

Desarrollo de un módulo de pruebas de iluminación para la variación de condiciones ópticas en el área de trabajo facilitando el uso de un sistema de inspección para reconocimiento eficiente de patrones y anomalías en piezas

Nicolas Padilla Bastos

Trabajo de grado para optar el título de Ingeniero Mecatrónico

Director

Diana Carolina Martínez Reyes.

Magíster en Bioingeniería

Codirector

Deisy Carolina Páez Casas.

Ingeniera Electrónica

Universidad Santo Tomás, Bucaramanga

División De Ingenierías y Arquitectura

Facultad De Ingeniería Mecatrónica

2023

Dedicatoria

Dedicado con amor y gratitud a mis estimados padres, por estar pendientes de todo lo que necesité durante la carrera, por siempre confiar en mí y en mis capacidades, por darme este regalo y darme la oportunidad de realizar mis estudios a pesar de todo lo que pudiera pasar a mi querido hermano, quien ha creído en mi desde el principio y me ha dado aliento en los momentos difíciles y ha celebrado conmigo los de triunfo; a mi respetado tío, quien ha sido una ayuda muy grande durante toda este proceso estando pendiente y dándome todo su apoyo y a mis queridos amigos de carrera, con quienes compartí todo este viaje, personas que desde un principio me impulsaron a ser mejor persona y a desarrollar todas mis capacidades, les agradezco poder compartir todo este tiempo de una manera excepcional, puedo decir que conocerlos fue de las mejores cosas de todo este proceso. Les estaré siempre agradecido a todas estas personas quienes me han acompañado desde un inicio en esta etapa y con quien tengo la fortuna de poder culminar la misma.

Desde el comienzo de esta etapa de aprendizaje, su apoyo constante ha sido pieza vital. Con notables sacrificios y una dedicación ejemplar, han allanado el sendero que hoy culmina en este logro. Les agradezco con el corazón todo lo que han hecho por mí, han sido mi mayor fortaleza en los buenos momentos y también en los malos. Este éxito no es únicamente mío. Este logro es el fruto de su amor y aliento constantes.

Contenido

Introducción	10
1. Desarrollo de un módulo de pruebas de iluminación para la variación de condiciones ópticas en el área de trabajo	11
1.1 Planteamiento del problema.....	11
1.2 Justificación.....	12
1.3 Objetivos	13
1.3.1 Objetivo general.....	13
1.3.2 Objetivos específicos.....	13
2. Reseña de la empresa.....	14
2.1 Nombre.....	14
2.2 Misión.....	14
2.3 Visión	15
3. Marco referencial.....	15
3.1 Factores de relevancia para el reconocimiento de patrones	15
3.1.1 Novedades comúnmente encontradas en sistemas de visión artificial.....	16
3.1.2 Técnicas de Iluminación de uso común en sistemas de visión artificial	18
3.2 Tipos de luz y elección para módulo de iluminación.....	22
4. Plan de trabajo	25
4.1 Auto inmersión software y manejo del sensor de visión.....	27
4.2 Diseño del circuito electrónico del módulo de iluminación.....	29
4.2.1 Elementos electrónicos presentes en el módulo de iluminación.....	31
4.2.2 Diseño de PCB para control del módulo de iluminación.....	37

4.3 Interfaz de control del módulo	39
4.4 Diseño mecánico del módulo	42
4.5 Diseño final del módulo de iluminación	48
5. Resultados.....	50
5.1 Implementación de rutina con el sensor de visión para reconocimiento de lote y fecha	50
5.2 Desarrollo de circuito electrónico para la variación en condiciones de iluminación.....	51
5.3 Diseño CAD de la estructura mecánica del módulo de iluminación.....	51
6. Recomendaciones	52
7. Conclusiones.....	52
Referencias.....	54

Lista de tablas

Tabla 1. <i>Ventajas y desventajas tipo de iluminación</i>	22
Tabla 2. <i>Plan de trabajo dispuesto en semanas para el desarrollo del proyecto</i>	26

