una o más luces ubicadas a 45° respecto al eje óptico de la cámara que se encuentra en el objeto (ver Figura 15).

No es recomendado usar ese esquema para elementos con superficie brillante pues aparecen zonas saturadas de luz y esto dificulta el procesamiento de la imagen. Cuando se opta por este esquema es conveniente experimentar con el número de fuentes de luz, distancia objeto – cámara y ángulo respecto al eje óptico de la cámara [21].

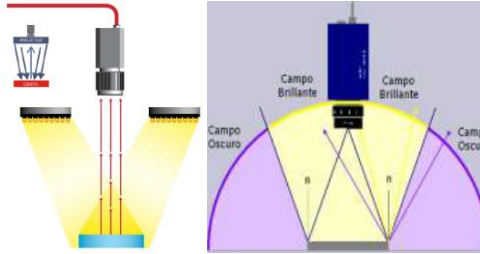


Figura. 15. Esquema de Iluminación Frontal.

Tomado de: <http://visionartificial.fpcat.cat/wp-content/uploads/Conocimientos.pdf>

1.6.2 Retroiluminación difusa.

Esta técnica facilita obtener la silueta del objeto porque genera un contraste grande entre el fondo y el elemento captado por la cámara, también es usada para lograr medir el grado de porosidad en sustancias como tejidos, láminas de corcho o también cuando se requiere conocer el nivel de un líquido o presencia de algún componente interno dentro de botellas transparentes [22].

1.6.3 Iluminación por campo oscuro (Dark Field).

La luz es emitida lateralmente sobre el objeto con un ángulo muy pequeño mediante un anillo en todas las direcciones (ver Figura 16), esto resalta características particulares que tenga el objeto, se utiliza para generar sombras sobre relieves cuyo contraste es pequeño respecto al fondo. Esta técnica funciona muy bien para detectar imperfecciones sobre elementos planos y brillantes como metales pulidos, cualquier cambio sobre la superficie es detectado fácilmente porque sobre el defecto aparecen brillos un entorno totalmente oscuro [23].

Cualquier variación sobre la superficie producirá un aumento en la cantidad de luz que recibe el sensor, originando que en la imagen esta zona aparezca más brillante que la superficie que aparecerá oscura por no reflejar la luz hacia el sensor.

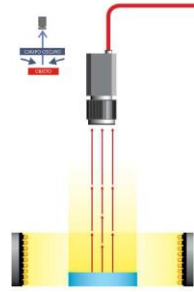


Figura. 16. Esquema de Iluminación Dark Field.
Tomado de: <http://visionartificial.fpcat.cat/wp-content/uploads/Conocimientos.pdf>

1.6.4 Iluminación coaxial.

La luz emitida rebota en un espejo semitransparente formando un ángulo de 90° que desvía los haces y los divide en dos partes, una parte atraviesa el espejo y se pierde, la otra toma la dirección del eje de la cámara (ver Figura 17), esta técnica es apta para superficies planas reflectantes, entre los usos más comunes están inspección de PCB, etiquetas reflectantes, inspección de impresión sobre aluminio o cavidades profundas.

Esta configuración es la única que permite inspección de superficies especulares, además la sobra de la cámara no se refleja sobre el objeto a pesar de estar sobre el mismo eje [24].

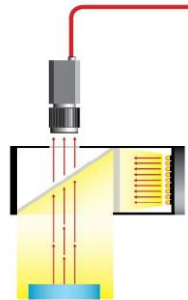


Figura. 17. Esquema de Iluminación Coaxial.
Tomado de: <http://visionartificial.fpcat.cat/wp-content/uploads/Conocimientos.pdf>

1.6.5 Iluminación difusa tipo domo

Los haces de luz son emitidos dentro de un domo esférico dando como resultado una luz difusa en todas las direcciones, eliminando sombras, suaviza texturas, elimina polvo, relieves y curvaturas que pueda poseer el objeto inspeccionado (ver Figura 18). A este tipo de iluminación se le llama también “*cloudy day*” porque no produce sombras sobre el objeto [25].

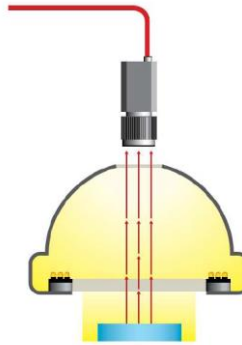


Figura. 18. Esquema de Iluminación difusa Tipo Domo.

Tomado de: <http://visionartificial.fpcat.cat/wp-content/uploads/Conocimientos.pdf>

1.6.6 Iluminación lateral

La dirección de la luz es lateral al objeto y la cámara se posiciona mirándolo directamente, el grado de inclinación del elemento emisor de luz está determinado por el grado deseado de resalte de relieve que presente el objeto (ver Figura 19). Este esquema se usa principalmente para resaltar bordes, rayas y fisuras sobre la superficie. No se deben manejar ángulos muy pequeños respecto a la horizontal porque la luz producirá sombras en todos los relieves y en el contorno del objeto [26].

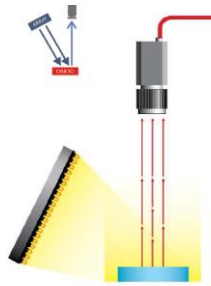


Figura. 19. Esquema de Iluminación Lateral.

Tomado de: <http://visionartificial.fpcat.cat/wp-content/uploads/Conocimientos.pdf>

1.6.7 Iluminación por contraste (backlight)

En este esquema la fuente de luz es emitida desde la parte posterior del objeto ubicando a éste entre la cámara y la fuente de iluminación (ver Figura 20). La cámara inspecciona la silueta del objeto y permite observaciones muy precisas pues se eliminan por completo las sombras producidas por la iluminación, es importante que la luz sea uniforme en toda la superficie del elemento.

Este montaje es útil para inspección de siluetas, observación de materiales transparentes para detección de manchas, rayas, grietas, etc pero no permite reconocer detalles superficiales del objeto como códigos o inscripciones que posea [27].

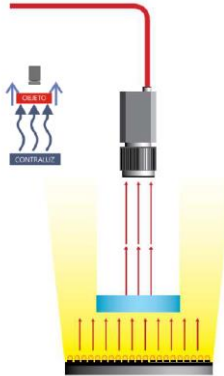


Figura. 20. Esquema de Iluminación por contraste.

Tomado de: <http://visionartificial.fpcat.cat/wp-content/uploads/Conocimientos.pdf>

1.6.8 Iluminación Laser o luz estructurada

Para la puesta a punto de este esquema se debe colocar la fuente de luz en un ángulo conocido respecto al objeto a iluminar al igual que la cámara encargada de la captura de la imagen y analizando la distorsión de la luz es posible medir la profundidad del objeto inspeccionado, por eso este tipo de montaje se utiliza para resaltar la tercera dimensión de un objeto (ver Figura 21) [28].

El principio de funcionamiento de este montaje se basa en la proyección de un haz de luz sobre un objeto, cuando éste se distorsiona el sistema lo interpreta como una variación de altura.

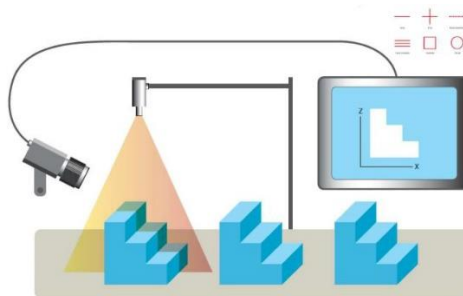


Figura. 21. Esquema de Iluminación Laser.

Tomado de: <http://visionartificial.fpcat.cat/wp-content/uploads/Conocimientos.pdf>

De acuerdo a la información anterior, se presenta la Tabla 3, donde se especifican las diferentes ventajas y desventajas de los esquemas de iluminación considerados a implementar sobre la Planta Clasificadora.

Tabla 3. Resumen de principales ventajas y desventajas de algunos esquemas de iluminación.
Fuente: Elaboración propia.

Esquema de iluminación	Aplicaciones	Ventaja	Inconvenientes
Iluminación Frontal	*Superficies con poco reflejo. *Detección de cambio de color sobre la superficie	*Elimina sombras *Gran distancia entre cámara y objeto	*Genera demasiado relejo para superficies brillantes
Iluminación Lateral	*Resalta relieves sobre los objetos	*Resalta relieves del objeto	*Cuando se presentan ángulos de incidencia muy pequeños se generan sombras.
Iluminación Dark Field	*Resalta detalles sobre superficies reflectantes	*Gran detalle en superficies con poco contraste	*No recomendable para superficies que absorben luz
Iluminación por contraste (back light)	*Inspección de siluetas *Detección de manchas, rayas y grietas en materiales transparentes	*Inspección de siluetas con gran precisión	*No permite reconocer detalles superficiales del objeto
Iluminación coaxial	*Indicada para superficies reflectantes	*Permite lectura de letras sobre superficies reflectantes	*No permite reconocer relieves sobre la superficie del objeto

1.7 Criterios definidos que permiten elegir esquemas de iluminación

A continuación, se describe el proceso de selección de los esquemas de iluminación que serán implementados en la Planta Clasificadora y que permitirán realizar la evaluación experimental planteada en este documento.

Para la escogencia de los esquemas de iluminación a implementar en la Planta Clasificadora se plantearon cinco parámetros:

- Implementable físicamente en la banda
- Posición de la cámara
- Flexibilidad
- Reparación y mantenimiento
- Equilibrio costo necesidad

Haciendo uso de una tabla comparativa (ver Tabla 4), son valorados con espacios verdes y espacios rojos; un espacio verde significa un punto, un espacio rojo significa menos un punto. Posteriormente, se realiza la suma aritmética y los tres primeros puntajes serán los esquemas a implementar sobre la Planta Clasificadora.

A continuación, se explica cada uno de los cinco criterios para la escogencia de los esquemas de iluminación.

1.7.1. Implementable físicamente en la banda.

Después de conocer la disposición física que requiere cada esquema para su implementación, se realizó un análisis de si es o no posible instalar el esquema de iluminación en la Planta Clasificadora teniendo en cuenta el espacio físico disponible para la instalación.

1.7.2. Posición de la cámara.

La posición varía de acuerdo al esquema y a las características que se quieran segmentar de la escena. El ángulo que forme el foco de la cámara con el objeto varía de acuerdo a la aplicación que se quiere dar, por ejemplo, si lo que interesa son los bordes o características sobre la superficie de una determinada pieza, la toma de la fotografía se debe hacer desde arriba, ahora, si se quiere inspeccionar el nivel de un líquido dentro de un recipiente la cámara deberá estar posicionada formando un ángulo de 180° con respecto al objeto.

1.7.3. Flexibilidad.

La planta clasificadora tendrá una aplicación netamente académica donde se podrán realizar distintas prácticas de laboratorio en el campo de la visión por computador, por lo tanto, este ítem es de suma importancia pues se busca que la distribución de luz instalada esté abierta a futuros cambios y experimentaciones por parte de los estudiantes (ángulos de incidencia de luz, cambios de fuente de luz)

1.7.4. Reparación y mantenimiento.

Se busca que el mantenimiento tanto preventivo como correctivo de los esquemas montados sea de un mínimo costo tanto económico como mano de obra en caso de llegar a requerirla.

1.7.4. Equilibrio costo necesidad.

Se debe seleccionar el esquema que supla las necesidades de la Planta Clasificadora y que genere las escenas adecuadas para el correcto funcionamiento del algoritmo de segmentación, esto bajo una mirada equilibrada de costo-necesidad para el ambiente académico donde será aplicado.

En la siguiente tabla, se presenta la evaluación realizada sobre la implementación de los diferentes esquemas de iluminación, con respecto a los cinco criterios previamente definidos.

Tabla 4. Ponderación de los esquemas de iluminación considerados respecto a los criterios definidos.
Fuente: Elaboración propia.

	Retro iluminación difusa	Iluminación Frontal	Dark field	Coaxial	Tipo Domo	Lateral	Backlighth	Luz Estructurada
Implementable físicamente en la Planta	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1
Posición de la cámara	-1	1	1	1	1	1	1	1
Flexibilidad	-1	-1	1	1	-1	1	-1	-1
Reparación y mantenimiento	1	1	1	1	-1	1	-1	-1
Equilibrio costo necesidad	1	1	1	1	-1	1	-1	-1
TOTAL	1	1	5	5	-3	5	-3	-3

A continuación, se justifica cada uno de los puntajes obtenidos en cada esquema de iluminación con respecto a los parámetros de evaluación.

Retroiluminación Difusa

Implementable físicamente en la Planta (+1): El espacio requerido para la implementación de este esquema lo brinda la caja instalada sobre la banda,

Posición de la cámara (-1): Este esquema es usado principalmente en la industria para detección de sólidos no deseados en un recipiente, por esto la cámara se encuentra formando una horizontal con el objeto como se muestra en la Figura 22. Para el caso de estudio de la Planta Clasificadora las tomas se hacen desde la parte superior (toma aérea), por tanto, no es de gran beneficio la posición de la cámara que propone este esquema.

Flexibilidad (-1): Se considera un ítem negativo ya que la posición de la cámara permite la inspección de siluetas de objetos, por tanto, si se quisiera extraer características sobre la superficie del objeto no sería posible; además, se debe tener cuidado de no sobresaturar la cámara con demasiada luz. Si llegara a saturarse el sensor habría que configurar el nivel de apertura de la cámara, situación que no es posible realizar en todas las cámaras del mercado.

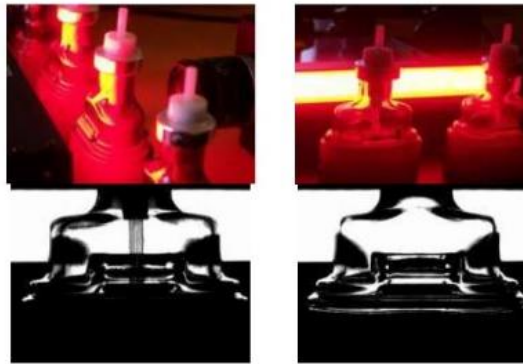


Figura. 22. Toma de imagen esquema Retroiluminación Difusa.
Tomado de: E. de la Fuente, "Visión artificial industrial". Procesamiento de imágenes para inspección automática y robótica.

Reparación y mantenimiento (+1): Es un esquema de fácil implementación, sólo es necesario una luz que ilumine de manera horizontal al objeto y al otro lado una cámara, por tanto, su reparación como su mantenimiento preventivo no presentará gran dificultad gracias a los elementos que componen este tipo de distribución de luz.

Equilibrio costo necesidad (+1): Existe una buena relación de estos dos aspectos para este esquema; es de implementación de bajo costo por los elementos necesarios para su instalación y cumple las necesidades del diseñador con el nivel de luz adecuado que no sature el sensor de la cámara.

Iluminación Frontal

Implementable físicamente en la Planta (-1): A pesar de que físicamente es implementable gracias al espacio que se dispone, para este esquema se recomienda hacer uso de un anillo de luz alrededor de la cámara (ver Figura 23) o de lo contrario se generaran brillos indeseados sobre los objetos, para este estudio no se cuenta con tal distribución de luz.



Figura. 23. Escenas captadas sin iluminación frontal (izquierda) y con iluminación frontal (derecha).
Tomado de: Aplicación práctica de la visión artificial en el control de procesos industriales Conocimientos básicos de visión artificial, 2012.

Posición de la cámara (+1): La posición de la cámara para este esquema favorece los fines académicos de la planta. La toma aérea permite analizar la superficie del objeto y poder detectar cualquier característica que se desee como fisuras, color, forma, etc (ver Figura 24).

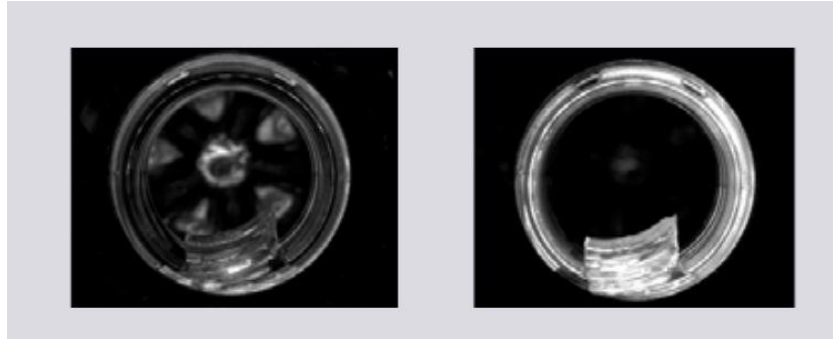


Figura. 24. Captura de imagen para esquema de Iluminación Frontal.
Tomado de: https://microscan.s3.amazonaws.com/Espanol/NERLITE_brochure_espanol.pdf

Flexibilidad (-1): Es indicada para superficies poco reflectantes, por tanto, se encuentra en este punto una gran limitante ya que a nivel industrial se manejan elementos de gran reflectancia como tornillos, tuercas, además interesa que sobre la Planta se puedan clasificar el mayor tipo de elementos.

Reparación y mantenimiento (+1): De fácil reparación y mantenimiento porque el anillo de luz es de fácil reemplazo en caso de daño.

Equilibrio costo necesidad (+1): Este esquema no representa un costo económico muy grande ya que los anillos de luz son encontrados en el mercado sin mayor inconveniente y a bajo costo.

Iluminación Dark Field

Implementable físicamente en la Planta (+1): Este esquema se acomoda con gran facilidad a la caja de la Planta, es posible la instalación de luces que incidan con un ángulo bajo respecto al objeto.

Posición de la cámara (+1): Se logra una toma aérea que favorece el ambiente académico donde será usada la Planta, además, permite inspeccionar con mayor detalle deformidades sobre la superficie de un objeto (ver Figura 25), lo que incrementa sus aplicaciones.

Flexibilidad (+1): En este esquema es posible realizar cambios en el ángulo de incidencia de la fuente de luz sobre los objetos, lo cual permite cambiar la escena y tener diversas imágenes para su procesamiento digital.



Figura. 25. Captura de imagen para esquema de Iluminación Frontal.

Tomado de: Ejemplo de Iluminación Dark Fiel sobre una moneda, tomado de Aplicación práctica de la visión artificial en el control de procesos industriales Conocimientos básicos de visión artificial,” p. 15, 2012.

Reparación y mantenimiento (+1): Es de fácil mantenimiento tanto preventivo como correctivo, se puede hacer uso de luces tipo LED que son fácilmente reemplazables.

Equilibrio costo necesidad (+1): Al poder variar el ángulo de incidencia del haz de luz se abre una amplia gama de posibles objetos a inspeccionar. Se considera una muy buena relación por su bajo costo.

Iluminación Coaxial

Implementable físicamente en la Planta (+1): La Planta cuenta con el espacio necesario para la instalación de la fuente de luz y el vidrio semitransparente que lleva este montaje, se puede implementar sin mayor dificultad.

Posición de la cámara (+1): Se logran tomas aéreas aptas para inspeccionar detalles sobre la superficie del elemento como lo muestra la Figura 26.



Figura. 26. Captura de imagen para esquema de Iluminación Dark Field sobre una moneda.

Tomado de: Aplicación práctica de la visión artificial en el control de procesos industriales Conocimientos básicos de visión artificial,” p. 15, 2012.

Flexibilidad (+1): Esta distribución de luz presenta la gran ventaja de poder iluminar elementos altamente reflectantes sin que existan problemas de brillo sobre la escena, para el ambiente académico donde será usado es de gran utilidad porque incrementa la clase de elementos que el algoritmo logre segmentar.

Reparación y mantenimiento (+1): El esquema cuenta con un vidrio semitransparente y una fuente de luz normalmente LED, gracias a esto un trabajo de mantenimiento o reparación sería sencillo.