Lista de figuras

Figura 1. <i>Novedades encontradas en sistemas de visión artificial</i>	16
Figura 2. <i>Iluminación adecuada e inadecuada de un código de barras</i>	16
Figura 3. <i>Proyección de sombras en una lata</i>	17
Figura 4. <i>Iluminación trasera o backlight</i>	18
Figura 5. <i>Iluminación difusa</i>	19
Figura 6. <i>Iluminación de campo brillante o direccional</i>	20
Figura 7. <i>Iluminación de campo oscuro</i>	20
Figura 8. <i>Incidencia del ángulo y técnica de iluminación en objetos</i>	21
Figura 9. <i>Comparativa de distintos tipos de luz</i>	23
Figura 10. <i>Lámparas fluorescentes</i>	23
Figura 11. <i>Lámparas de vapor de mercurio</i>	24
Figura 12. <i>Lámparas led</i>	25
Figura 13. <i>Detección de lote y fecha en botellas</i>	27
Figura 14. <i>Rechazo por ausencia de lote y fecha</i>	28
Figura 15. <i>Diagrama general del circuito del módulo de iluminación</i>	30
Figura 16. <i>Fuente de voltaje 15VDC – 23ª</i>	31
Figura 17. <i>Convertidor reductor buck DC-DC (9A)</i>	31
Figura 18. <i>Convertidor DC-DC LM2596</i>	32
Figura 19. <i>Regulador LM1117T (3.3V)</i>	32
Figura 20. <i>Convertidor de señal 4-20mA a 3.3V</i>	33
Figura 21. <i>LCD 4×20 alfanumérica con I2C</i>	34
Figura 22. <i>Joystick compatible con ESP32</i>	34

Figura 23. <i>Sistema embebido ESP 32</i>	35
Figura 24. <i>Interruptor Basculante Redondo KCD1 Verde</i>	35
Figura 25. <i>Interruptor de disparo módulo de accionamiento PWM MOSFET</i>	36
Figura 26. <i>Borneras para PCB</i>	36
Figura 27. <i>Terminal GPIO Placa de expansión para ESP32</i>	37
Figura 28. <i>Circuito electrónico desarrollado en easyeda</i>	38
Figura 29. <i>PCB del circuito de control del módulo</i>	39
Figura 30. <i>Interfaz de control del módulo</i>	41
Figura 31. <i>Visualización señal de control y variación de intensidad y color con leds RGB</i>	42
Figura 32. <i>Versión previa del módulo</i>	43
Figura 33. <i>Diseño del módulo con variación de alturas</i>	44
Figura 34. <i>Vista isométrica del módulo con componentes internos de iluminación</i>	45
Figura 35. <i>Soporte para iluminación Backlight</i>	46
Figura 36. <i>Soporte para sensor de visión</i>	46
Figura 37. <i>Soporte variación de fondos</i>	47
Figura 38. <i>Soportes para implementación de técnica de iluminación difusa</i>	47
Figura 39. <i>Vista isométrica del diseño final del módulo de iluminación</i>	49
Figura 40. <i>Vista frontal del diseño final del módulo de iluminación</i>	50

Resumen

El propósito de este informe es documentar y resaltar el periodo de prácticas empresariales llevado a cabo en la compañía RAMBAL S.A.S BIC para obtener el título de "Ingeniero Mecatrónico". El proyecto se enfoca en la optimización del proceso de inspección de piezas y productos con diferentes morfologías, dimensiones y formas, así como también la prueba experimental de un prototipo inicial con aras de desarrollar un producto más robusto para ofrecer al mercado en el futuro. Para lograr esto, se ha desarrollado un módulo de iluminación que permite la manipulación de las condiciones ópticas en un entorno libre de interferencias lumínicas, garantizando su adaptabilidad a diversos tipos de productos y permitiendo así el reconocimiento de características específicas.

El núcleo de este desarrollo radica en la creación de un prototipo que permite la variación de la intensidad de la luz, el color y las técnicas de iluminación, integrándolo de manera sinérgica con el sensor de visión utilizado en la empresa RAMBAL S.A.S BIC.

Palabras clave: Técnicas de Iluminación, Sensores de Visión, Inspección de Objetos.

Abstract

The purpose of this report is to document and highlight the period of business internships carried out at the company RAMBAL S.A.S BIC to obtain the title of "Mechatronics Engineer." The project focuses on optimizing the inspection process of parts and products with different morphologies, dimensions, and shapes, as well as the experimental testing of an initial prototype with the aim of developing a more robust product to offer to the market in the future. To achieve this, a lighting module has been developed that allows the manipulation of optical conditions in an environment free from light interference, ensuring its adaptability to various types of products and thus enabling the recognition of specific features.

The core of this development lies in creating a prototype that allows the variation of light intensity, color, and lighting techniques, integrating it synergistically with the vision sensor used in the company RAMBAL S.A.S BIC.

Keywords: Lighting Techniques, Vision Sensors, Object Inspection

Introducción

RAMBAL S.A.S BIC es una empresa que ha destacado en la industria al ofrecer soluciones integrales en el desarrollo y producción de dosificadores plásticos. Su compromiso con la calidad y seguridad de los productos ha sido evidente a lo largo de su historia. Sin embargo, como parte de su visión hacia el futuro, RAMBAL se encuentra ante dos desafíos cruciales.

Por un lado, ante la creciente necesidad en el sector industrial de clasificar y verificar la calidad de productos de manera precisa y eficiente, la empresa ha decidido adentrarse en el diseño de máquinas especializadas para entornos industriales, con un enfoque en sistemas de visión artificial para la inspección de piezas.

Por otro lado, RAMBAL ya cuenta con sistemas de visión implementados en su proceso de producción. Aunque estos sistemas cumplen su función, enfrentan algunos problemas en la detección, problemas relacionados con el inadecuado uso del sensor de visión y una mala adecuación de la luz ambiente en el entorno de inspección.

Debido a lo anterior, el presente documento se enfoca en el desarrollo de un prototipo de módulo que permita variar las condiciones en color, intensidad y técnicas de iluminación en un entorno cerrado y aislado de la luz ambiente.

1. Desarrollo de un módulo de pruebas de iluminación para la variación de condiciones ópticas en el área de trabajo

1.1 Planteamiento del problema

RAMBAL S.A.S BIC es una empresa que se dedica al desarrollo, producción y comercialización de dosificadores plásticos como producto principal, sin embargo, se ha visto una oportunidad de generar ingresos de manera externa al producto principal de la compañía, profundizando un poco en darle soluciones integrales a problemáticas presentes en diferentes empresas del sector industrial además de poder mejorar el proceso de inspección de calidad de los productos de la compañía.

Teniendo lo anterior en cuenta surge una nueva área dentro de la empresa, con el objetivo de diseñar e implementar máquinas especializadas para entornos industriales con el fin de ofrecerlas al mercado. Iniciando con este nuevo proyecto, se decidió profundizar y enfocar esta iniciativa en los sistemas de visión artificial enfocados a la inspección de piezas, esto viendo la necesidad que tienen múltiples empresas en el sector industrial de poder clasificar y verificar la calidad de sus productos de una manera rápida y precisa.

Además de esto, propiamente la compañía tiene sistemas de visión implementados en el proceso de producción con el objetivo de mantener un criterio de calidad en los productos. Actualmente se tiene en las máquinas una programación básica del sensor de visión utilizado para realizar la tarea de inspeccionar si una pieza debe ser rechazada o no, programación que cumple su función, pero tiene opción de mejora. pero se tienen algunos inconvenientes relacionados con la detección de falsos rechazos por el sensor de visión, puesto que actualmente, aproximadamente un 90% de las piezas inspeccionadas por lote son aprobadas (datos obtenidos del software que

controla el sensor de visión el cuál provee información relevante del proceso de inspección), lo que quiere decir que 1 de cada 10 piezas en promedio está siendo rechazada, lo cual supone un problema cuando al ser verificadas de manera detallada por el departamento de calidad de la empresa, se encuentra que cierta cantidad de estas piezas rechazadas, realmente son falsos rechazos originados por un mal aprovechamiento de los recursos del sensor de visión, así como una inadecuada definición de las características críticas a inspeccionar, también influye la inadecuada elección de color, intensidad y técnica de iluminación utilizadas para un determinado producto.