Equilibrio costo necesidad (+1): Gracias a la repartición uniforme de luz sobre la escena que resulta de implementar este esquema, es posible introducir elementos de materiales reflectantes como tornillos, monedas etc sobre la Planta, por lo tanto las necesidades quedan completamente cubiertas a un bajo costo.



Figura. 27. Captura de imagen de elemento altamente reflectante mediante esquema de iluminación Coaxial. Tomado de: https://microscan.s3.amazonaws.com/Espanol/NERLITE_brochure_espanol.pdf

Iluminación Tipo Domo

Implementable físicamente en la Planta (-1): Este esquema está compuesto por un domo que hace de superficie difuminadora de luz, este armazón no es posible implementarlo sobre la banda debido al poco espacio con el que se cuenta.

Posición de la cámara (+1): Se obtienen tomas aéreas que favorecen la inspección de elementos con superficies no uniformes (ver Figura 28).

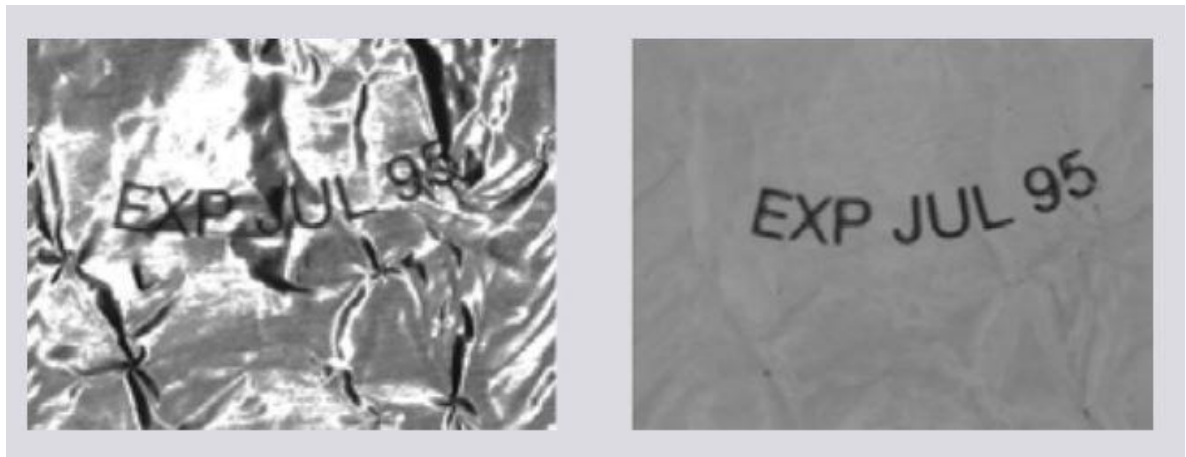


Figura. 28. Captura de imagen para esquema de Iluminación Tipo Domo (derecha) sobre una superficie reflectando.

Tomado de: https://microscan.s3.amazonaws.com/Espanol/NERLITE_brochure_espanol.pdf

Flexibilidad (-1): Para efectos académicos se considera no apto, puesto que el domo esférico es adaptable sólo para este esquema y difícilmente será de utilidad para otros esquemas.

Reparación y mantenimiento (+1): De fácil reparación, pues las fuentes de luz LED instaladas sobre este esquema son de fácil reemplazo, además el domo sólo habría que limpiarlo como trabajo de mantenimiento.

Equilibrio costo necesidad (-1): A pesar de que es posible obtener imágenes sin sombra y pocos reflejos, la construcción del domo genera un costo económico alto, por esto no se guarda una buena relación costo-necesidad.

Iluminación Tipo Lateral

Implementable físicamente en la Planta (+1): La planta cuenta con el espacio necesario para la instalación de esta distribución de luz que consta de dos luces tipo LED incidiendo con un ángulo de 45° al objeto.

Posición de la cámara (+1): Las tomas aéreas de este esquema favorecen el estudio de diversas características de un objeto (ver Figura 29), muy favorable para el ambiente donde se desempeñará la Planta.

Flexibilidad (+1): El ángulo del haz de luz incidente sobre el objeto es variable, por tanto, permite el estudio de distintas imágenes, lo cual es un gran aporte para ambientes académicos.

Reparación y mantenimiento (+1): Reparación sencilla porque su fuente de luz LED no tiene mayores complicaciones en caso de ser necesario su reemplazo.

Equilibrio costo necesidad (+1): El costo económico de montar este esquema sobre la Planta resulta bajo y cubre todas las necesidades requeridas por el diseñador.



Figura. 29. Captura de imagen para esquema de Iluminación lateral, gracias a este esquema es posible extraer características muy puntuales de un objeto.

Tomado de: "Aplicación práctica de la visión artificial en el control de procesos industriales. Conocimientos básicos de visión artificial", 2012.

Iluminación Backlight

Implementable físicamente en la Planta (-1): Esta distribución de luz no resulta implementable sobre la Planta Clasificadora. La fuente de luz debe estar situada debajo del objeto y para poder iluminarlo se tendría que tener con una banda de color transparente, por eso bajo ningún motivo se podría instalar y no resulta de gran aporte analizar los demás criterios.

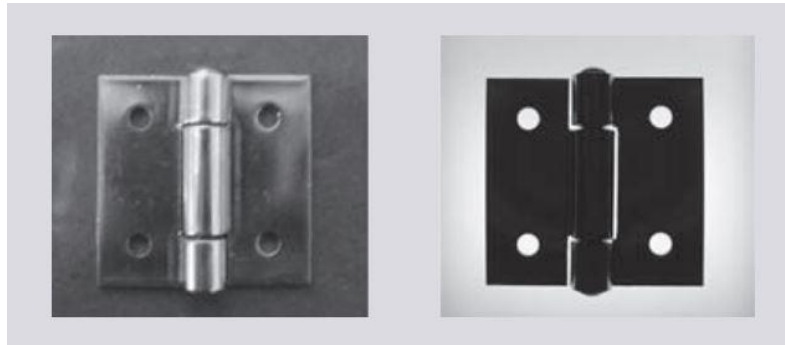


Figura. 30. Captura de imagen para esquema de Iluminación Backlight.

Tomado de: "Aplicación práctica de la visión artificial en el control de procesos industriales Conocimientos básicos de visión artificial", 2012.

Iluminación Estructurada

Es un esquema de alto costo económico por los equipos necesarios para iluminar la escena y los encargados del procesamiento de la imagen para posterior visualización; un montaje así resultaría apto para grandes Industrias que requieran inspección 3D de elementos, por esto queda descartado este tipo de iluminación para el experimento a realizar.

De acuerdo a la suma aritmética de la Tabla 4, se concluye que los esquemas de iluminación más adecuados para implementar sobre la Planta Clasificadora son:

- Esquema de iluminación Dark Field.
- Esquema de iluminación Coaxial.
- Esquema de iluminación Lateral.

1.8 Cámaras y sensores ópticos.

A continuación, se hace una descripción de los elementos necesarios para la detección de imágenes.

1.8.1. Cámaras

Las cámaras son los dispositivos encargados de captar la escena iluminada y transmitirla al sistema de procesamiento en forma digital. Gracias a la óptica, la escena es proyectada sobre el sensor de la cámara que contiene fotoreceptores, los cuales, crean una representación de los objetos captados frente a la cámara [29]. Están compuestas por un sensor y componentes electrónicos; si se trata de

una cámara analógica ésta provee una señal de video en un formato estándar para su posterior digitalización y en el caso de cámaras digitales se toma directamente en forma digital.

1.8.2. Sensores

Existen diferentes tipos de tecnología para la construcción del sensor encargado de convertir la luz en señales eléctricas, entre ellos están los tipos CCD y CMOS.

1.8.1.1 Sensor tipo CCD (Charge Couple Device): Su principio se basa en convertir las cargas de las celdas de la matriz en voltajes para luego entregar una señal analógica en la salida que será digitalizada por la cámara (ver Figura 31); el nivel de ruido de una imagen capturada con este sensor es menor que un sensor CMOS. Este tipo de sensores se recomiendan para aplicaciones donde se requiera una toma de imagen de alta calidad [29].

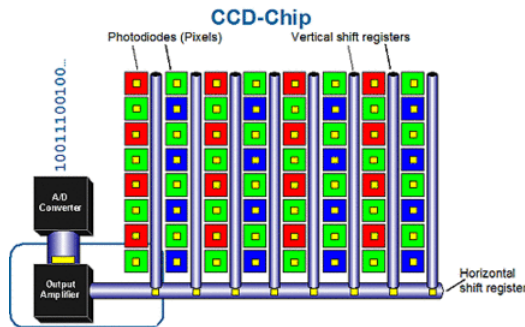


Figura. 31. Gráfico de un sensor tipo CCD.

Tomado de: <https://www.xatakafoto.com/camaras/sensores-con-tecnologia-ccd-vs-cmos>

1.8.1.2 Sensor tipo CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor): Son usados en aplicaciones donde es necesario un consumo bajo de energía, estos poseen un sensor electrónico que convierte la carga creada por la luz en un voltaje analógico en el mismo sensor y al igual que en el sensor CCD esta carga será transformada en una señal digital por un convertor A/D (ver Figura 32). Este tipo de sensores presentan un mayor nivel de ruido pero son más rápidos si se comparan con los CCD [29].

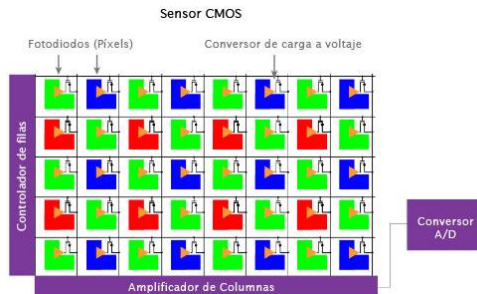


Figura. 32. Gráfico de un sensor tipo CMOS.

Tomado de: <https://www.xatakafoto.com/camaras/sensores-con-tecnologia-ccd-vs-cmos>

Actualmente, en el mercado existe un amplio catálogo de dispositivos desarrollados para dar solución a trabajos en diferentes ambientes, entre ellas existen:

- Cámaras matriciales
- Cámaras lineales
- Cámaras alta velocidad
- Cámaras 3D
- Cámaras inteligentes
- Cámaras infrarrojas o cámaras térmicas
- Sistemas espectrales y sistemas multiespectrales
- Accesorios de cámaras (soportes, cables, etc.)

A pesar de que muchas características de operación de estas tecnologías llegan a ser similares en ciertos aspectos, sus principios de funcionamiento son completamente distintos, por lo que es no es sencillo llevar a cabo una clasificación que las diferencie.

1.8.2 Elemento de captura de imagen en la Planta Clasificadora

Para suplir las necesidades requeridas, la Planta Clasificadora cuenta con una cámara tipo web Cam de referencia Logitech conectada mediante puerto USB a la tarjeta de procesamiento de imágenes (ver Anexo B).

1.9. Planta Clasificadora.

El Laboratorio de Control de Procesos de la Universidad del Cauca cuenta con plantas o sistemas para emular control de procesos industriales; dentro de sus sistemas se cuenta con una planta que permite clasificar piezas por visión artificial en donde es posible aplicar los desarrollos de este proyecto. En general, esta planta está constituida de tres paneles, dos frontales y un tercero situado en campo, en ellos están alojados la mayor parte de la instrumentación, posee dos bandas, una principal y otra auxiliar que giran en sentido opuesto unidas por un par de engranajes que permiten un flujo continuo de piezas. Dos motores monofásicos que son llamados distribuidor y recolector dan movimiento a una cadena que tienen un acople de paletas y se encargan de desplazar los objetos de una banda a la otra. El aspecto físico de la planta se puede observar en la Figura 33, donde se evidencia que cuenta con diferentes lazos de control, como control de velocidad de la banda, control del posicionador neumático, sistema de visión controlado por computador. Todo el sistema es gestionado y controlado desde un PLC.



Figura. 33. Planta Clasificadora de Laboratorio de Control de Procesos.

Cuenta además con un par de pistones llamados retenedor y posicionador que permiten retener los objetos sobre la banda auxiliar y clasificar cada objeto en una posición por un algoritmo de control. Posee un motor trifásico para darle movimiento a las bandas que están unidas a una caja reductora y que permite disminuir la velocidad de giro de las bandas mientras la planta se encuentra en funcionamiento. Para los procesos de visión de máquina hace uso de una caja metálica y dentro de ella existe una cámara con focos de luz LED que son los encargados de iluminar la escena para la captura de la imagen.

En este capítulo se describieron conceptos teóricos que permiten el entendimiento de este documento. Se definió el concepto de luz, sus propiedades, espectro electromagnético, fuentes de iluminación y esquemas de iluminación. Se determinaron criterios para realizar la selección de tres esquemas de iluminación para ser implementados y evaluados experimentalmente en una Planta Clasificadora. Se finaliza el capítulo dando una descripción general de la Planta donde se realizará la evaluación.

Con los esquemas de iluminación seleccionados, se procede a adecuar la planta de clasificación donde se realizará la implementación de los esquemas de iluminación, posteriormente, se hace la selección de las herramientas de programación y del sistema embebido que más se adecue al proceso, y se desarrollan los algoritmos que se van a ejecutar.

Capítulo 2. Implementación del algoritmo para el proceso de clasificación.

En el capítulo uno, se mostraron los diferentes tipos de esquemas de iluminación y cómo influyen en el proceso de captura. A través de un análisis comparativo, se determinó qué tipo de esquemas de iluminación son los más adecuados para ser implementados en la Planta Clasificadora para la realización de la evaluación experimental. En este capítulo, se detalla el acondicionamiento realizado a la Planta Clasificadora y se expone la composición del sistema hardware para el procesamiento de imágenes, lo cual incluye la selección de las herramientas de programación y del sistema embebido que más se adecue al proceso, además se eligen las piezas a clasificar, la técnica de segmentación a utilizar y se describe el desarrollo de los algoritmos que se van a ejecutar.

2.1 Estado inicial de la planta clasificadora

La planta de clasificación por visión de máquina del Laboratorio de Control de Procesos de la Universidad del Cauca, presentaba inicialmente daños por su falta de uso; algunos de sus módulos no se encontraban funcionales y otros habían sido retirados, su ubicación no era la más correcta y mientras estuvo operando sufrió transformaciones, por lo tanto, no se encontró una documentación clara y detallada del funcionamiento y operatividad de la misma.

Por lo anteriormente evidenciado, se procede a realizar un diagnóstico (ver Anexo A) y se determina que el estado actual de la Planta Clasificadora es completamente inoperante para los propósitos de este proyecto, por ello se realiza una propuesta para poner en marcha la Planta Clasificadora y así continuar con éxito el desarrollo del proyecto.

2.2 Acondicionamiento de la planta de clasificación.

Para acondicionar la planta clasificadora se realiza un estudio previo (ver Anexo A), con el fin de documentar el funcionamiento de sus equipos e instrumentos durante el proceso de clasificación. Posterior a ello, se procedió a dismantelar la planta ya que contaba con una mala distribución, como se observa en la Figura 34a), existe demasiada instrumentación en una zona reducida donde el mayor campo lo ocupa el sistema neumático, e igualmente en la Figura 34b), se aprecia gran cantidad de relés electromecánicos, demasiado cableado eléctrico y la ausencia de algunos elementos o equipos. Adicionalmente, la planta contaba con un tablero de control o botonera donde la cantidad de botones y pilotos para su funcionamiento era excesiva (Figura 34c). Una vez retirada la instrumentación que se encontraba en los paneles se procede a reubicar la planta, la cual se encontraba cerca de una ventana

y a causa de la exposición de los paneles al sol, el recubrimiento de los cables se cristalizó y deterioró (ver Figura 34d).



Figura. 34. Estado inicial de la planta clasificadora. a) Panel en campo. b) Panel frontal c) Tablero de control d) Planta clasificadora.

Se procede a trasladar la planta hacia una zona donde existe una adecuada iluminación natural y artificial (Figura 35a), y se realiza el rediseño eléctrico (ver Anexo A) con el fin de mejorar los inconvenientes previstos en el anterior montaje, lo cual trajo desafíos para la instalación de nuevos equipos para adaptarlos al proceso. Superados los inconvenientes, la planta de clasificación acondicionada en su parte física consta de tres paneles, dos ubicados en la parte frontal, como se observa en la Figura 35b) y 35c), donde la disposición de los elementos se distribuyen de una mejor manera, y uno ubicado en campo Figura 35d), el cual contiene el sistema neumático y embebido que hace parte del sistema de visión.

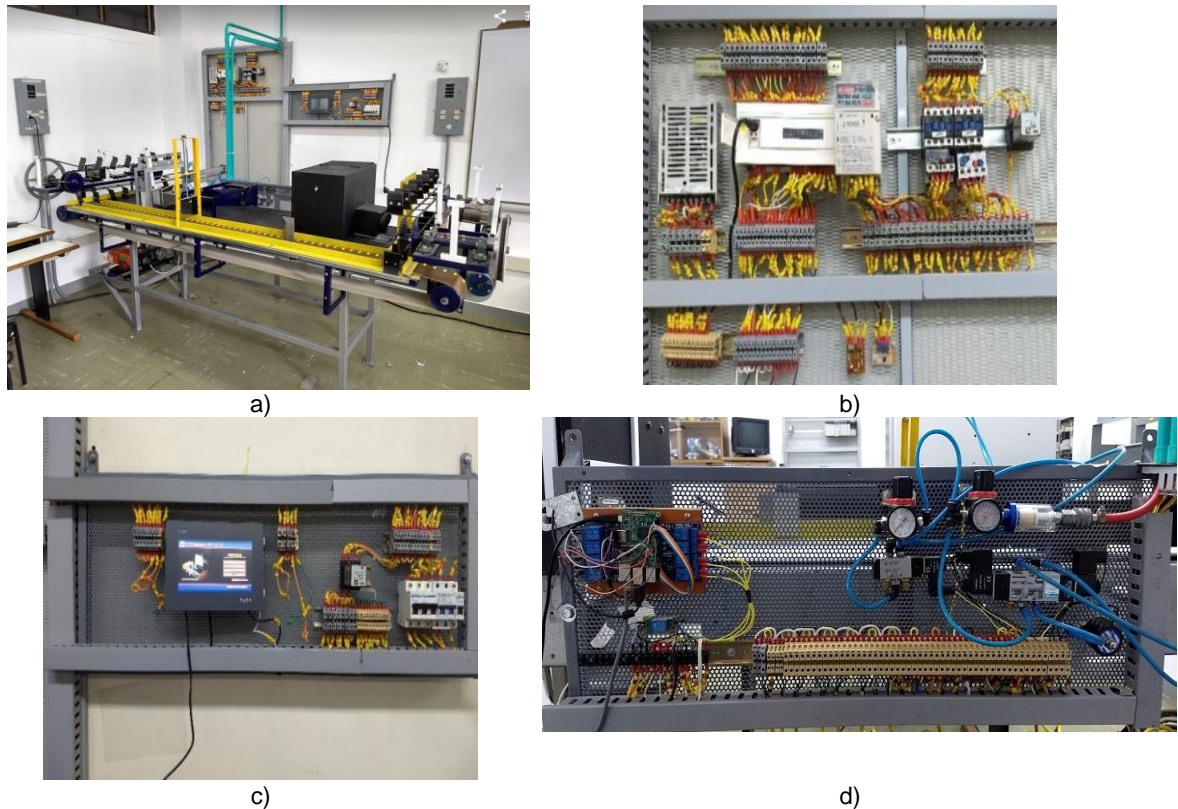


Figura. 35. Planta clasificadora rediseñada. a) Planta clasificadora actual. b) Panel frontal A c) Panel frontal B d) panel en campo.