Ante estas dos situaciones surge la idea de desarrollar un prototipo de módulo de iluminación que permita variar las condiciones de iluminación en un entorno aislado de la luz ambiente, y que no solo posibilite estudiar el comportamiento del sistema de inspección implementado en la empresa aplicando diferentes configuraciones de luz con el fin de generar una posible mejora en el proceso de inspección, sino también poder validar con el desarrollo del prototipo, la utilidad que tiene el dispositivo de manera práctica en la inspección objetos con diferentes morfologías y colores, en aras de lanzar un producto completo al mercado en el futuro en el campo de la inspección. Considerando esto, surge la pregunta:

¿Cómo variar las condiciones de iluminación en el ambiente para el proceso de inspección y reconocimiento de piezas de producción?

1.2 Justificación

Ante la problemática presente el desarrollo de este proyecto se centra en la versatilidad y adaptabilidad para el reconocimiento de patrones y características en diferentes objetos a conveniencia propia facilitando la inspección variando la iluminación en el entorno de visión.

Dicho esto, se incluirá en el módulo distintas configuraciones posibles y ajustables a la necesidad del proceso, y que permita realizar variaciones en la iluminación de la zona de estudio.

La importancia de este módulo es que permitirá de manera experimental, comprobar si con unas determinadas condiciones de iluminación es posible mejorar el proceso de inspección actual en la empresa y también posibilitará establecer un prototipo inicial de una máquina enfocada a la inspección de objetos, con el fin de comprobar su funcionamiento real en aras de desarrollar un dispositivo robusto para ofrecer al sector industrial.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Desarrollar un módulo de pruebas de iluminación que permita realizar variaciones en las condiciones de iluminación, ángulo de incidencia y filtrado de luz al capturar fotografías por medio de una cámara, con el fin de identificar patrones y anomalías en piezas y mejorar la inspección de estas mediante visión artificial.

1.3.2 Objetivos específicos

Desarrollar la estructura mecánica de un módulo de pruebas de iluminación que permita la variación en condiciones ópticas dentro de un ambiente, para resaltar el contraste de características de interés para facilitar el proceso de inspección.

Implementar un sistema electrónico que, mediante una interfaz en un sistema embebido, permita gestionar y ajustar las condiciones de iluminación del módulo.

Integrar un sistema de visión artificial que permita el reconocimiento de patrones y anomalías físicas para la inspección eficiente de piezas de producción.

2. Reseña de la empresa

2.1 Nombre

RAMBAL S.A.S BIC.

Rambal SAS, soluciones de empaques sostenibles. Rambal SAS BIC fue constituida el 9 de octubre de 1974 en la ciudad de Bogotá. Posteriormente fue trasladada a Piedecuesta en el año 1976. En el año 1994, debido al incremento de la demanda y al auge que presentó la empresa, sus instalaciones se trasladan al Parque Industrial de Bucaramanga. Hoy por hoy Rambal SAS BIC se encuentra entre las 500 empresas generadoras de desarrollo y responsabilidad social en Santander. El propósito de Rambal es crecer en familia generando confianza y sostenibilidad [1].

2.2 Misión

Desarrollamos soluciones plásticas especializadas de acuerdo con las expectativas y tendencias globales, soportadas en la mejora continua y en una cultura de responsabilidad social empresarial, contribuyendo así a la sostenibilidad de la compañía y de nuestros grupos de interés [1].

2.3 Visión

Consolidarnos como una organización confiable e innovadora, comprometidos en la construcción de valor mediante el desarrollo de soluciones plásticas especializadas y sostenibles alineadas con nuevas tendencias para nuestra sociedad [1].