En estos paneles se ubica la mayor parte de la instrumentación perteneciente a la planta y en ellos se evidencia una disminución de elementos, lo cual generó un nuevo etiquetado de acuerdo a la norma ISA 5.1. Este reajuste en la cantidad de dispositivos redujo significativa la utilización de cables y borneras.

2.2.1 Selección de equipos

Como se mencionó en secciones anteriores, algunos equipos no se encontraban en la Planta Clasificadora, ya que fueron retirados debido a su mal funcionamiento, entre ellos, el PLC, PanelView y el variador; estos equipos hacen parte fundamental para el proceso de clasificación de piezas, por lo que surge la necesidad de sustituirlos teniendo en cuenta las siguientes características:

- Cantidad de entradas y salidas que puede manejar.
- Costo de los equipos.
- Licencia para operarlos.
- Protocolo de comunicación.
- Sistemas de protección que permitan mitigar los daños que se pueden presentar en un proceso.

De acuerdo a lo anterior, se escoge un PLC de la familia Schneider de referencia Twido, una PanelView Schneider Magelis3512 y un Variador Yaskawa J1000. El

aspecto físico de estos elementos se muestra en la Figura 36. La información técnica de los equipos se especifica en el Anexo A.



Figura. 36. Elementos seleccionados para la Planta Clasificadora. a) PLC. b) PanelView. c) Variador.

La selección de estos equipos trajo consigo la necesidad de aprender a programar bajo un nuevo software como es el Twido Suite donde se crea el Ladder que permite ejecutar de manera lógica las entradas y salidas del PLC y el Vijeo Designer donde se crean las pantallas de visualización con el fin de seleccionar los parámetros de entrada para el funcionamiento de la planta (ver anexo C). En la Figura 37, se muestra la interfaz de usuario donde se puede seleccionar el tipo de algoritmo, velocidad de la banda y cantidad de piezas a clasificar.



Figura. 37. Interfaz de usuario de la planta clasificadora.

Además se desarrollaron dos tarjetas de acondicionamiento de señales para acoplar el PLC al encoder y al variador con el fin de controlar la velocidad de la banda transportadora. El acondicionamiento de señales se muestra en el Anexo A.

2.2.2 Comunicación de equipos en el proceso de clasificación.

De acuerdo al sistema en la planta de clasificación el escenario de automatización es el PLC que es el módulo de control para el proceso de clasificación de piezas y es el encargado de recibir y enviar señales de los sensores ópticos, PanelView, variador, encoder y el sistema embebido que son equipos que intervienen en el proceso. La PanelView es la encargada de la configuración de parámetros que a través del protocolo RS485 establece comunicación con el PLC permitiendo una transferencia de datos entre estos dos dispositivos. Se emplea además un variador y un encoder, los cuales se acoplan al PLC por medio de tarjetas acondicionadoras.

Las válvulas neumáticas son las encargadas de desplazar los pistones colocando el cabezal en diferente posición luego de recibir una señal de 24 Vdc proveniente del PLC y los sensores ópticos, los cuales envían una señal de 24 Vdc al PLC cada vez que se detecte una pieza o para informar en qué posición se encuentra el cabezal del pistón.

Para el proceso de visión de máquina, se adiciona un sistema embebido y que es el encargado de procesar las imágenes captadas por una Webcam con el fin de evaluar los esquemas de iluminación en un algoritmo, el cual será descrito con mayor detalle en secciones posteriores. La representación gráfica del proceso se aprecia en la Figura 38.

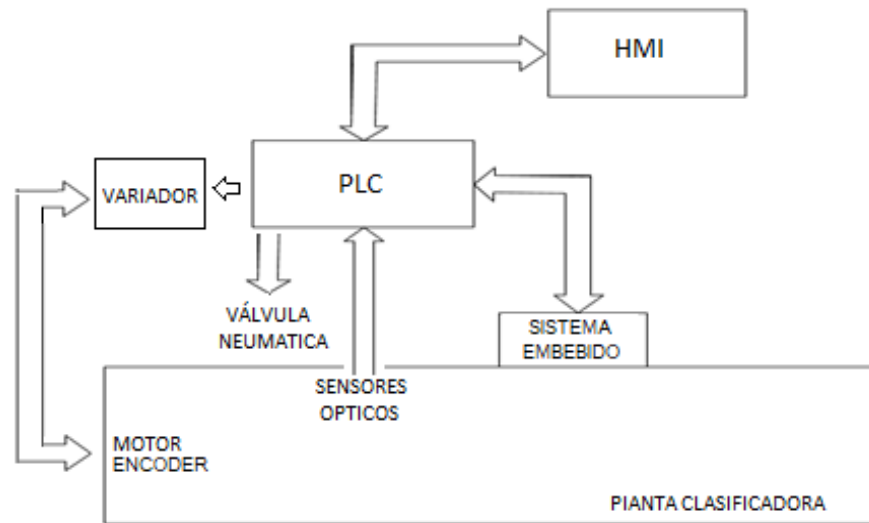


Figura. 38. Recepción y envío de señales discretas entre el PLC y los diferentes equipos para el proceso de clasificación de piezas.

2.2.3 Diagrama de flujo del proceso

En este diagrama se describe la trayectoria que siguen las piezas sobre la banda principal y auxiliar. Por medio del motor trifásico M3, se logra el movimiento de las bandas trasladando las piezas a través de sistema de clasificación; el cilindro neumático CN-1 se encarga de mover el acumulador entre dos posiciones: abierto y cerrado permitiendo la circulación de piezas sobre las bandas.

Por su parte, el motor distribuidor MD traslada las piezas de la banda auxiliar a la banda principal y el cilindro neumático CN-2 controla el movimiento del clasificador entre cuatro posiciones, y por ende ubica cada pieza en la trayectoria correcta según su tipo. El motor MR-5 acciona el movimiento del recolector, el cual ubica la pieza nuevamente sobre la banda auxiliar [30]. El diagrama de flujo que representa este proceso se muestra en la figura 39.

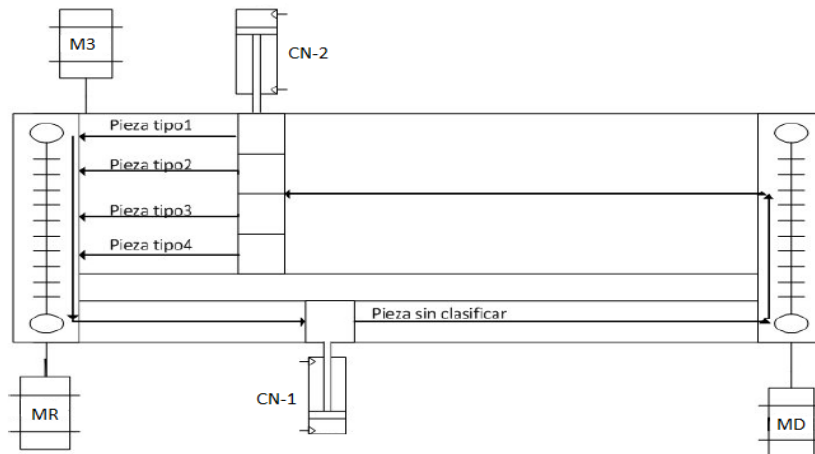


Figura. 39. Diagrama de flujo proceso clasificación de piezas [30].

2.2.4. Diagrama de P&ID

Se realiza el levantamiento del diagrama P&ID bajo el estándar ISA 5.3 aplicando los conceptos que exige la norma, para este caso se tienen cuatro lazos de control los cuales se describen a continuación:

2.2.4.1. Control de velocidad.

El lazo de control de velocidad funciona fijando el valor de la velocidad desde la HMI hacia el PLC el cual mediante el módulo PWM envía la señal de control al variador VAR quien ejecuta la acción correspondiente para modificar a velocidad.

2.2.4.2. Control de Piezas.

Al iniciar el proceso para el control de piezas se envía una orden desde el PLC a la válvula neumática E-VAL2 que permite el paso de aire para ubicar el cilindro neumático CN-2 en la posición de apertura del acumulador; cuando se han terminado de clasificar todas las piezas, se envía la orden para que el acumulador vuelva a la posición de cerrado.

2.2.4.3. Control Posicionador.

La pieza pasa por el sensor óptico S1 el cual detecta la presencia de ésta mandando una señal al PLC, que también recibe la señal de los otros cuatro sensores para determinar la posición actual del cabezal y por medio del cilindro neumático CN-2 (conectado al cabezal) y la válvula neumática E-VAL1 se manipula la dirección de movimiento del vástago.

Cuando el cabezal del clasificador se encuentra en la posición correcta, los sensores envían la señal y el PLC envía la orden de detenerlo, clasificando la pieza de acuerdo a su tipo.

2.2.4.4 Control de visión

La aplicación de visión se encarga de la captura y procesamiento de la imagen, envía la decisión de clasificación (tipo forma o color) al PLC, el cual ubica el cabezal del clasificador. El Diagrama P&ID del sistema de clasificación se muestra en la Figura 40.

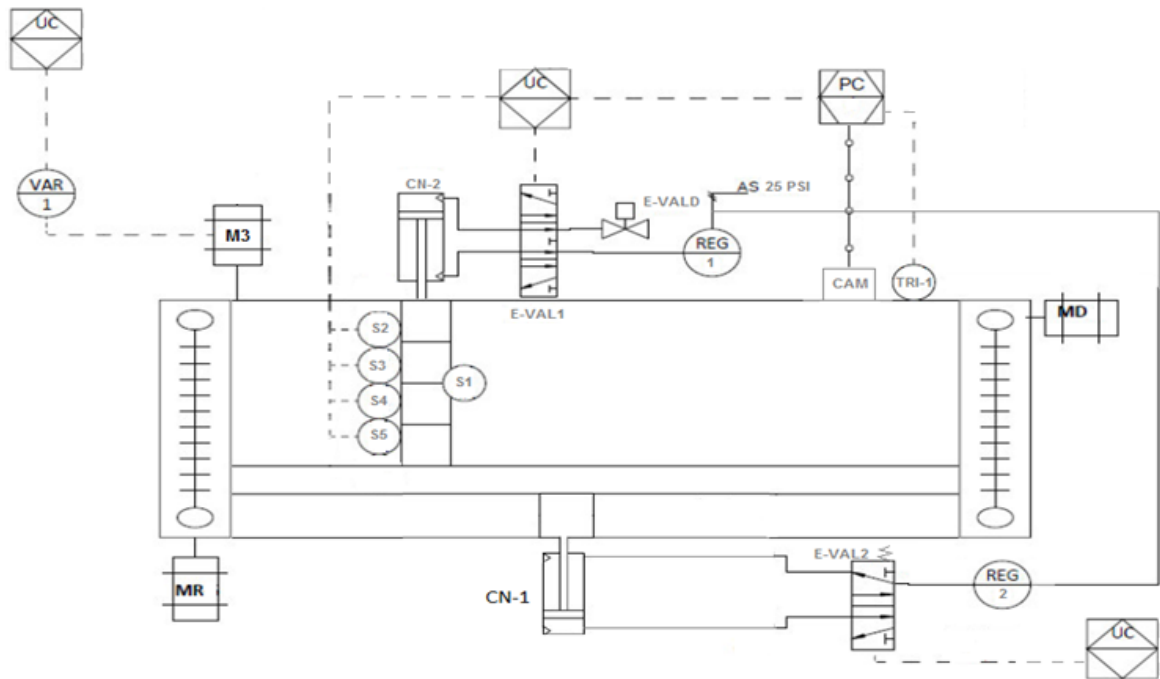


Figura. 40. Diagrama P&ID del sistema de clasificación de piezas [40].

Finalmente, se levantaron todos los diagramas y el cableado completo donde quedó normalizado y etiquetado cada uno de sus elementos.

En este punto la planta cuenta con soportes y documentación técnica que permite al usuario conocerla, manipularla y realizar cambios en su infraestructura, por consiguiente el Laboratorio de Control de Procesos cuenta con una planta de clasificación completamente operativa que cumple con las condiciones necesarias para alcanzar con los objetivos propuestos en este trabajo de grado.

2.3 Sistema de visión de máquina.

La visión de máquina es una técnica basada en la adquisición de imágenes, generalmente en dos dimensiones, para luego procesarlas digitalmente mediante algún tipo de CPU (computadora, microcontrolador, DSP, etc.), con el fin de extraer y medir determinadas propiedades de las imágenes adquiridas. Se trata, por tanto, de una tecnología que combina las computadoras con las cámaras de video para adquirir, analizar e interpretar imágenes de una forma equivalente a la inspección visual humana [31].

Dentro del sistema que se implementó se necesita que el PLC reciba una señal con el fin de activar el posicionador, dicha señal es proveniente del sistema de visión como resultado de un proceso de análisis de una imagen capturada. Para el desarrollo de la aplicación de visión de máquina en este proyecto se utilizan elementos hardware y software, que permiten cumplir todas las etapas de procesamiento y análisis de cada imagen. El proceso para la captura y procesamiento de la imagen implementado en la planta clasificadora se detalla a continuación.

Sobre la banda circulan las piezas que son detectadas por la presencia de un sensor, el cual envía una señal al sistema embebido pasando previamente por un circuito de adecuación, se ejecutan las líneas de código programadas en el sistema que permiten a la webcam capturar una imagen de la pieza en un escenario controlado. Posteriormente, se procesa la imagen hasta obtener la respuesta de clasificación, que es enviada al circuito de adecuación y finalmente al PLC, el cual envía una orden al actuador del sistema de clasificación para ejecutar la decisión. En la Figura 41, se muestra un diagrama de bloques que representa el proceso de captura y recepción de la imagen.

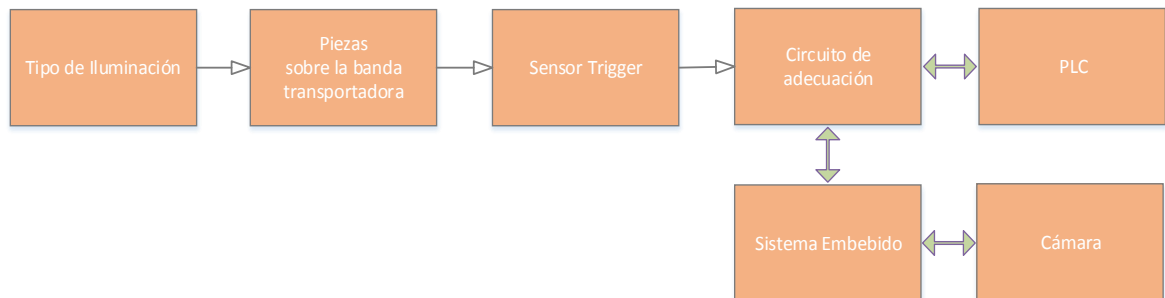


Figura. 41. Diagrama de bloques: proceso de captura y recepción de la imagen.

2.3.1. Elementos hardware

Son los dispositivos que permiten desarrollar todas las etapas para lograr el correcto reconocimiento de patrones y de esta forma clasificar la pieza que se encuentra sobre la banda. A continuación, se describen cada uno de los elementos que conforma la aplicación de visión:

2.3.1.1 Elementos de iluminación: Se diseña un sistema de tres esquemas de iluminación y se ubican dentro de un cuarto de cuerpo metálico color negro (ver Figura 34a), permitiendo obtener un escenario controlado donde la captura de la imagen no se ve afectada por la iluminación externa. Cada esquema de iluminación es independiente y estos se encienden a través de tres interruptores (ver Figura 34b). En la parte superior se ubica la iluminación coaxial, en la parte intermedia la iluminación lateral y en la parte inferior la iluminación Dark Field (ver Figura 34c).

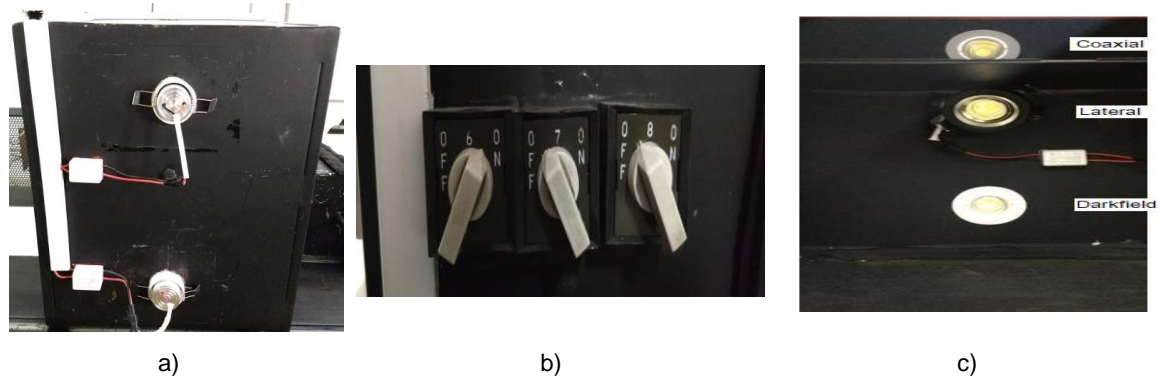


Figura. 42. Cuarto donde se alojan los dispositivos de visión. a) Cuarto de cuerpo metálico. b) Interruptores para los tres esquemas de iluminación. c) Ubicación de los esquemas dentro del cuarto.

En el cuarto de toma de imágenes se colocó luz propia con lámparas SN6000K (ver Figura 43), las cuales constan de un Led con tecnología tipo COB y consumen 3 Watt cada una. Con este tipo de iluminación dirigida se asegura una excelente calidad de imágenes.



Figura. 43. Lámpara SN6000K.

2.3.1.2. Sensor Trigger: Es un sensor óptico infrarrojo que se conecta por medio de un circuito de adecuación al sistema embebido, permite detectar la presencia de una pieza frente a la webcam y da inicio a la ejecución de la rutina de preprocesamiento de la imagen capturada [30]. En la Figura 44 se observa el trigger del fabricante RIKO usado en este proyecto.



Figura. 44. Sensor de presencia infrarrojo RIKO.

2.3.1.3. Elemento de captura de imagen: Está ubicado dentro del cuarto en la parte superior sobre la banda principal y permite capturar una imagen de la escena, recibiendo las propiedades luminosas del objeto y transformándolas en señales digitales. Está conformado por una cámara web Logitech C210 conectada por un

puerto USB al sistema embebido. Permite tomar imágenes de 640 x 480 píxeles. En la Figura 45, se observa la webcam que se utiliza en este proyecto.



Figura. 45. Webcam Logitech C210.

2.3.1.4. Selección del sistema embebido.

Un sistema embebido, se puede definir, como un producto electrónico que contiene uno o más procesadores y un software o sistema operativo para ejecutar funciones específicas [32]. Debe ser confiable y disponer de una comunicación confidencial y autenticada. Existe actualmente una gran variedad de arquitecturas de CPU para sistemas embebidos tales como ARM, MIPS, PowerPCTM, alojadas en un procesador, además utiliza una cierta cantidad de memoria y una serie de salidas y entradas necesarias para comunicarse con otros dispositivos [33].

Una vez listadas las placas de desarrollo (ver Anexo B), se realiza la selección del sistema embebido, para ello se tienen en cuenta los siguientes puntos:

- Se requiere una placa de alto rendimiento, buena capacidad de ejecución pero que su valor en el mercado no fuera tan alto, priorizando su relación costo beneficio.
- Se debe contar con un número específico de pines entrada y salidas digitales, con el fin de poder conectar un par de circuitos de adecuación, los cuales sirven de acople entre los tipos de señales discretas que se manejan.
- Disponibilidad de poder conectar periféricos como la cámara web y una pantalla de visualización, lo cual facilita la comunicación sin la necesidad de crear un driver que permitan el correcto funcionamiento.
- Debe contar con un procesador ARM+DSP con el fin de incrementar la eficiencia computacional al momento de utilizar la librería OpenCV para la creación de interfaces gráficas ya que estudios previos comprueban la reducción de tiempo de ejecución de algoritmos cuando se hace uso de este tipo de procesadores.

Teniendo en cuenta los puntos anteriores, se elige la placa que mejor se adecue a los requerimientos para la instalación en la planta clasificadora, para ello se decide probar con dos placas: la Beaglebone black y la Raspberry pi 3. Estas dos placas cumplen a cabalidad con los requerimientos para el proyecto aunque no disponen de un DSP dedicado, poseen un procesador ARM el cual cuenta con un Soc que incluye ciertos módulos como CPU, GPU, DSP, SDRAM, Puerto USB.

Al realizar las capturas de imágenes bajo las mismas condiciones con las dos placas y comparándola con las captadas con el PC se nota una diferencia entre la Beaglebone y las otras dos, tal como se observa en la Figura 46.

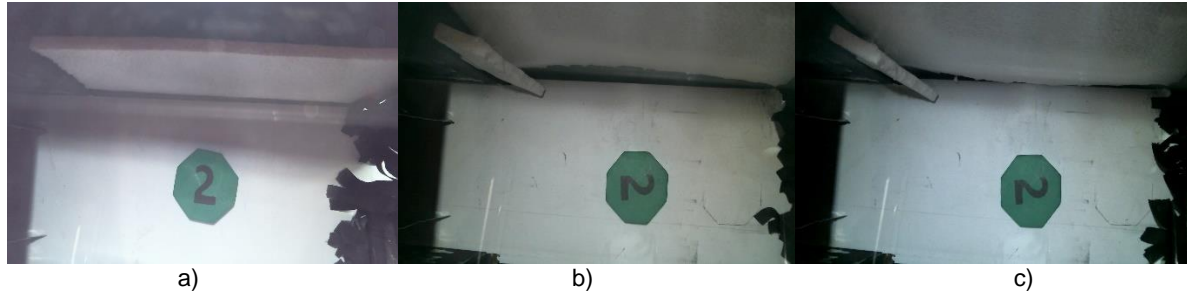


Figura. 46. Imágenes capturadas con una cámara Logitech c210 sobre un mismo escenario. a) Beaglebone black. b)Raspberry 3 pi. c) PC.

La Raspberry está diseñada para dispositivos tipo media (videos, captura de imágenes, audio), por su parte la Beaglebone no tiene capacidad de procesamiento, no contiene un decodificador de video o un decodificador de audio integrado debido a que la placa está diseñada para desarrollo hardware. Para los requerimientos del proyecto se necesita que la imagen capturada sea la adecuada para realizarle un procesamiento posterior, por lo tanto, se decide continuar el proyecto con la Raspberry y dejar a un lado la Beaglebone black.

2.3.1.5 Circuito de adecuación: Para el circuito de adecuación se utiliza el módulo relés de Arduino de 4 canales a 5 Vdc, el cual sirve para acoplar las señales discretas que se manejan entre el sensor, el sistema embebido y el PLC, ingresando señales de 3.3v y 5v, obteniendo salidas de 24 v que van al PLC. El diagrama circuital se muestra en la Figura 47. donde se aprecia que es un sistema hardware bastante simple que facilita el intercambio de señal entre los dos dispositivos.

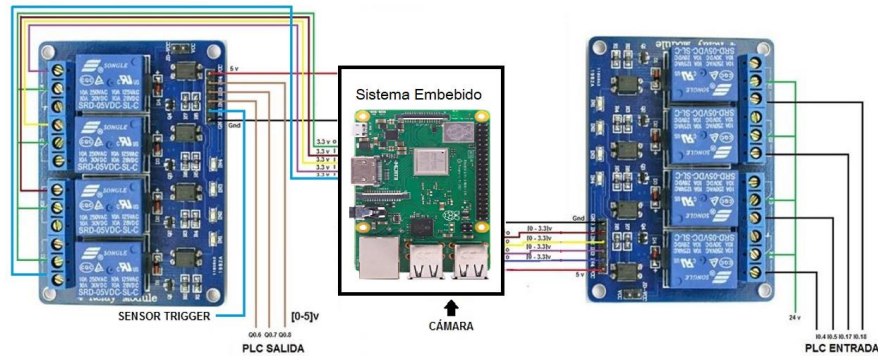


Figura. 47. Circuito de adecuación de señales discretas.

PC: Como el sistema embebido no cuenta con una pantalla de visualización y un teclado, se utiliza el PC para poder acceder a la terminal y ejecutar el script.

2.3.2 Herramientas de programación

Actualmente, existen diferentes tipos de herramientas de programación. Se tuvieron en cuenta las más utilizadas, que sean de código abierto y en constante evolución, que posean una gran comunidad de usuarios e información disponible.

2.3.2.1 Lenguaje de programación: dentro de los diferentes tipos de lenguaje de programación se encuentra: Java, C, C++, Python, C# y JavaScript. Se escoge Python debido a que su sintaxis es fácil de entender por ser muy cercana al lenguaje natural y los programas se asemejan a pseudocódigos, lo cual permite un mejor mantenimiento. Su código es más organizado ya que hace uso de la indentación teniendo así un código legible, es de código abierto, permite crear aplicaciones e involucrarse en su desarrollo. Tiene tipado dinámico, es multiplataforma y está disponible para Windows, Mac y distribuciones Unix/Linux. Es importante mencionar que el lenguaje Python puede utilizarse sin problemas en entornos embebidos basados en ARM, además las aplicaciones gráficas requieren de análisis numérico con matrices y vectores o el desarrollo de funciones matemáticas, para ello existe la herramienta NumPy, una extensión de Python que le agrega soporte, constituyendo una librería de funciones matemáticas de alto nivel. Al utilizar NumPy, la funcionalidad de Python es comparable a la de Matlab ya que permite al usuario escribir programas de una alta eficiencia y velocidad, basados en operaciones con vectores y matrices [34].

2.3.2.2 Librerías Gráficas Embebidas

Es importante elegir una librería como herramienta central a la hora de hacer un desarrollo de visión artificial. Estas librerías pueden utilizarse con cámaras y sensores de cualquier fabricante, pues no están ligadas a un hardware específico, en el área de visión artificial y procesamiento de imágenes existen librerías tales como Sherlock, Halcon, OpenCV y Point Cloud Library (PCL) cada una de ellas con una licencia comercial o BSD(Berkeley Software Distribution),y de alta, baja o mediana complejidad, para el desarrollo del proyecto se escoge la librería OpenCV, una de las más utilizadas para programar aplicaciones graficas en los sistemas embebidos ARM. OpenCV fue lanzada bajo una licencia BSD, por lo tanto, es libre tanto en la parte académica como en la comercial. Tiene interfaces para los lenguajes de programación C++, C, Python y Java. OpenCV puede ser utilizada en Linux embebido. OpenCV fue especialmente diseñada para incrementar la eficiencia computacional, con un fuerte enfoque en aplicaciones de tiempo real, un aspecto fundamental, teniendo en cuenta los recursos limitados de los sistemas ARM en comparación con un ordenador. Escrita en C/C++ optimizado, OpenCV puede tomar ventaja del procesamiento con múltiples núcleos. Habilitada con OpenCL, también puede tomar ventaja de la aceleración del hardware del dispositivo ARM donde se ejecute. Reconocida mundialmente, OpenCV tiene un sin fin de miembros en la comunidad de usuarios y el número de descargas estimadas, exceden los 7 millones. En la Figura 48, se presentan las principales características de la librería OpenCV; como se observa, tiene múltiples funciones para el área de visión y procesamiento de imágenes.

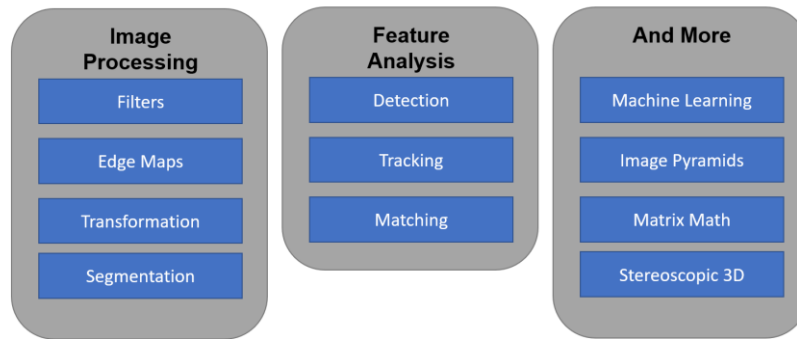


Figura. 48. Se presentan las principales características de la librería OpenCV. Como se observa, tiene múltiples funciones para el área de visión y procesamiento de imágenes.

2.3.2.3 Sistema operativo embebido.

Existen diferentes plataformas, cada uno con su procesador y aquellas que poseen integrado un procesador ARM, funcionan bajo un sistema operativo lo cual permite al usuario concentrarse en el desarrollo de la aplicación, dejando de lado detalles de hardware. La configuración de memoria, la conexión a la red, y los periféricos de Entrada/Salida pueden ser manejados directamente por el sistema operativo, para el desarrollo se empleó Linux el cual ha sido utilizado en los sistemas ARM por décadas. Tiene una gran cantidad de usuarios, y la posibilidad de compilar el kernel de origen; que es una gran ventaja para los sistemas embebidos. El kernel se puede configurar de tal manera que se habiliten únicamente las opciones de hardware mínimas y eliminar las que no son necesarias. Por otro lado, si se requiere añadir nuevo hardware, existen múltiples fuentes para obtener los drivers. Para los sistemas embebidos están disponibles, las distribuciones Angstrom, Ubuntu, raspbian [35].

Para la instalación del sistema operativo y la librería OpenCV dentro de la tarjeta embebida se realizó una investigación exhaustiva porque había muy poca información, lo cual consumió tiempo para poder integrar desde la ejecución del script recursos disponibles para su correcto funcionamiento; cada uno de los pasos para la instalación se pueden observar en el Anexo B, donde se aprecia cada uno de los comandos ejecutados y se demuestra la complejidad para poder descargarlos.

2.4 Piezas para la banda transportadora

Una vez implementado las herramientas de programación en la tarjeta embebida se realizó un pequeño script que permitiera capturar imágenes con el fin de seleccionar las piezas a utilizar sobre la banda transportadora, previamente se realizaron pruebas con diferentes objetos logrando así determinar qué tipo de piezas deberían usarse las cuales se estarán desplazando sobre la banda a diferentes velocidades.



Figura. 49. Piezas de prueba utilizadas con diferente iluminación capturas con una cámara Logitech C210 utilizando un PC [Fuente propia]

Observando el comportamiento de los objetos y las imágenes obtenidas sobre la banda transportadora Figura 49 se concluye:

- Material de la pieza: El tipo de material es importante al momento de realizar un análisis de las imágenes obtenidas puesto que se busca que los elementos reflejen la menor cantidad de luz posible y evitar los destellos de luz en la imagen.
- El color: El tipo de color debía ser opaco por lo tanto las piezas debieron ser pintadas de un color mate.
- Formas definidas: Se decidió utilizar formas geométricas para fines aplicativos del algoritmo.
- El tamaño de la pieza: El tamaño es fundamental ya que la pieza debe tener una altura ideal que permita ser detectado por el sensor que dispara la cámara, pero no muy alta para evitar que la pieza bloquee los haces de luz proveniente de los esquemas de iluminación e igualmente para evitar bloqueos mecánicos sobre la banda.
- La base de la pieza: Las piezas que se elijan deben tener una base de área mayor, ya que la pieza a ciertas velocidades soporta vibraciones que se generan por el desplazamiento sobre la banda transportadora.

Finalmente, para este proyecto se escogieron piezas de madera con forma cuadrada, triangular y octagonales cubiertas con una pintura de color azul, verde y rojo mate, como se observa en la Figura 50, son piezas de diferente forma con igual color para un algoritmo de clasificación. El sistema de clasificación se diseña para clasificar tres tipos de piezas, sin embargo, una cuarta posición se deja para aquellas piezas que no cumplen con la condición.



Figura. 50. Piezas de forma geométrica para banda transportadora de clasificación [Fuente propia].

2.5 Definición de los datos de entrada para el algoritmo de segmentación.

Actualmente, en el área de visión artificial existen plantas de clasificación donde se realizan capturas de imagen o video y por medio de un algoritmo se extraen ciertas características de un objeto para posteriormente analizarlas alcanzando el objetivo final, el cual es obtener el mejor resultado de clasificación. Para este caso específico se desarrollaron dos algoritmos: uno por forma y otro por color, donde se realiza una segmentación utilizando la técnica por umbralización manual que permite extraer la máscara del color en el espacio de color HSV.

2.6 Orden lógico de ejecución del algoritmo.

La ejecución del algoritmo se representa por medio de un diagrama de flujo Figura 51. Se compone de una rutina principal la cual realiza una segmentación extrayendo una máscara de la imagen y dos subrutinas que se llevan a cabo dependiendo del algoritmo seleccionado, donde se realiza un procesamiento y una toma de decisión la cual la ejecuta el clasificador ubicándose en posición deseada por el algoritmo de control.

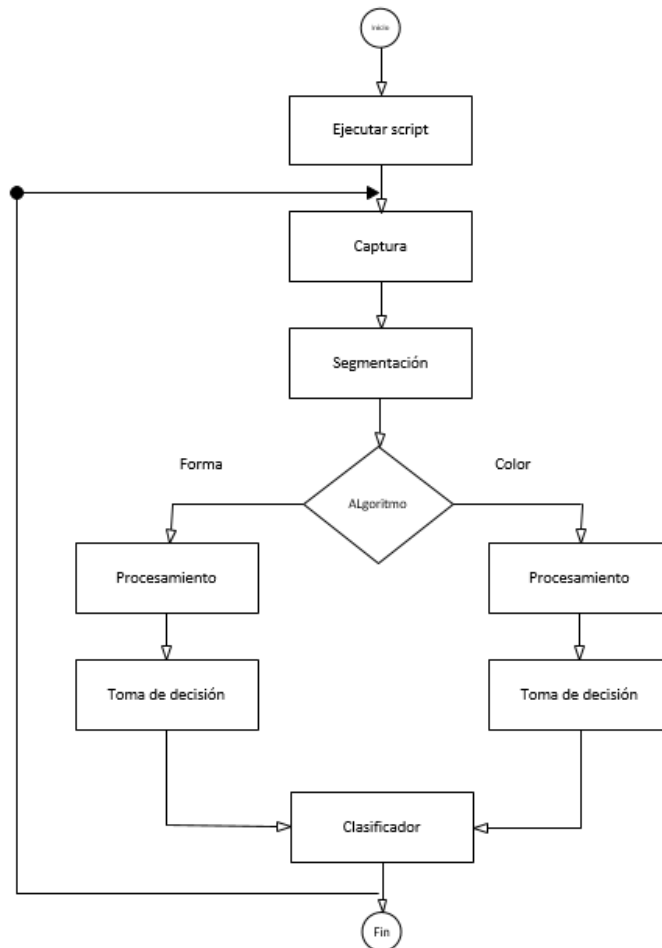


Figura. 51. Ejecución del script diagrama de flujo general [Fuente propia].

2.7 Descripción del algoritmo

En esta sección se realiza una descripción de las partes del algoritmo donde se explican ciertas líneas de código que son consideradas importantes en la ejecución del script. El algoritmo está alojado en la placa raspberry pi 3, corre sobre el sistema operativo Linux, está escrito en el lenguaje de programación Python y utiliza la librería OpenCV.

2.7.1 Cabecera

Se compone de todos los recursos que utiliza el algoritmo para poder obtener un resultado satisfactorio en la cabecera se habilitan los pines de la placa y se importan las librerías. Como se observa en la Figura 52, con la instrucción `RPi.GPIO as GPIO` se habilitan los pines que utiliza la raspberry, la otra instrucción permite importar la librería OpenCV con el fin de poder ejecutarla durante el proceso.

```
import RPi.GPIO as GPIO....  
import cv2 . . . .
```

Figura. 52. Extracción de la cabecera del algoritmo principal.

2.7.2 Declaraciones

En esta parte se configuran los pines de entrada o de salida de la placa, que pines se ponen en bajo o en alto, se declaran las constantes, los tipos de datos y las variables que se usan en el algoritmo, como se observa en la Figura 53, se asigna el pin 5 de la placa a una variable creada en este caso `ent91`, se configura los pines con la siguiente línea de código `GPIO.setup(ent91,GPIO.OUT)` en este caso habilita el pin 5 como salida y lo pone en alto con `GPIO.output(ent91,GPIO.HIGH)`

```
ent91=5...  
GPIO.setup(ent91,GPIO.OUT)..  
GPIO.output(ent91,GPIO.HIGH).
```

Figura. 53. Fracción del algoritmo-configuración.

2.7.3 Cuerpo

Aquí se escriben todas las instrucciones del algoritmo, donde se realiza la captura de la imagen, se ejecuta la rutina que efectúa la segmentación extrayendo la máscara y las rutinas secundarias donde se ha seleccionado con antelación el tipo algoritmo forma o color. Para la captura de la imagen como se observa en la Figura 54, se hace un llamado a una función `captura()`, donde se especifica qué cámara se va a utilizar `cv2.VideoCapture(0)`, en caso de tener más de una, se define el tipo de resolución `camera.set(3,1920)`, `camera.set(4,1080)` y dónde se va a guardar la imagen capturada `cv2.imwrite("imagen.jpg",camera_capture)`.

```
def captura():  
camera=cv2.VideoCapture(0)
```

```
camera.set(3,1920)  
camera.set(4,1080).....
```

```
cv2.imwrite("imagen.jpg",camera_capture)
```

Figura. 54. Fracción del algoritmo-captura de imagen.

2.7.3.1 Rutina principal

En la rutina principal se hace un llamado a la imagen que se capturo, se recorta dejando solo la zona por donde se desplaza la pieza ya que a diferentes velocidades la pieza estará en otra posición como se observa en la Figura 55, se utiliza `cv2.imread()` para cargar la imagen capturada y posteriormente recortarla definiendo un área en Y de 450-1070 y en X de 250-1700.

```
cv2.imread('imagen.jpg')  
imagen[450:1070,250:1700]
```

Figura. 55. Fracción del algoritmo- recorte de imagen.

El recorte elimina zonas de la imagen que no interesan Figura 56a) y b) facilitando más adelante la segmentación y posterior a ello, la imagen se cambia al espacio de color HSV, como se aprecia en la Figura 56c).

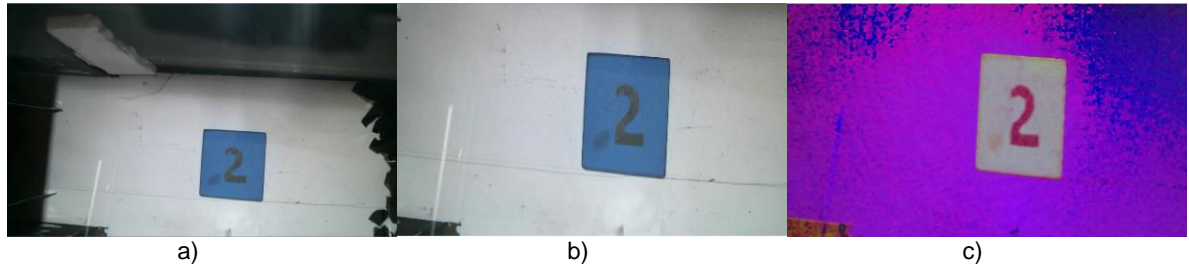


Figura. 56. Recorte de imagen a procesar HSV. a) Imagen captura por la cámara b) Recorte de la imagen c) Imagen en el espacio de color HSV.