3. Marco referencial

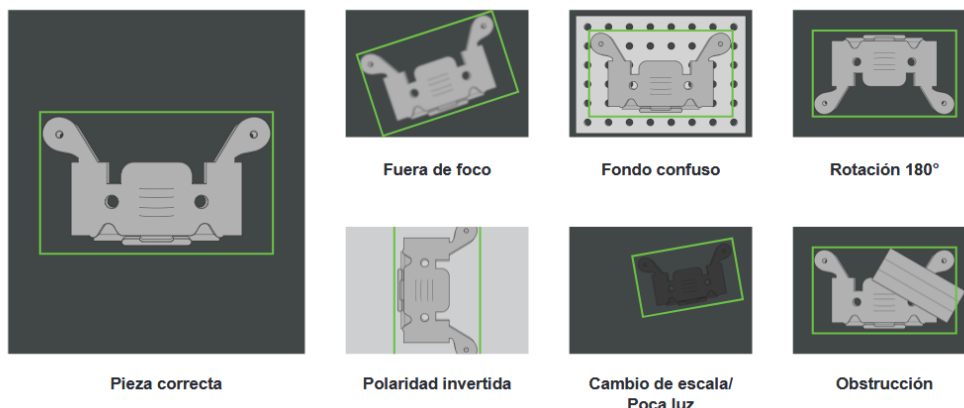
3.1 Factores de relevancia para el reconocimiento de patrones

A la hora de ajustar y adecuar un ambiente óptimo para un reconocimiento mediante visión artificial es de importancia tener en cuenta diversos factores tales como la iluminación, tipo de luz (longitud de onda), morfología del objeto o características que se desean inspeccionar, filtros, entre otros:

- Entorno de inspección: Adecuar y limitar factores externos que puedan intervenir en el reconocimiento y al mismo tiempo simplificar la elección de soluciones de iluminación que sean eficientes para la aplicación deseada [2].
- Interacción Muestra-Luz: Comprender y experimentar cómo interactúa el objeto o muestra con la luz es de vital importancia para realzar las características de interés e ignorar las que no. Es necesario documentar y comprender factores tales como el tipo de iluminación, distancia entre la cámara y la muestra, intensidad de luz y ángulo de incidencia, y los patrones más notables del objeto [2].
- Tipos de Iluminación: Se debe tener en cuenta los tipos de iluminación que se tienen a disposición para desarrollar una solución lumínica eficiente y que se adecue a la morfología de la muestra. [2].

3.1.1 Novedades comúnmente encontradas en sistemas de visión artificial

Figura 1. Novedades encontradas en sistemas de visión artificial



Nota. En la figura1 se muestran situaciones que se presentan a la hora de inspeccionar objetos con visión artificial.

- Poca o insuficiente iluminación: Este factor puede generar una mala calidad en la imagen lo que a su vez dificulta la inspección y adquisición de características de relevancia. Para evitar este inconveniente es importante comprender y observar de manera práctica como interactúa el objeto (según su morfología) con la luz, facilitando de esta manera la elección de una intensidad de luz adecuada [2,3].
- Sobreexposición o deslumbramiento: Ocurre cuando la intensidad de iluminación es demasiado alta o está siendo proyectada en la muestra en una posición incorrecta, lo que dificulta el realce de características de interés para su detección. Para evitar esto es importante utilizar una técnica de iluminación, ángulo e intensidad que se adecuen a las necesidades de detección y al objeto tales como difusa, direccional o trasera [2,3].

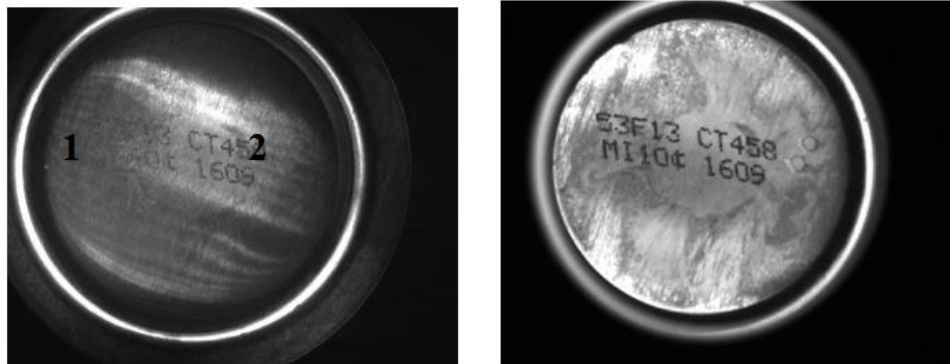
Figura 2. Iluminación adecuada e inadecuada de un código de barras



Nota. En la figura 2 se muestra la implementación de una técnica de iluminación apropiada en la imagen izquierda, y en la imagen derecha una que no es adecuada para la lectura del código de barras desde la vista, produciendo un deslumbramiento.