La ventaja del espacio HSV es la relación que guarda este espacio con la iluminación, el color conserva las características esenciales sin importar la iluminación ya que las componentes son independientes. En el algoritmo se hace uso de la siguiente línea de código que permite pasar del espacio de color RGB a HSV, es importante aclarar que en Python se intercambian los planos RGB a BGR.

```
cv2.cvtColor(imagen, cv2.COLOR_BGR2HSV)
```

En un vector se define el H que es el tono, el S que es la saturación y el V que es el valor. Para el algoritmo se definen los rangos, se escoge rojo, verde y azul porque las piezas son de ese color. El espacio HSV y el tono de la imagen se representa en una circunferencia de 0° a 360° , la librería OpenCV evalúa el tono en un rango de 0° a 180° .

```
H,S,V  
rojo_bajos=np.array([0,65,75])
```

```
rojo_altos=np.array([12,255,255])
```

Posteriormente, se realiza la segmentación por umbralización permitiendo separar los objetos de interés dentro de una imagen logrando obtener las máscaras para cada tipo de color. Como se observa en la máscara roja se obtiene definiendo el rango entre rojos altos y rojos bajos en espacio HSV.

```
mascara_rojo1=cv2.inRange(hsv,rojo_bajos1,rojo_altos1)
```

Al definir buenos rangos (Figura 58), se logra una buena segmentación; para definir estos rangos manualmente se hace uso de un algoritmo extra (ver Anexo B), obteniendo un buen resultado en la extracción de la máscara.

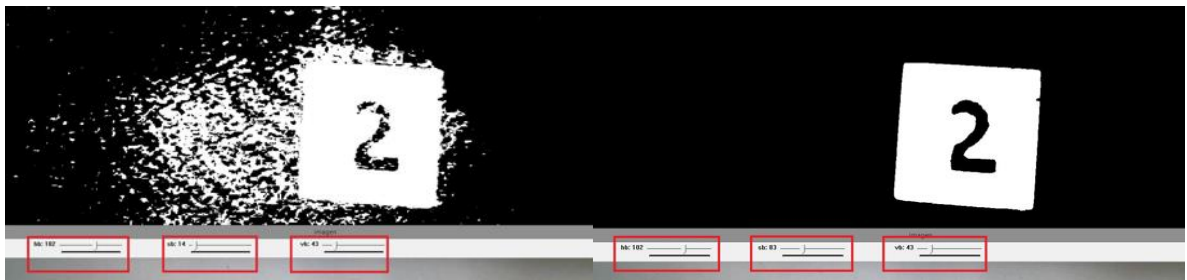


Figura. 57. Segmentación de una imagen por umbralización manual.

2.7.3.2 Rutina secundaria

Una vez extraído las máscaras se procede a ejecutar el tipo de clasificación por forma o color.

Forma

En esta parte se agrupan las máscaras en una sola, y posteriormente se encuentran los contornos en una imagen binaria Figura 58, utilizando el método de aproximación `cv2.CHAIN_APPROX_SIMPLE`, el cual elimina todos los puntos redundantes y comprime el contorno, con lo que se ahorra memoria posterior a ello se realiza una aproximación de contorno.

```
mask=cv2.add(mask,mascara_azul)  
_,contours,_=cv2.findContours(mask,cv2.RETR_TREE,cv2.CHAIN_APPROX_SIMPLE)  
approx=cv2.approxPolyDP(actual,0.02*cv2.arcLength(actual,True),True)....
```

Figura. 58. Fracción del algoritmo por Forma.

Después de ejecutar la demás líneas de código se obtiene una imagen (Figura 59), donde se dibuja el contorno sobre una pieza permitiendo clasificarla en la posición que corresponde a las fichas de forma cuadrada.

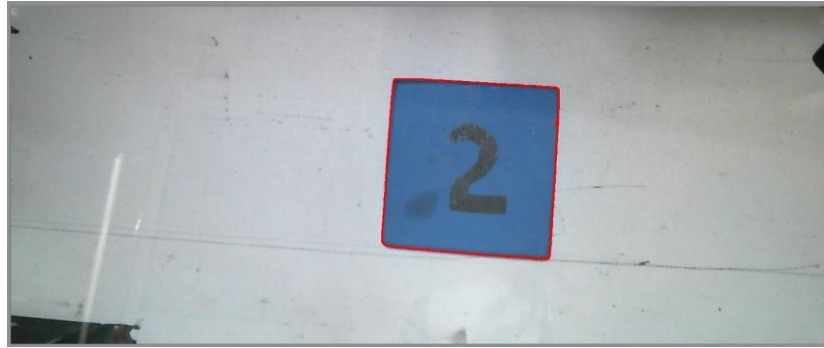


Figura. 59. Contorno que dibuja el algoritmo en una ficha cuadrada.

Color

A partir de las tres máscaras que se obtienen en la rutina principal, se extraen los momentos de cada una de ellas Figura 60, 'cv2.moments(mascara_rojo1)', seguido se obtiene el que nos interesa "M00", por medio de la línea 'momentsr1['m00']', se evalúa el área mayor definiendo un umbral, 'if arear1 > 4000000', el umbral se define manualmente, la máscara que supere ese valor es el color que clasifica.

```
momentsr1=cv2.moments(mascara_rojo1)  
arear1=momentsr1['m00']  
if arear1 > 4000000 :  
“La pieza es color rojo”
```

Figura. 60. Fracción del algoritmo por color.

Cuando el algoritmo toma la decisión activa la salida de la placa, por lo tanto, envía una señal al PLC, el cual posiciona el cabezal en la posición correcta permitiendo clasificar por tipo de color.

En este capítulo se expuso de manera general, la propuesta de rediseño para la Planta de Clasificación del Laboratorio de Procesos de la Universidad del Cauca. Las modificaciones realizadas permiten continuar con la ejecución del proyecto. Adicionalmente, se presenta la composición del sistema de iluminación, la captura y el procesamiento de las imágenes en el sistema embebido, se fijan los requerimientos para las piezas y se explica la estructura de los dos algoritmos. En el siguiente capítulo, se mostrarán los resultados obtenidos.

Capítulo 3. Resultados

En el capítulo dos, se explican los cambios y mejoras realizados al sistema de clasificación con el fin de implementar y evaluar los esquemas de iluminación seleccionados, se expone la composición del sistema de iluminación, la captura y el procesamiento de las imágenes en el sistema embebido, se fijan los requerimientos para las piezas, se explica la estructura de los dos algoritmos. En este capítulo se describe la funcionalidad de la planta, se realizan pruebas iniciales de clasificación, posteriormente, se evalúa el efecto de la iluminación bajo tres distribuciones de luz diferentes, se determina la incidencia de la luz y finalmente se evalúa estadísticamente el rendimiento del clasificador para algoritmo de forma y color.

3.1 Funcionalidad de la planta

La planta se encuentra en un estado operativo cumpliendo la función de clasificar piezas, cada dispositivo asociado a la planta responde de una manera óptima. Los equipos que se reemplazaron funcionan correctamente, existe buena comunicación entre el PLC y los demás equipos asociados. El variador responde de manera adecuada ante fallos que se puedan presentar y los equipos cuentan con sistema de protección. Se realizaron cambios estructurales en el clasificador lo que permitió el deslizamiento del vástago sin generar mucha fricción como se observa en la Figura 61a) y Figura 61b).

Se realizaron cambios en la zona de traslado de piezas lo cual permite que las nuevas fichas no se atasquen como se muestra en la Figura 61c) y Figura 61 d), la zona del alimentador también tuvo un cambio en su estructura que permitió un mejor desplazamiento de las piezas como se muestra en la Figura e) y Figura f). Con estos cambios mejora la fluidez de las piezas permitiendo un flujo constante de piezas Lo cual reduce las posibilidades de bloqueo físico con los elementos existentes sobre la banda. Los equipos permiten configurarse con las necesidades que requiera el usuario quedando disponible para el desarrollo de nuevos procesos de clasificación basados en visión artificial, módulo que presentó modificaciones agregando más esquemas de iluminación como se observa en la Figura 61.



Figura. 61 Mejoras en el desplazamiento del clasificador

- a) Estructura del clasificador
- b) Estructura modificada del clasificador
- c) Zona de traslado de pieza
- d) Zona de traslado de pieza modificada
- e) alimentador
- f) alimentador modificado

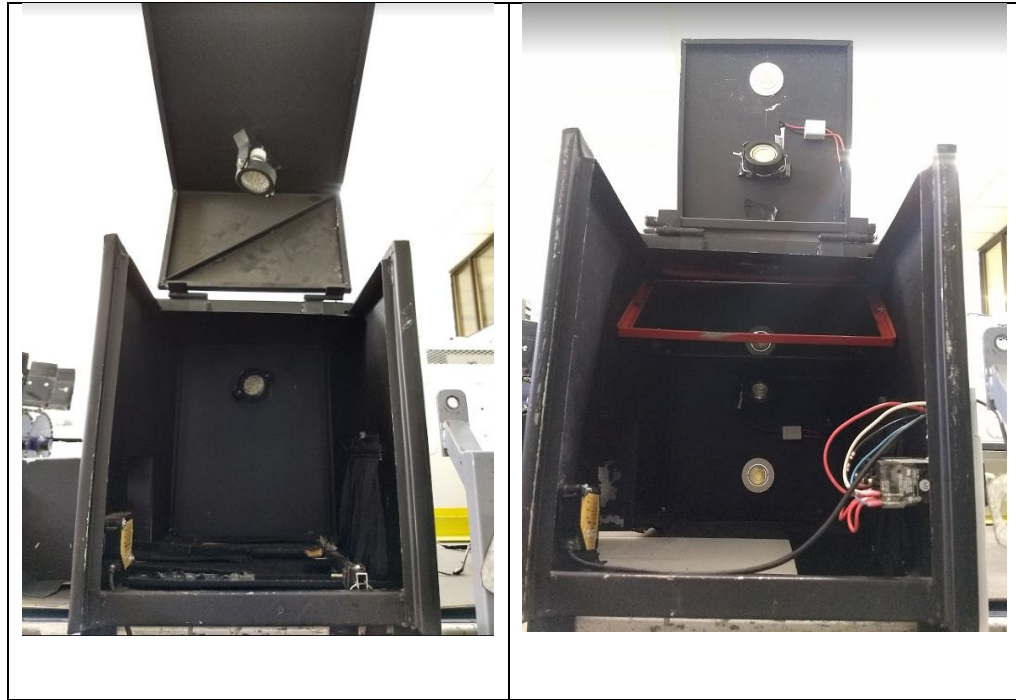


Figura. 62 Mejoras realizadas al módulo de visión.

Además para futuros tareas ya sea mantenimiento o desarrollo, se cuenta con una documentación que sirve de guía para la correcta operación de la planta. En la Figura 63 se aprecia a estudiantes de Ingeniería en Automática Industrial validando los manuales en la planta de clasificación de visión artificial y realizando prácticas académicas.



Figura. 63 Estudiantes de automática en el Laboratorio de instrumentación y control.

3.2 Pruebas

A continuación se procede a realizar distintas pruebas con el fin de obtener resultados sobre el módulo de visión de máquina.

3.2.1 Prueba 1: Primeras fotografías.

A partir de las primeras capturas se realiza una interpretación visual de las fotografías, en la Figura 64a) se evidencian brillos alrededor de la pieza, en Figura 64b), se observa que no es posible identificar el color de la pieza y en Figura 64c) existe una reflexión especular de la luz que rebota hacia el sensor de la cámara.

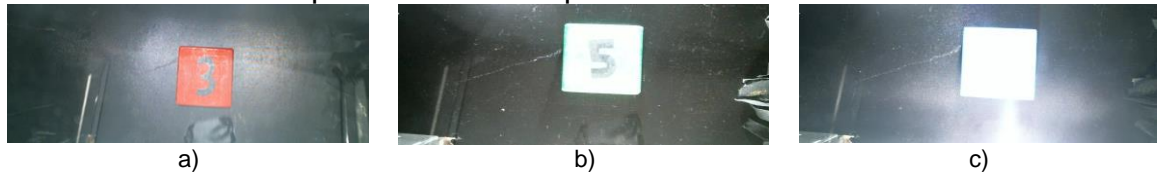


Figura. 64 Escenas captadas con un objeto cuadrado de diferente color
a) Esquema Coaxial b) Esquema Dark Field c) Esquema Lateral

El fenómeno evidenciado se produce debido a que los parámetros de compensación en la cámara son automáticos por defecto y con el fondo oscuro se captan escenas subexpuestas incrementando la ganancia global, lo cual produce saturación en la región de color de la pieza, debido a esto el color negro del fondo se percibe de color gris.

3.2.2 Prueba 2: Segmentación con fondo negro

Las segmentaciones que se muestra en la Figura 65, se obtuvieron a partir de imágenes que fueron capturadas bajo los tres esquemas de iluminación con un fondo negro. Los resultados evidencian que en a) aunque se logra diferenciar la pieza del fondo existe ruido en la imagen, en b) y c) se presenta una deficiente extracción de la máscara.

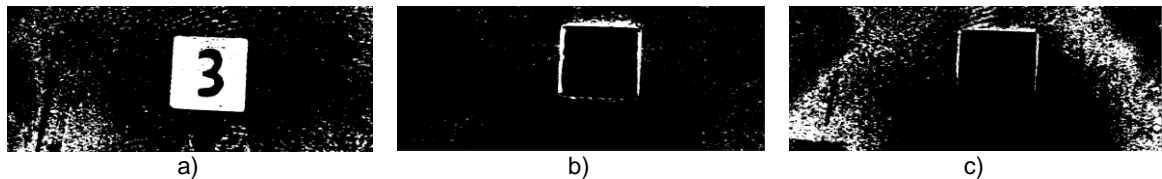


Figura. 65 Imágenes segmentadas
a) Esquema Coaxial b) Esquema Dark Field c) Esquema Lateral

Bajo estas condiciones no es posible realizar experimentaciones ya que esto afectara la respuesta positiva del clasificador.

3.2.1 Prueba 3: Cambio de fondo

Se corrigieron las condiciones de la escena con el fin de lograr una mejora en el proceso de segmentación. Con el nuevo escenario Figura 66 se obtienen imágenes que permiten evidenciar un notable mejoramiento, bajo el esquema coaxial Figura 66a) se logra un buen contraste entre el fondo y la pieza además uniformidad de luz sobre la escena que con lleva a la eliminación de sombras, en Figura 66 b) y Figura 66 c) es posible apreciar el color de las piezas, no existe saturación de luz en la imagen condiciones que favorecen la segmentación.

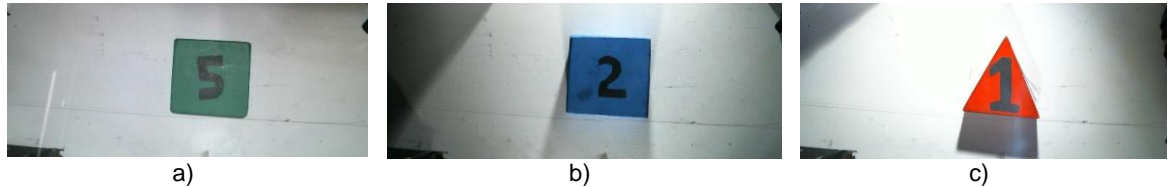


Figura. 66 Resultado del experimento con escenario de fondo blanco bajo tres esquemas de iluminación a) Esquema Coaxial b) Esquema Dark Field c) Esquema Lateral.

Pruebas de segmentación del fondo arrojan como resultado que para un fondo blanco además de presentar mejoras en la fotografía inicial también existe una reducción de ruido como se observa en la Figura 67

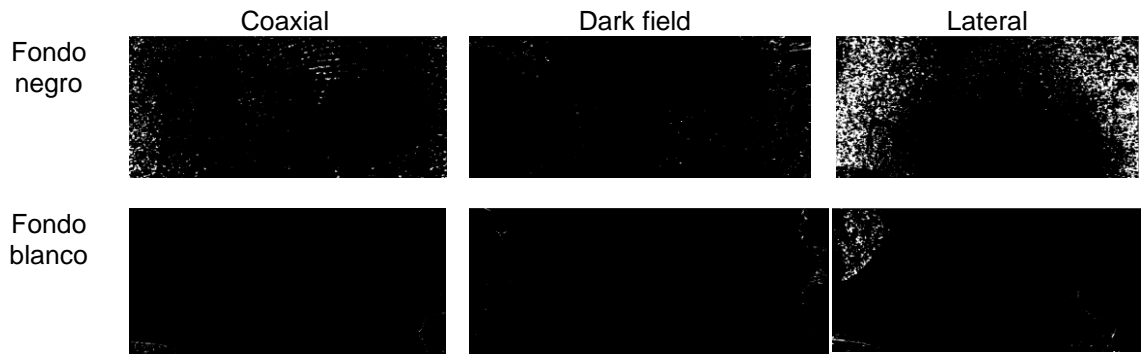


Figura. 67 Resultado del proceso de segmentación para un fondo blanco y negro sin fichas.

3.3 Segmentación de imágenes bajo los tres esquemas de iluminación.

En esta parte se muestra la segmentación obtenida para los tres esquemas de iluminación y objetos de distinto color.

3.3.1 Prueba 1 Esquema Coaxial

A continuación se muestran las imágenes segmentadas bajo el esquema coaxial, la población de estudio se muestra en la Figura 68.

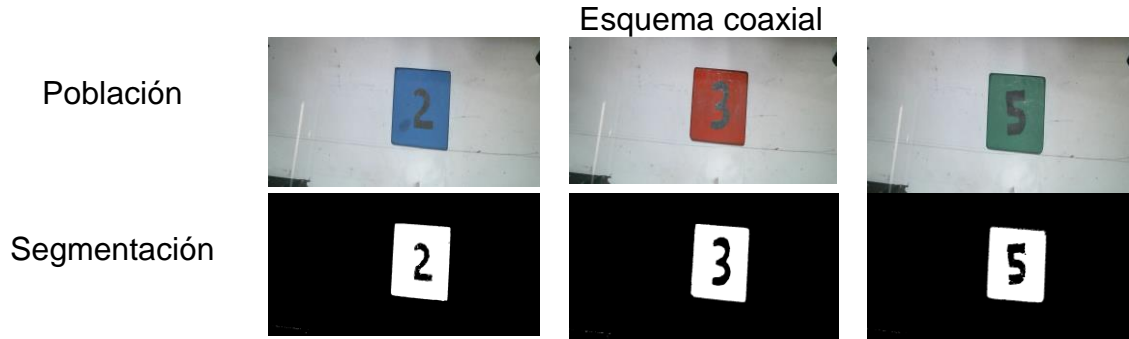


Figura. 68 Resultado del algoritmo de segmentación bajo esquema coaxial.

3.3.2 Prueba 2 Esquema Dark Field

A continuación se muestran las imágenes segmentadas bajo el esquema Dark Field, la población de estudio se muestra en la Figura 69.