- Sombras: Las sombras se pueden presentar por un ángulo e intensidad incorrectos proyectados hacia la muestra, lo cual oculta patrones de interés. Para evitar este inconveniente es recomendable utilizar diversas fuentes de luz desde distintos ángulos para minimizar las sombras y garantizar una iluminación uniforme.

Figura 3. *Proyección de sombras en una lata*



Nota. En la figura 3 se puede observar como la mala elección de las condiciones de iluminación puede producir sombras o contrastar de mejor manera los patrones que se desean inspeccionar.

- Iluminación inconsistente: Ocurre cuando se producen variaciones en la iluminación, textura o el color de la muestra. Para evitar este problema es importante aislar o limitar la variación en la luz ambiente y tenerlo en cuenta en el entorno de inspección, también usar

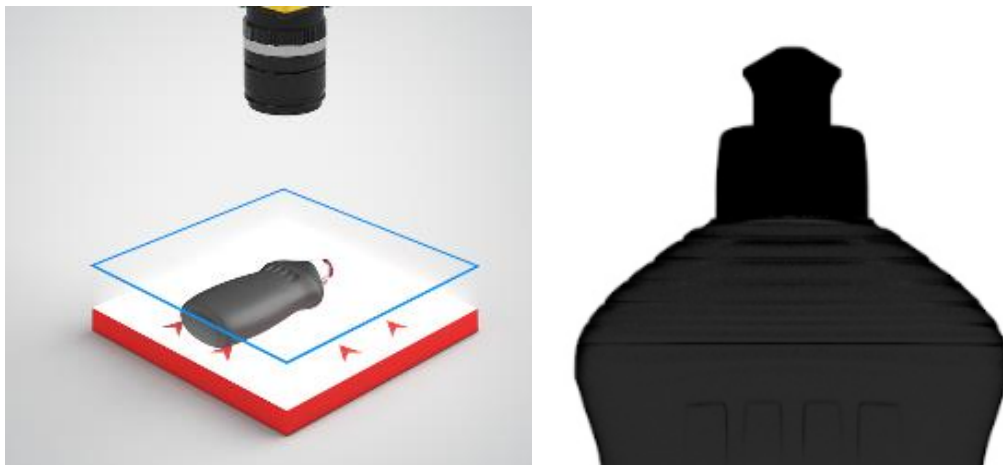
una técnica de iluminación adecuada para la muestra en estudio, con el fin de mejorar el contraste y resaltar patrones de interés [2,3].

3.1.2 Técnicas de Iluminación de uso común en sistemas de visión artificial

Existen diversas técnicas de iluminación de uso común cuando se implementa un sistema de visión artificial, estas tienen sus ventajas y desventajas dependiendo de diversos factores.

- Iluminación trasera (Backlight): Consiste en iluminar la muestra desde atrás, creando un efecto de silueta. Su uso generalmente es para la detección de bordes, contornos o defectos en superficies transparentes. Pueden presentar inconvenientes con el deslumbramiento [4,5].