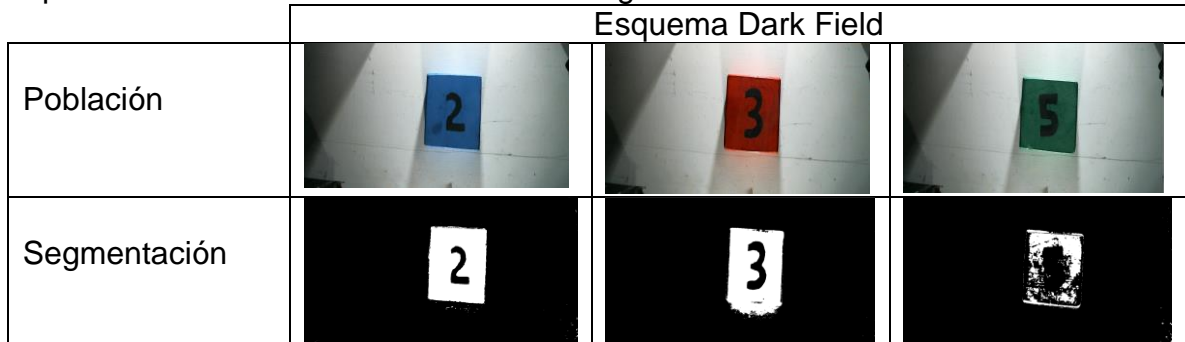
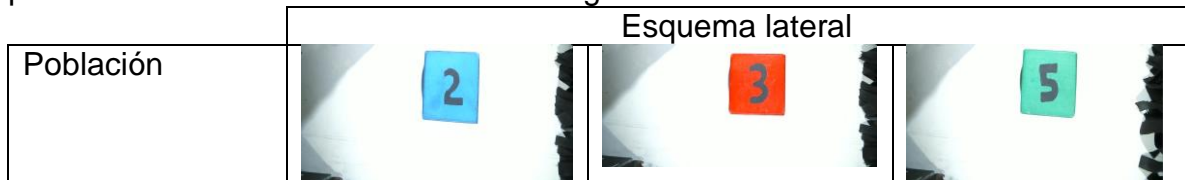


Figura. 69 Resultado del algoritmo de segmentación bajo esquema Dark Field.

3.3.3 Prueba 3 Esquema Lateral

A continuación se muestran las imágenes segmentadas bajo el esquema Lateral, la población de estudio se muestra en la Figura 70.



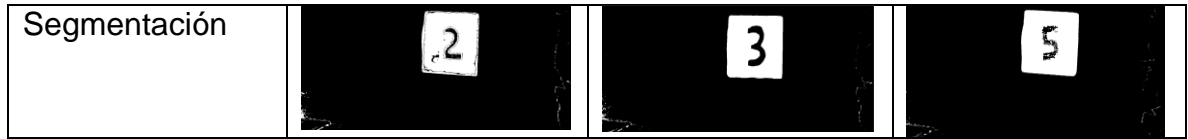


Figura. 70 Resultado del algoritmo de segmentación bajo esquema lateral.

Los rangos que se definieron para la extracción de máscaras en cada uno de los esquemas son obtenidos bajo iluminación coaxial. Como se aprecia en las Figura 70a), Figura 70b) y Figura 70c) se logra separar el fondo de la pieza.

3.4 Incidencia de la luz en el plano HSV

Bajo el espacio de color HSV es posible el dividir una imagen en tres planos, tono, saturación y valor, a continuación se mostrarán los histogramas bajo los tres esquemas de iluminación usando una pieza de color verde.

.4.1 Plano H (hue)

La Figura 71 presenta en el plano H (hue) una concentración de pixeles en el rango comprendido entre 0.42 y 0.5, valores correspondientes a los rangos de tono verde, los datos fuera de este rango se consideran como ruido dado por pixeles adicionales producto del recorte de la imagen Figura 71 a), el histograma perteneciente al esquema Dark Field Figura 71 b) muestra una distribución de pixeles menos uniforme comparado con el esquema lateral, la ficha sometida bajo este esquema presenta diversos tonos de verde, caso contrario sucede con el esquema lateral Figura 71 c) donde la luz incide directamente sobre la superficie de la pieza produciendo un área con mayor uniformidad del color por tanto menor dispersión de los pixeles en el histograma, aunque se aprecia una ligera variación del tono bajo los tres esquemas de iluminación estos pertenecen al rango definido en el espacio HSV para los tonos verdes.

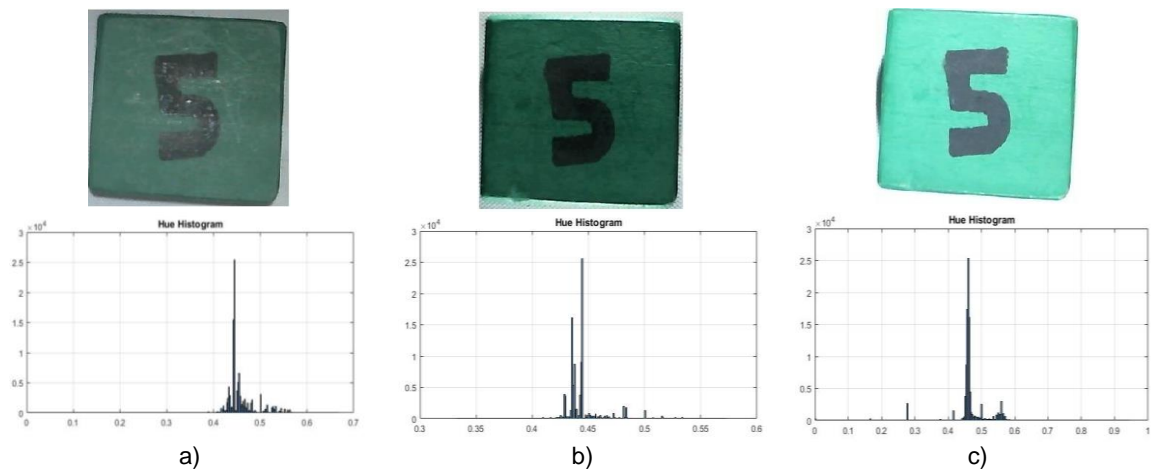


Figura. 71 Planos H pieza color verde tomado bajo los tres esquemas de iluminación. a) Coaxial b) Dark Field c) Lateral.

3.4.2 Plano S (saturation)

En la Figura 72 a) se observa una mayor concentración de píxeles en un rango entre 0.2 y 0.4 correspondiente a número de píxeles pertenecientes a la ficha, los valores que se presentan entre 0 y 0.2 son tonos verdes con tendencia al gris, este efecto se produce por la configuración de la luz. En la Figura 72 b) se presenta un mayor grado de saturación del color comprendido entre 0.5 y 0.7, los píxeles ubicados entre 0 y 0.5 corresponden al número sobre la superficie de la pieza, en la Figura 72 c) se observan tres picos, correspondientes a los píxeles que hacen parte del fondo de la pieza, al número pintado sobre la superficie de la pieza y un tercer pico que corresponde a la pieza inspeccionada.

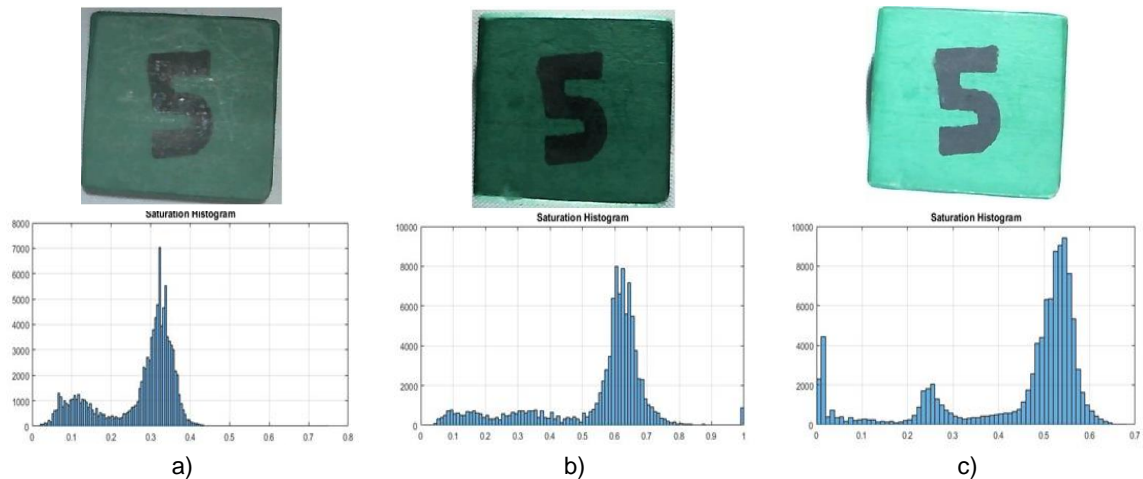


Figura. 72 Plano S pieza color verde tomado bajo los tres esquemas de iluminación a) Coaxial b) Dark Field c) Lateral.

3.4.3 Plano V (Value)

Se observa en la Figura 73 c) un nivel alto de V, la mayor concentración de píxeles se ubican entre 0.8 y 0.95 que representan la pieza inspeccionada, el pico presente en 1 corresponde a parte del fondo de la escena, caso contrario con las Figura 73 a) y Figura 73 b) donde la pieza presenta un tono verde oscuro dado que V presenta tendencia al negro. Los picos con menor altura corresponden al número dibujado sobre la superficie.

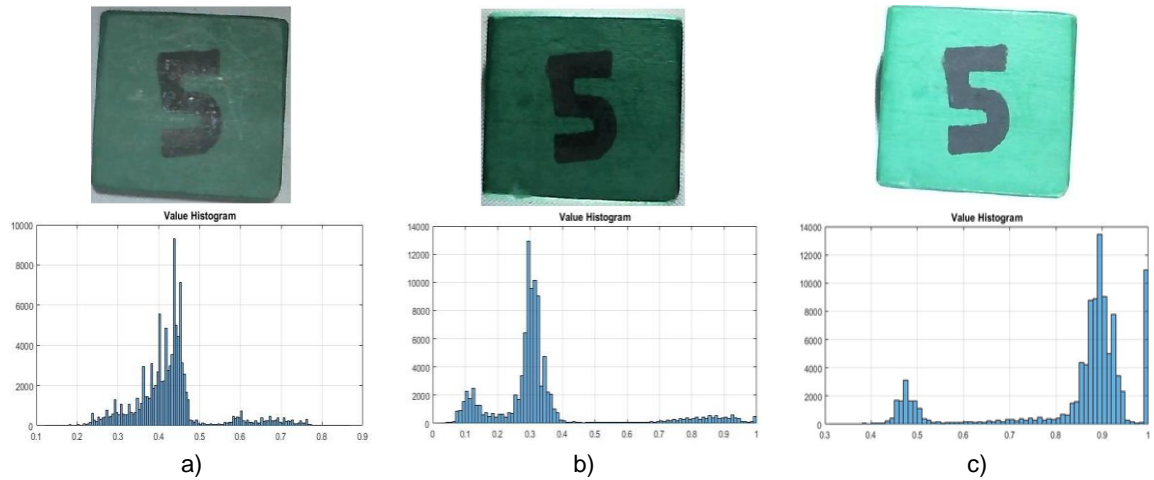


Figura. 73 Plano V pieza color verde tomado bajo los tres esquemas de iluminación. a) Coaxial b) Dark Field c) Lateral.

A partir de lo obtenido se concluye que existe una incidencia directa causada por la distribución de luz a la que está sometida la pieza, esta incidencia se ve reflejada en los cambios que presentan los histogramas de S y V que afectan de manera directa el proceso de segmentación. En la Figura 74 a) se muestra el resultado del proceso de segmentación con rangos definidos que permiten segmentar la pieza bajo un esquema de iluminación y aplicados a otro esquema Figura 74 b) producen un cambio negativo lo que llevaría a una mala clasificación.

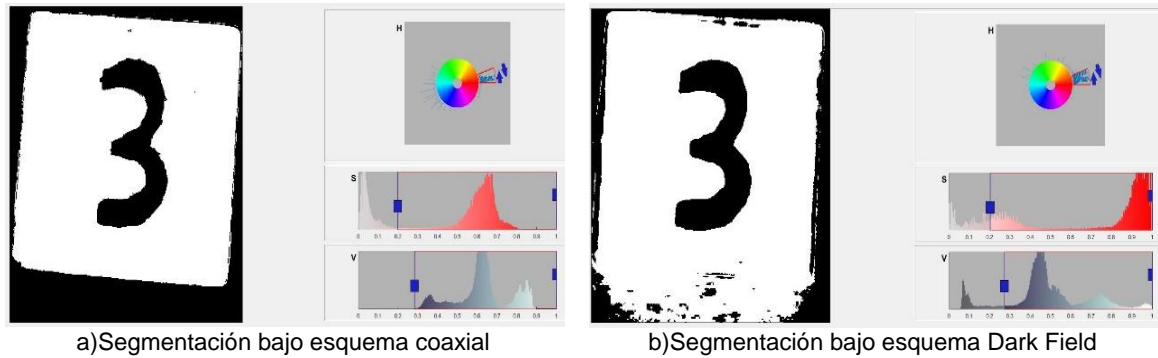


Figura. 74 Resultado de segmentación bajo esquema Coaxial y Dark Field

Por lo comentado, al definir nuevos rangos y eliminar las áreas no deseadas se disminuye el efecto que produce la iluminación, dando como resultado una mejor extracción de máscara como se muestra en la Figura 75.

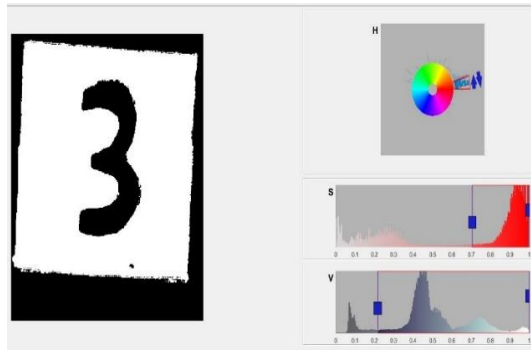


Figura. 75 Resultado de segmentación con nuevos rangos bajo esquema Dark Field

Para el proceso de clasificación donde se aplican los tres esquemas de clasificación es necesario definir rangos para cada escenario de iluminación lo permite incrementar el rendimiento del clasificador.

3.5 Captura de imágenes entre cambios de iluminación

Al realizar cambios entre esquemas de iluminación la respuesta del algoritmo es fallida para las tres primeras fotografías, se procede a capturar estas escenas que se muestran en la Figura 76 donde se evidencia el proceso de adaptación del diafragma el cual limita el rayo de luz que penetra en la cámara permitiendo el paso de mayor o menor luz según sea necesario.

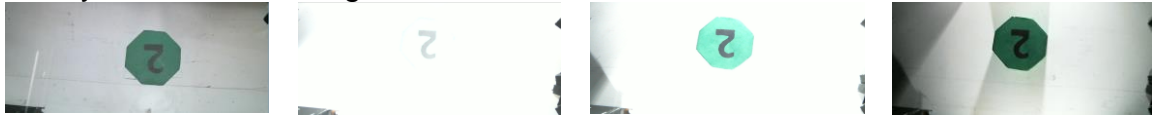


Figura. 76 Fotografía transición del esquema coaxial al Dark Field.

El comportamiento de apertura y cierre del diafragma bajo los tres esquemas es el siguiente. En la Figura 77, donde se observa que el diafragma se cierra cuando el esquema inicial presenta menor intensidad de luz que el esquema final, caso contrario cuando el cambio de escenario es de mayor a menor intensidad de luz.

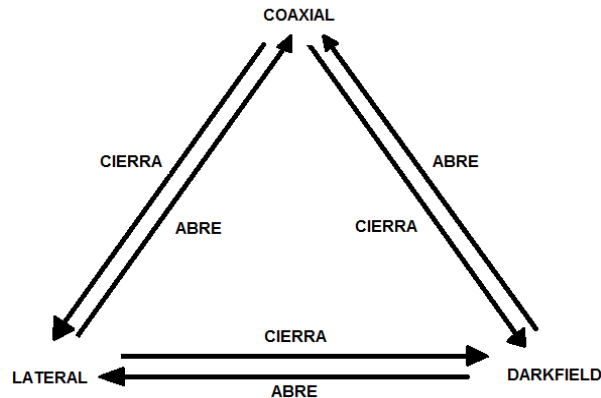


Figura. 77 Apertura y cierre del diafragma [fuente propia].

3.6 Rendimiento del algoritmo clasificador por forma

Para medir el rendimiento del clasificador se hace uso de herramienta estadística que permite evaluar la exactitud de una clasificación, definiendo el grado de concordancia entre las clases y su correcta ubicación.

3.6.1 Matriz de Confusión

La matriz de confusión divide los elementos a clasificar y los llama Clases, por tanto, para un problema de n clases esta debe tener un tamaño $n \times n$ donde generalmente las filas se nombran según las clases reales y las columnas son las clases previstas (resultado que arroja el modelo), además, sirve para mostrar cuando una clase es confundida por otra, por eso, permite trabajar de forma separada los distintos tipos de error [36].

Una matriz de confusión de 2×2 se ilustra de la siguiente manera:

		Predicción	
		Positivos	Negativos
Observación	Positivos	Verdaderos Positivos (VP)	Falsos Negativos (FN)
	Negativos	Falsos Positivos (FP)	Verdaderos Negativos (VN)

Figura. 78 Matriz de confusión para dos clases.

- VP es la cantidad de positivos que fueron clasificados correctamente como positivos por el modelo.
- VN es la cantidad de negativos que fueron clasificados correctamente como negativos por el modelo.
- FN es la cantidad de positivos que fueron clasificados incorrectamente como negativos.
- FP es la cantidad de negativos que fueron clasificados incorrectamente como positivos.

La diagonal principal indica el número de coincidencias que se presentan entre el valor real y el valor dado por el modelo, el resto de valores son errores, bien sea positivos clasificados erróneamente como negativos o negativos clasificados erróneamente como positivos.

De la aplicación de la matriz es posible obtener los siguientes valores:

- Exactitud
- Precisión
- Sensibilidad

Exactitud: se refiere al nivel de concordancia entre el valor real y el resultado arrojado por el modelo [36].

$$\text{Exactitud: } \frac{VP + VN}{\text{Total}}$$

Precisión: Es inversamente proporcional al error, mide el nivel de relación existente entre resultados iguales [36].

$$\text{Precisión} = \frac{VP}{\text{Total clasificados Positivos}}$$

Sensibilidad (recall): Es la tasa de verdaderos positivos (TP) que fueron correctamente identificados por el algoritmo [36].

$$\text{Sensibilidad} = \frac{VP}{\text{Total Positivos}}$$

Lo anterior será aplicado para una matriz de tamaño 4x4.

3.6.2 Algoritmo de Forma

Para probar el rendimiento del clasificador con el algoritmo de color se dividieron las piezas en tres grupos, cada uno contiene una forma y un color distinto Figura 79, además se realizaron cambios en la velocidad de la banda desde un 10% hasta un 80% variando de 10 en 10, los resultados arrojados por la matriz de confusión para el Grupo 1 se muestran a continuación.



Figura. 79 Piezas divididas en grupos para medir el rendimiento del clasificador.

Los resultados mostrados corresponden al grupo uno, los demás resultados se encuentran en el Anexo D

3.6.3 Resultados Matriz de Confusión Grupo 1 bajo Esquema Coaxial

A continuación se muestran los resultados arrojados por la matriz de confusión para el grupo 1 bajo esquema de iluminación Coaxial.

En la Figura 80 se observa una alta precisión para la clase Indefinido, valor que no se ve afectado a medida que se incrementa la velocidad de la banda, en los rangos comprendidos entre 20% y 30% las piezas fueron clasificadas de manera más precisa por tanto ninguna de las piezas fue clasificada erróneamente, esto se ve reflejado en el gráfico de exactitud que dentro de el mismo rango presenta un modelo muy exacto. Se evidencia que el triángulo bajó su precisión con el incremento de velocidad sin embargo su porcentaje de sensibilidad es del 100% lo cual quiere decir que ningún elemento distinto a un triángulo es clasificado como triángulo.