Figura 4. Iluminación trasera o backlight

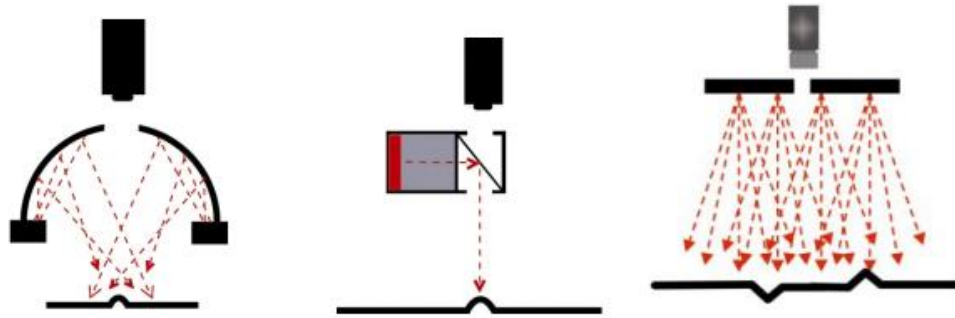


Nota. En la figura 4 se observa la silueta captada por la cámara cuando se implementa la técnica de iluminación backlight.

- Iluminación difusa: Proporciona una iluminación uniforme en toda la superficie de la muestra. Es usada para inspecciones generales y permite minimizar sombras y reflejos. Son

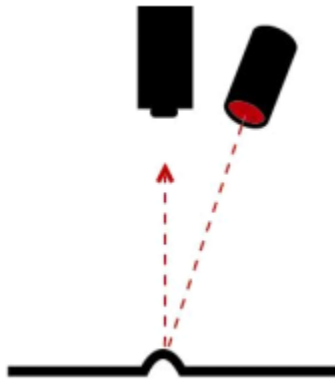
bastante efectivos en objetos curvos y reflectantes como latas o también para identificar impresiones [4,5].

Figura 5. *Iluminación difusa*



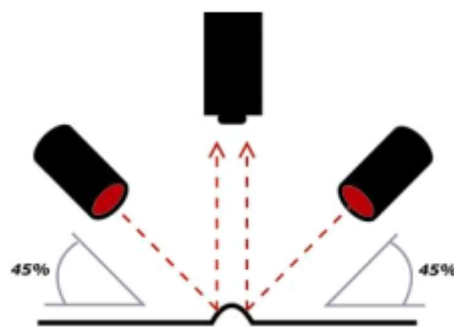
Nota. En la figura 5 se observan algunos tipos de aplicación de técnica difusa y como se refleja la luz sobre un área determinada dependiendo del tipo.

- Iluminación de campo brillante (direccional): La iluminación de campo brillante, también conocida como iluminación parcial de campo brillante o iluminación direccional, implica iluminar la muestra desde un ángulo específico. Se utiliza para mejorar el contraste y resaltar características específicas de interés, muy útil en superficies con poco reflejo (papel, tela...etc.) (a veces puede oscurecer algunas características del objeto de interés. Sencilla de implementar [5,6].

Figura 6. *Iluminación de campo brillante o direccional*

Nota. En la figura 6 se observa la implementación de la técnica de iluminación direccional.

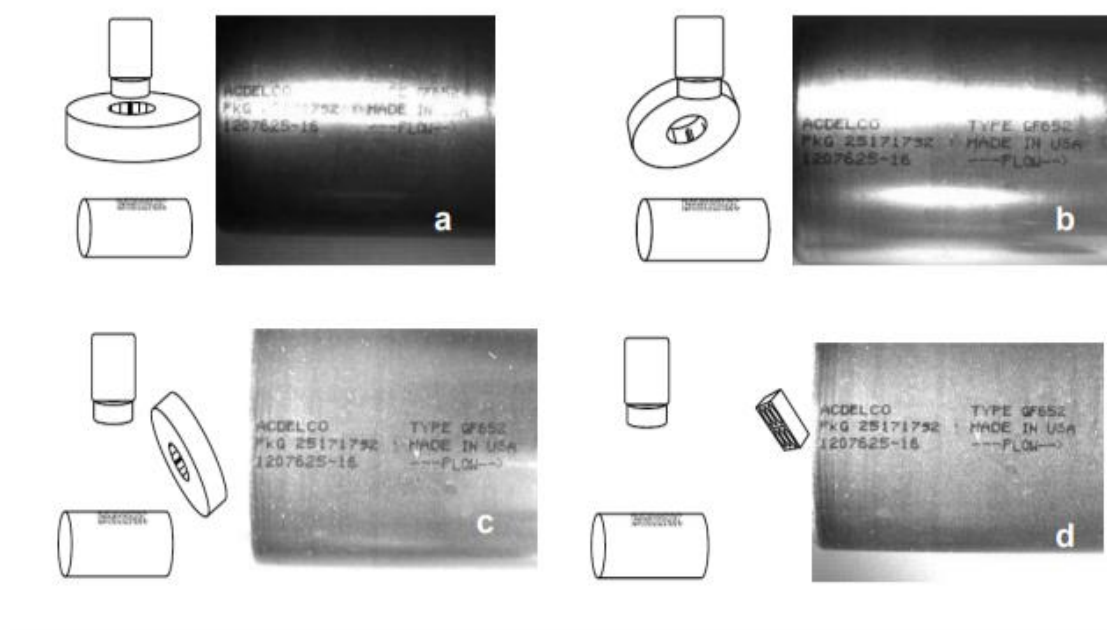
- Iluminación de campo oscuro: La iluminación de campo oscuro implica iluminar la muestra desde ángulos oblicuos, de manera que solo se capture la luz dispersada o reflejada por la cámara. Se utiliza comúnmente para detectar defectos en la superficie o arañazos en muestras reflectantes o brillantes [5,6].