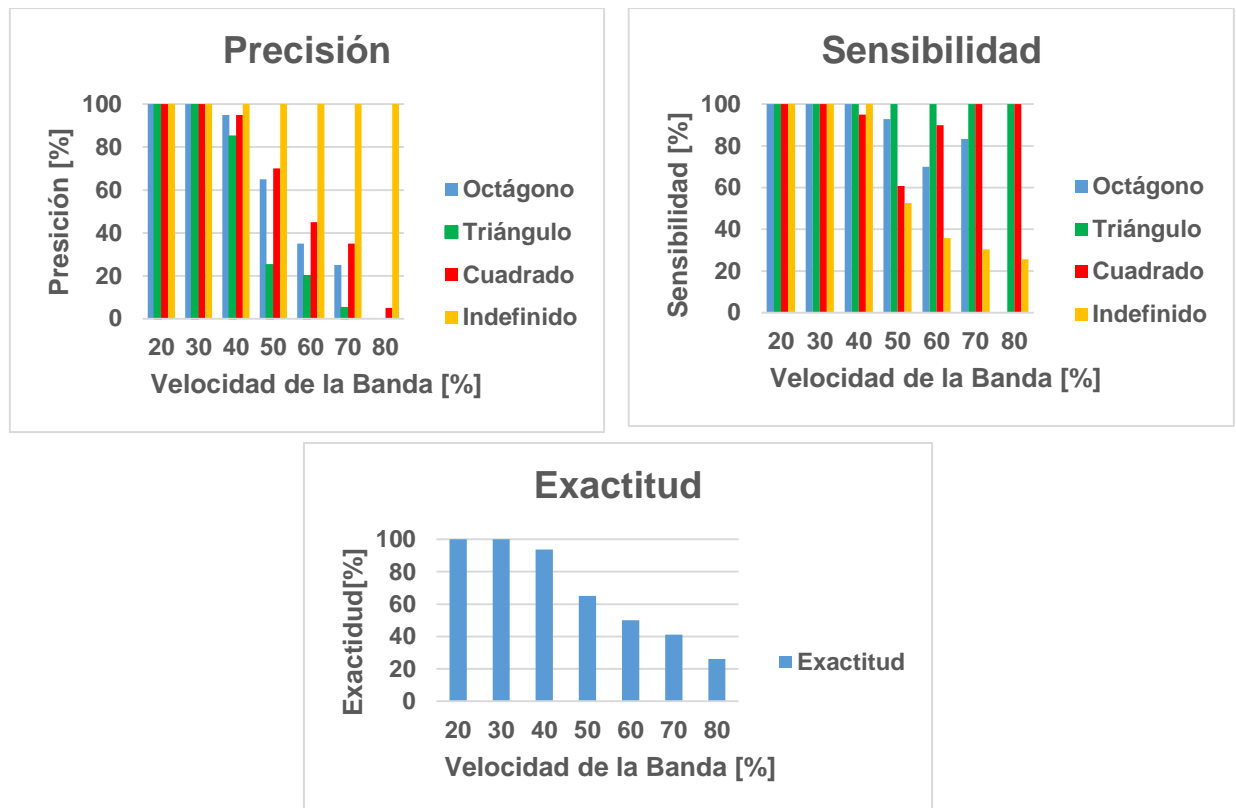


Figura. 80 Resultados de la Matriz de Confusión usando el algoritmo clasificador por Forma bajo esquema Coaxial

3.6.4 Resultados Matriz de Confusión Grupo 1 bajo esquema Dark Field

A continuación en la se muestran los resultados arrojados por la matriz de confusión para el grupo 1 bajo esquema de iluminación Dark Field.



Figura. 81 Resultados de la Matriz de Confusión usando el algoritmo clasificador por Forma bajo esquema Dark Field

Como se observa en la Figura 81 la precisión para todas las piezas decayó a partir de un porcentaje de velocidad del 20%, en un 50% no se observan clasificaciones correctas para la ficha cuadrada sin embargo su sensibilidad es alta en este punto, además la sensibilidad del triángulo no se ve afectada a cambios de velocidad pero su precisión decae con la velocidad. La exactitud del modelo decae a medida que aumenta la velocidad y a un 80% se presentan errores aleatorios del modelo.

3.6.4 Resultados Matriz de Confusión Grupo 1 bajo esquema Lateral

A continuación se muestran los resultados arrojados por la matriz de confusión para el grupo 1 bajo esquema de iluminación Lateral

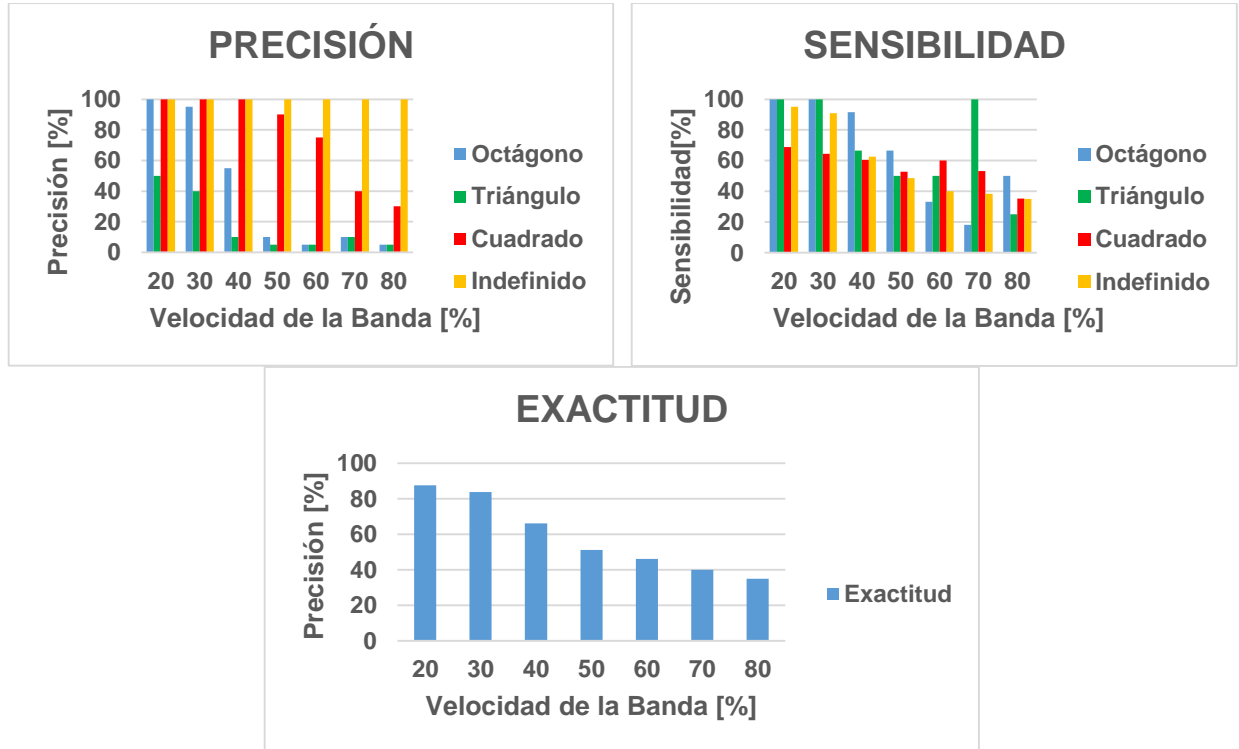


Figura. 82 Resultados de la Matriz de Confusión usando el algoritmo clasificador por forma bajo esquema

Bajo las condiciones en que se capturaron las imágenes este esquema presenta los porcentajes de precisión más bajos para la ficha triángulo, a pesar de esto su sensibilidad tiene un porcentaje alto dentro del rango comprendido entre 20% y 30%. La ficha cuadrada es clasificada correctamente a diferencia de las demás piezas que se ven afectadas por el incremento de velocidad, la sensibilidad a partir de 50% presentan variaciones aleatorias.

De las anteriores gráficas se puede decir que el porcentaje de precisión del modelo se ve afectado a medida que se incrementa la velocidad de la banda, por tanto para una velocidad del 30% el modelo es muy preciso porque todos los octágonos, triángulos, cuadrados e indefinidos son clasificados en la clase que le corresponde, se puede decir que guarda una buena relación entre el valor real y el valor arrojado por el modelo. Conforme incrementa la velocidad se evidencia una reducción en la precisión, los valores reales guardan menor relación con los valores arrojados por el modelo, para la clase de objeto Indefinido se presenta una precisión del 100% debido a la estructura que tiene el algoritmo de segmentación.

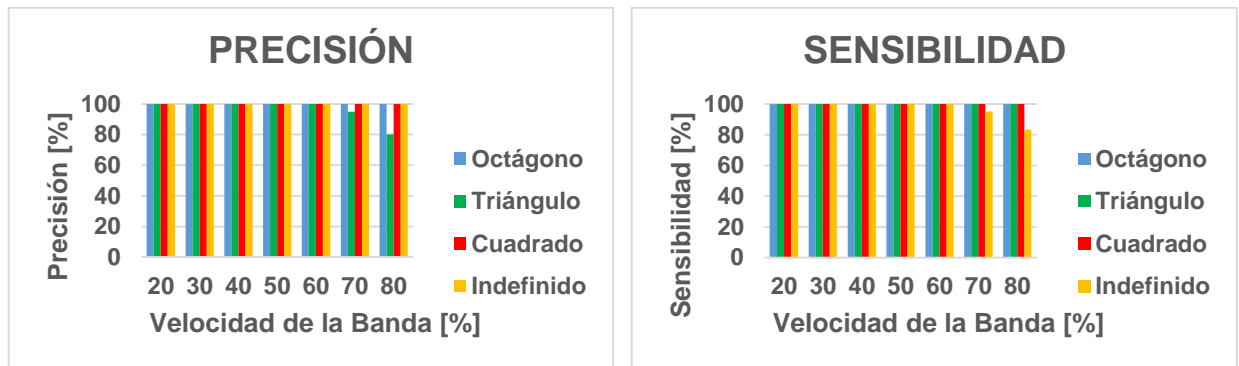
El valor de sensibilidad para la clase Indefinido muestra una reducción de porcentaje conforme aumenta la velocidad de la banda, esto significa que para velocidades

superiores a un 40% el modelo arrojará como resultado pieza Indefinida, lo cual se debe a que en el momento de captura de la imagen la ficha se encuentra por fuera de la estructura del módulo de visión y esto causa una mala clasificación, por tanto el resultado será indefinido a pesar de que la ficha inspeccionada puede ser un octágono, triángulo o cuadrado, se puede decir entonces que a un mayor porcentaje de sensibilidad para una clase pocos valores erróneos serán clasificados dentro de la clase Indefinido, caso contrario cuando se presenta un valor menor de sensibilidad donde caerán muchos valores dentro de esta clase que no corresponden a ella. El porcentaje de exactitud presenta una disminución conforme aumenta la velocidad de la banda, lo cual sucede porque el resultado que arroja el clasificador no corresponde a un valor real observado, dentro de la matriz estos valores son clasificados dentro de otras clases y por lo tanto se presenta un nivel bajo de acierto.

En las gráficas se observa que cuando se realiza un cambio de iluminación existe un cambio en los porcentajes debido a que el color captado por la cámara se modifica de acuerdo a la configuración de luz, lo cual produce una mala clasificación debido a que el valor de V dentro del espacio HSV no está considerado en los rangos definidos, también se observa que los rangos definidos para el color verde bajo el esquema coaxial no son los adecuados para la segmentación bajo las otras configuraciones de luz, por tanto el resultado será Indefinido a pesar de que la ficha inspeccionada puede ser un octágono, triángulo o cuadrado.

3.7. Rendimiento del algoritmo clasificador por color - Esquema Coaxial

A continuación se muestran los resultados arrojados por la matriz de confusión para el grupo 1 bajo esquema de iluminación Coaxial



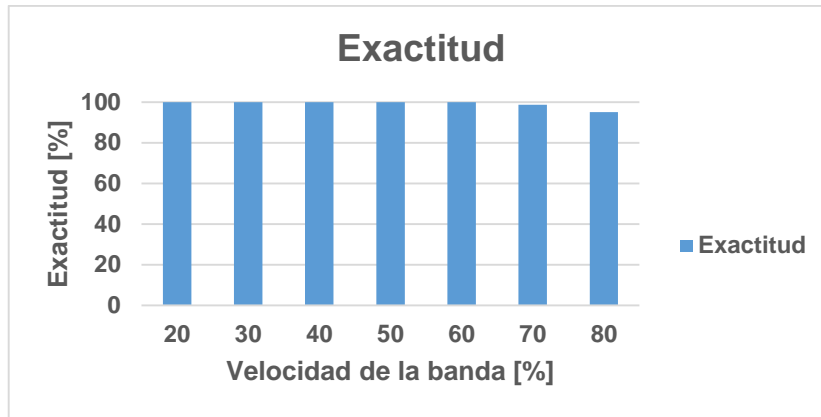


Figura. 83 Resultados de la Matriz de Confusión usando el algoritmo clasificador por color bajo esquema Coaxial

Como se observa en la Figura 83, el nivel de presión es alto para todas las fichas lo cual se ve reflejado en una eficiente clasificación, la exactitud no está por debajo del 90 inclusive a una máxima velocidad de la banda.

3.7.1. Rendimiento del algoritmo clasificador por color - Esquema Dark Field

A continuación se muestran los resultados arrojados por la matriz de confusión para el grupo 1 bajo esquema de iluminación Dark Field

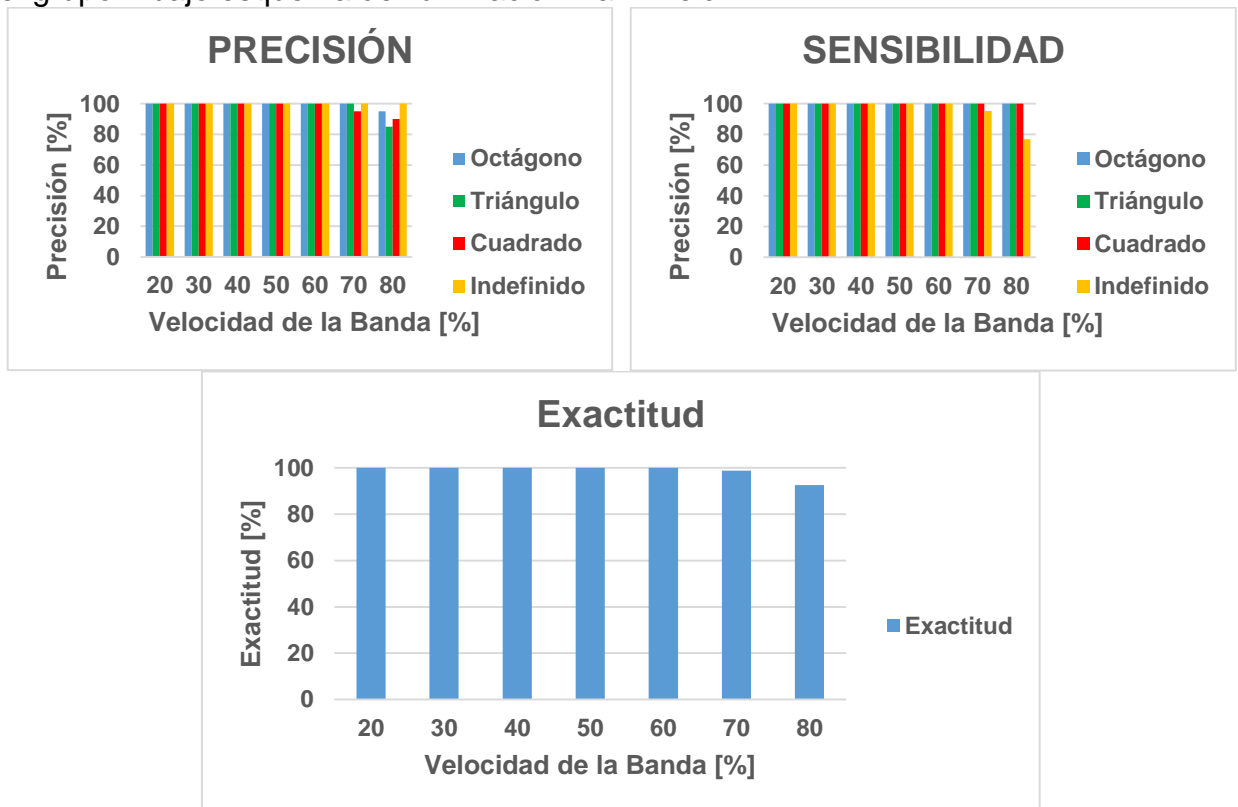


Figura. 84 Resultados de la Matriz de Confusión usando el algoritmo clasificador por color bajo esquema Dark Field

Como se observa en la Figura 84, el nivel de presión del modelo es alto para todas las fichas lo cual se ve reflejado en una eficiente clasificación no se encuentra por

debajo del 80%, la exactitud no está por debajo del 90 inclusive a una máxima velocidad de la banda.

3.7.2 Rendimiento del algoritmo clasificador por color - esquema Lateral

A continuación se muestran los resultados arrojados por la matriz de confusión para el grupo 1 bajo esquema de iluminación Lateral

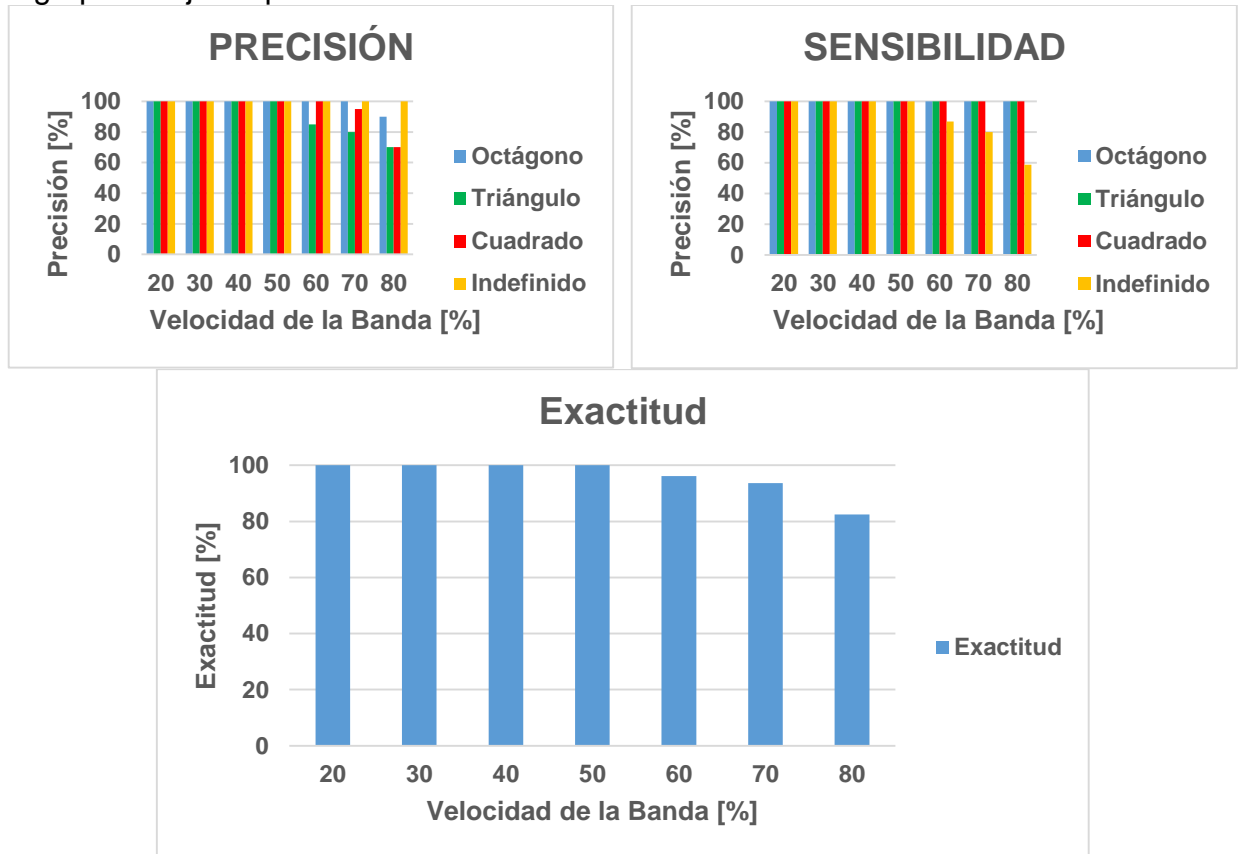


Figura. 85 Resultados de la Matriz de Confusión usando el algoritmo clasificador por color bajo esquema Lateral

Como se aprecia en la Figura 85 existe un cambio con respecto a las figuras anteriores se observa en una caída de la precisión de la figura triangulo a partir del 60%. Además se aprecia que las fichas que no son clasificadas correctamente son clasificadas como objetos indefinidos

El algoritmo de color por su estructura presenta una mayor robustez comparado con el algoritmo de forma y poco se ve afectado por la velocidad de la banda debido a que con el algoritmo de forma en el momento de la captura de la imagen la ficha a una alta velocidad se encuentra saliendo de la estructura del módulo de visión y esto causa una mala clasificación caso contrario al de color que con solo una parte de la ficha es necesario para segmentar el color y dar una positiva clasificación.

3.8 Rendimiento del algoritmo clasificador con Filtro - esquema coaxial.

Para esta prueba se usó un filtro con el fin de obtener una luz más difusa y menos dirigida sobre el objeto, bajo esta configuración bajo el algoritmo de forma, los resultados se muestran a continuación.

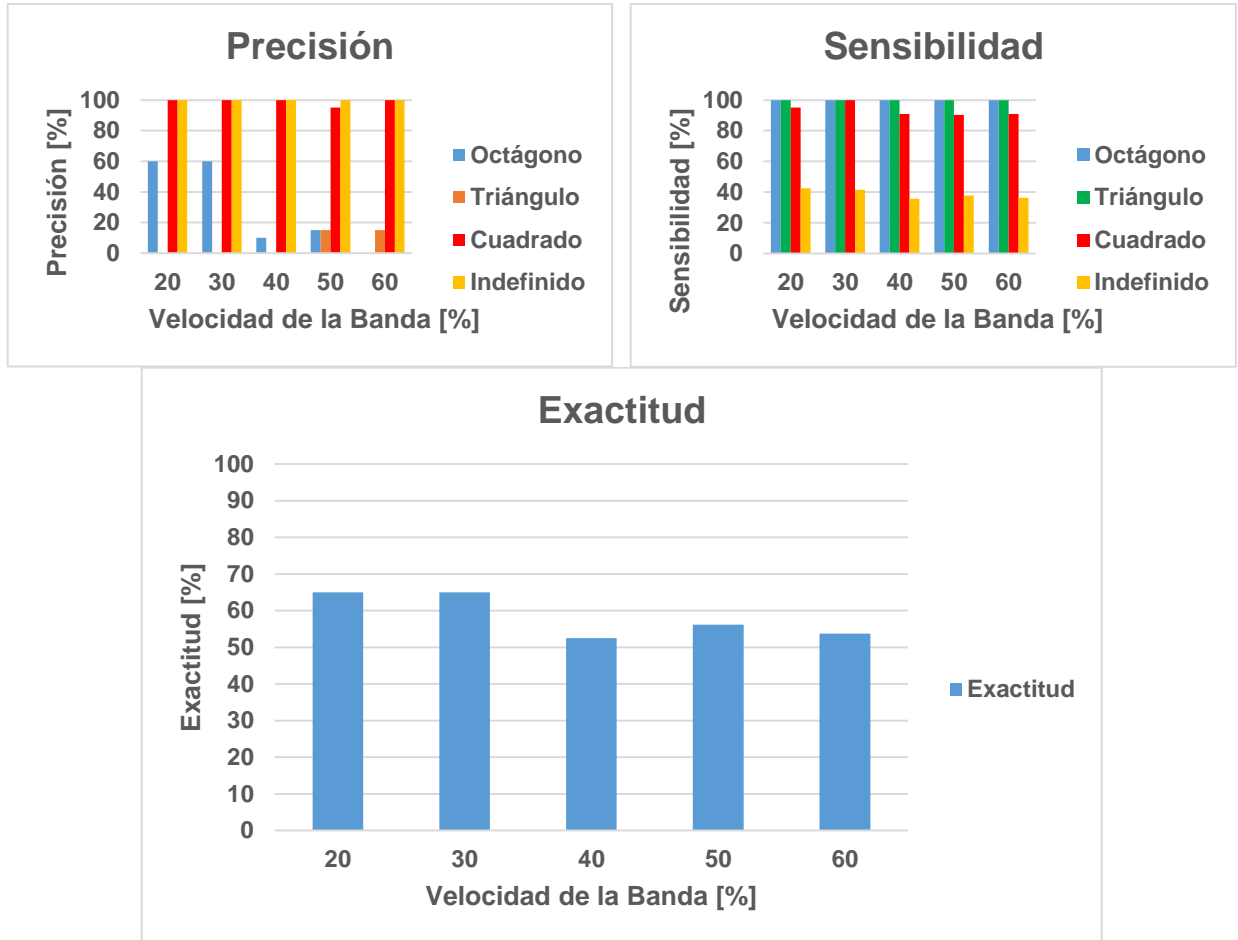


Figura. 86 Resultados de la Matriz de Confusión usando el algoritmo clasificador por color bajo esquema Coaxial con filtro.

Se observa en la Figura 86 una caída en la precisión para las piezas octágono y triángulo, a diferencia del cuadrado que mantiene una buena precisión dentro de los porcentajes de velocidad estudiados, la sensibilidad para las fichas octágono triángulo y cuadrado es alta por lo que algoritmo no incluye datos erróneos dentro de la clase mencionada, la exactitud a baja velocidad no es buena por tanto no es posible obtener una buena clasificación bajo esta configuración.

3.8.1 Rendimiento del algoritmo clasificador por Forma con filtro - Esquema Dark Field

A continuación se muestran los resultados arrojados por la matriz de confusión para el grupo 1 bajo esquema de iluminación Dark Field

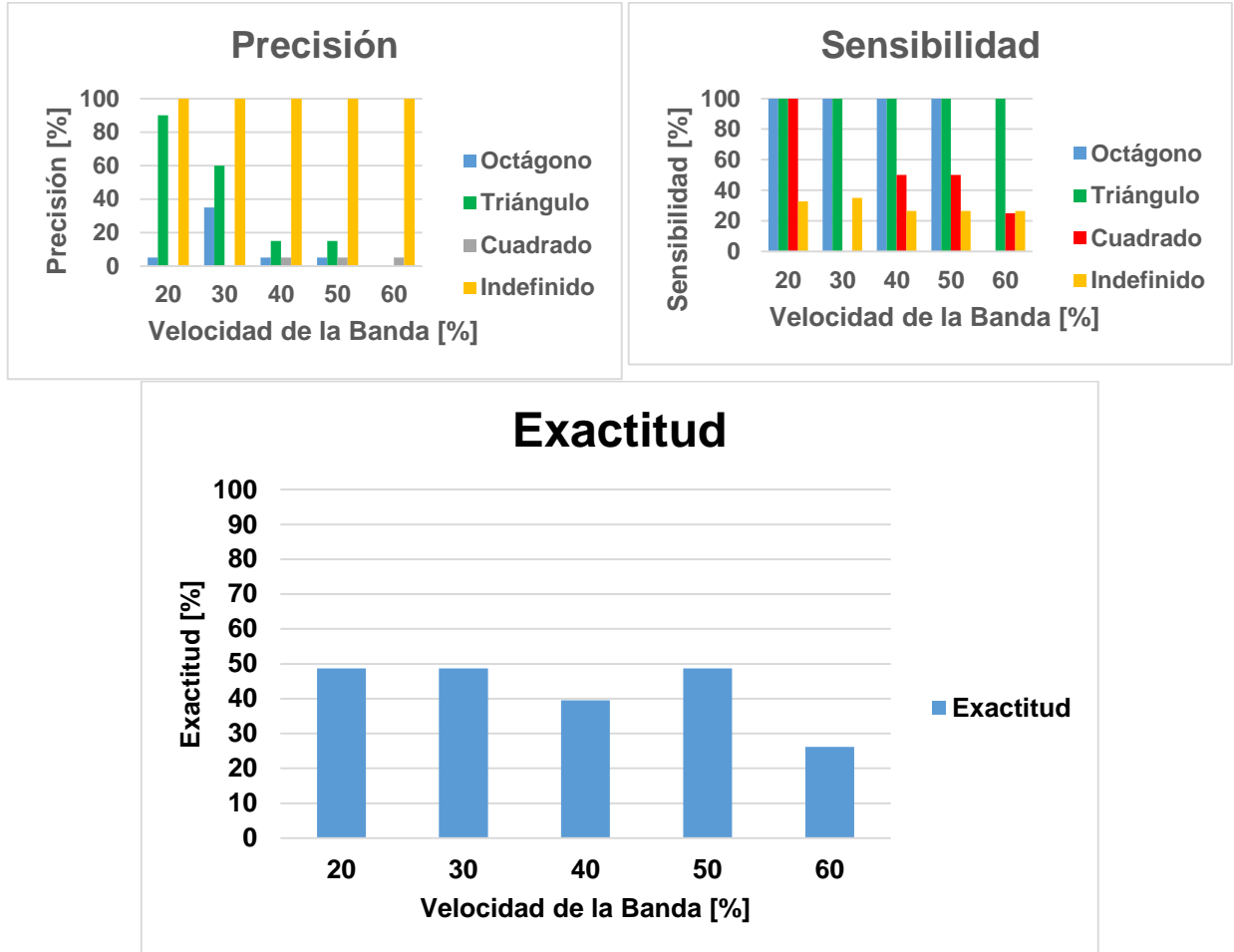


Figura. 87 Resultados de la Matriz de Confusión usando el algoritmo clasificador por color bajo esquema Dark Field con filtro.

En la figura se observa una mala clasificación para todos los objetos los porcentajes de precisión no son los adecuados, como se observa en la sensibilidad del sistema los objetos mal clasificados erróneamente fueron calificados entre indefinidos y cuadrados, igual que en la gráfica anterior de exactitud se muestra bajo porcentaje no es una buena configuración de luz para el clasificador.

3.8.2 Rendimiento del algoritmo clasificador por forma con filtro - esquema Lateral.

A continuación se muestran los resultados arrojados por la matriz de confusión para el grupo 1 bajo esquema de iluminación Lateral.

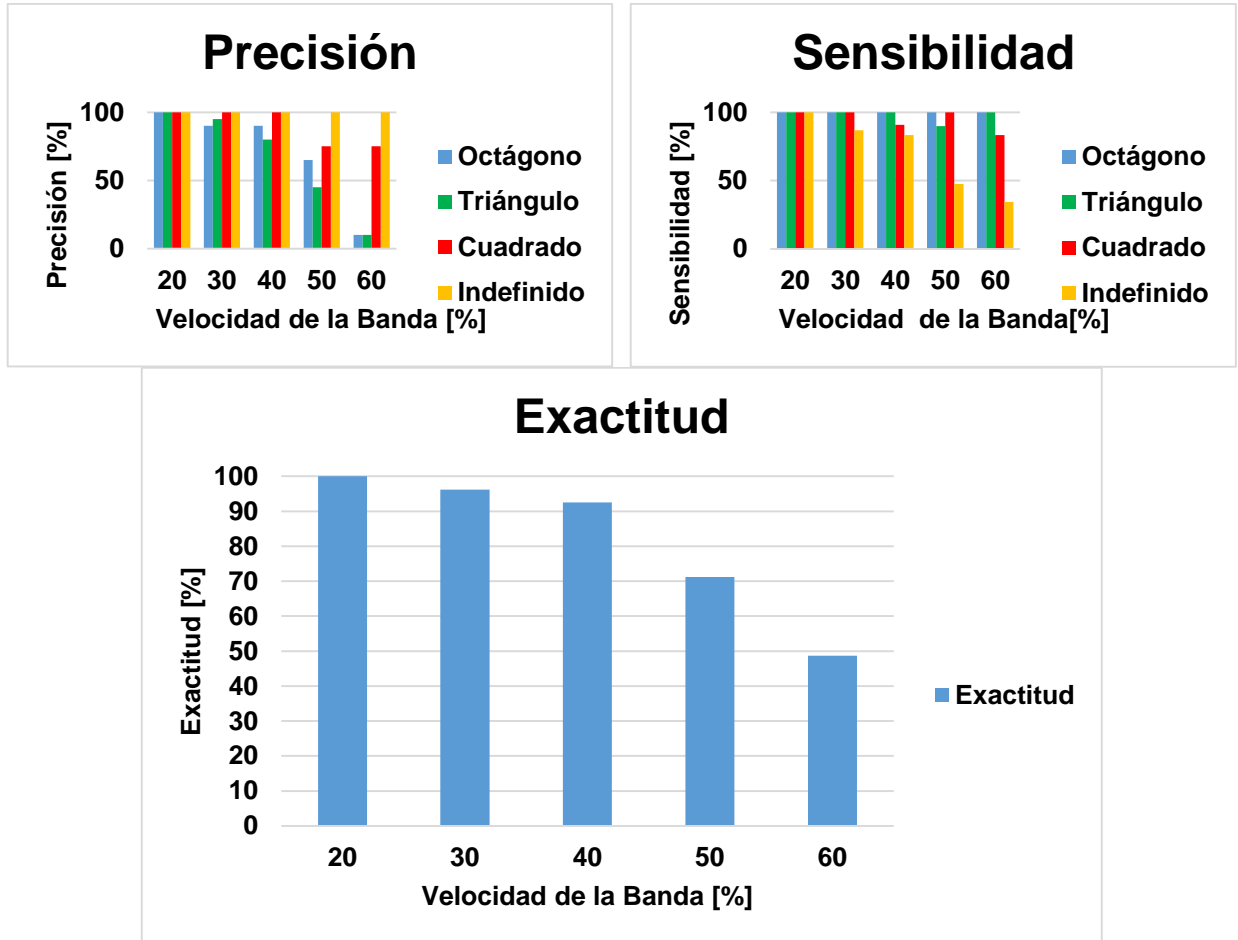


Figura. 88 Resultados de la Matriz de Confusión usando el algoritmo clasificador por color bajo esquema Lateral con filtro

Se observa que tuvo una notoria mejora en la exactitud como lo muestra la figura, la gráfica de precisión muestra valores positivos para el clasificador y la sensibilidad de cada clase se incrementa mostrando una eficiencia a la hora de clasificar objetos de la misma clase, bajo esta configuración presenta un mejor rendimiento ya que el filtro difumina la luz permitiendo una uniformidad de luz sobre la escena.

Conclusiones

Referencias

- [1] E. Alegre, G. Pajares, and A. de la Escalera, "Conceptos y Métodos en Visión por Computador", vol. 1, p. 12, 2016.
- [2] M. P. E. TINOCO, "Propuesta De Un Laboratorio Para Pruebas Fotométricas a Luminarios Led," p. 3 2013.
- [3] E. de la Fuente, "Vision Artificial Industrial Procesamiento de imágenes para inspección automática y robótica," cap 11,p 2 ,2009.
- [4] J. Luque and O. Es, "Espectro electromagnético y espectro radioeléctrico," Acta, vol. 1, p. 4, 2010
- [5] C. Platero, "Introducción a la Visión Artificial," *Dpto. Ekectrónica, Automática e Informática Ind.*, p. 14, 2009.
- [6] J. Serway, Raymont. Jewett, "*Física para ciencias y ingeniería con física moderna*", tomo 2, p. 982. 2009.
- [7] <https://www.fotonostra.com/fotografia/absorcion.htm>
- [8] <http://www.energea.com.bo/2017/12/16/distribucion-espectral/>
- [9] A. Conejo, "Luminotecnia. Dispositivos para el alumbrado incandescente y fluorescente.," p. 177, 2007.
- [10] ERCO, "Guía Luminotecnia ERCO" vol. 12, no. 2, p. 321, 2011.
- [11] ERCO, "Guía Luminotecnia ERCO" vol. 12, no. 2, p. 324, 2011.
- [12] A. Conejo, "Luminotecnia. Dispositivos para el alumbrado incandescente y fluorescente.," p. 178, 2007.
- [13] A. Conejo, "Luminotecnia. Dispositivos para el alumbrado incandescente y fluorescente.," p. 179, 2007.
- [14] B. A. F. ARAUZ, "Estudio de la luminotecnia aplicada a un taller electromecánico", p. 17 2013.
- [15] A. Conejo, "Luminotecnia. Dispositivos para el alumbrado incandescente y fluorescente.," p. 189, 2007.
- [16] B. A. F. ARAUZ, "Estudio de la luminotecnia aplicada a un taller electromecánico", p. 18 2013.
- [17] B. M. O. Donell, J. D. Sandoval, and F. Paukste, "Fuentes Luminosas," *Iluminacion Efic.*, p 21 2002.
- [18] A. Conejo, "Luminotecnia. Dispositivos para el alumbrado incandescente y fluorescente.," p. 190, 2007.
- [19] B. A. F. ARAUZ, "Estudio de la luminotecnia aplicada a un taller electromecánico", p. 39 2013.
- [20] E. de la Fuente, "Vision Artificial Industrial Procesamiento de imágenes para

- inspección automática y robótica,” cap 11,p 18 ,2009.
- [21] E. A. S. MALPARTIDA, “Sistema de visión artificial para el reconocimiento y manipulación de objetos utilizando un brazo robot.”, p25, 2003.
- [22] E. A. S. MALPARTIDA, “Sistema de visión artificial para el reconocimiento y manipulación de objetos utilizando un brazo robot.”, p24, 2003.
- [23] Aplicación práctica de la visión artificial en el control de procesos industriales Conocimientos básicos de visión artificial,” p. 11, 2012.
- [24] Aplicación práctica de la visión artificial en el control de procesos industriales Conocimientos básicos de visión artificial,” p. 13, 2012.
- [25] M. del C. R. Galloza, “Diseño del sistema de control y automatización para la recolección, selección y empaque de frutos orgánicos en el valle san lorenzo-tambogrande de la región de piura,” p. 51 2015.
- [26] Aplicación práctica de la visión artificial en el control de procesos industriales Conocimientos básicos de visión artificial,” p. 10, 2012.
- [27] L. D. E. La and R. Piura, “Diseño del sistema de control y automatización para la recolección, selección y empaque de frutos orgánicos en el valle san lorenzo-tambogrande de la región de piura,” p.50 2011.
- [28] Aplicación práctica de la visión artificial en el control de procesos industriales Conocimientos básicos de visión artificial,” p. 15, 2012.
- [29] E. De La Fuente, “Visión artificial industrial. Procesamiento de imágenes para inspección automática y robótica. Cap 10,” 2012.
- [30] Pérez Sandoval, María Fernanda. Velasco Delgado, Oscar Duvier, "Sistema de clasificación de piezas en una línea de producción empleando visión de máquina." Universidad del Cauca. 2011
- [31]. U. N. de Quilmes, “Aspectos de un Sistema de Visión Artificial Aspectos de un Sistema de Visión Artificial,” pp. 1–19, 2005.
- [32] J. I. H. Vega, “El Software Embebido y los Retos que Implica su Desarrollo,” *Concienc. Tecnológica*, no. 40, p. 42, 2010.
- [33] I. S. ENGINEERING, “MASTER DEGREE : Industrial Systems Engineering nivel,” pp. 1–19, 2011.
- [34] J. C. M. Urquiaga, “¿Por qué aprender Python?,” 2017.
- [35] G. D. C. Johanna, “Estudio sobre la viabilidad de desarrollar aplicaciones gráficas en sistemas embebidos,” 2014.
- [36] Recuero P. “Machine Learning a tu alcance: La matriz de confusión”, 2018