Figura 7. *Iluminación de campo oscuro*

Nota. En la figura 7 se observa la implementación de la técnica de iluminación de campo oscuro.

Dependiendo de la necesidad del producto y lo que se desee inspeccionar y resaltar, unos métodos y técnicas tendrán más ventajas que otros, en la figura 8, se puede observar la detección de una impresión sobre un objeto cilíndrico en el cual se puede observar que con una iluminación coaxial (a), se genera una sobreexposición o un brillo sobresaliente debido a la reflexión de la luz en la cámara, en el caso (b) se observa una ligera mejora ante este inconveniente simplemente modificando la geometría con la que se refleja la luz en la muestra, y por último en las imágenes (c) y (d) se observa un buen contraste debido al ángulo de incidencia de la luz y a la intensidad de iluminación que se refleja en el objeto [2].

Figura 8. Incidencia del ángulo y técnica de iluminación en objetos



Nota. En la figura 8 se puede observar la captura de la imagen de una cámara según la técnica de iluminación que se le aplica.

Tabla 1. *Ventajas y desventajas tipo de iluminación*

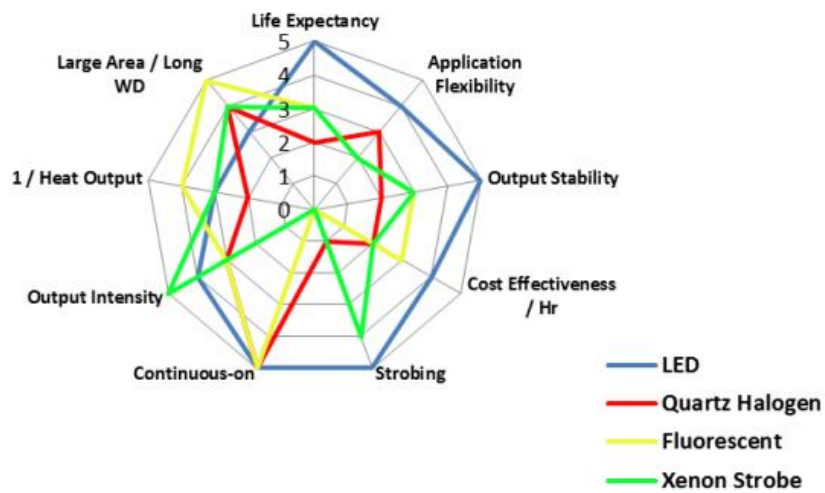
Tipos de Iluminación	Ventajas	Desventajas
Iluminación Posterior (Backlight)	Fácil de implementar, bajo costo, crea silueta de la pieza, imágenes de muy alto contraste.	Se debe tener espacio detrás del objeto.
Iluminación Frontal	Fácil de implementar, revela algunos detalles superficiales.	Puede crear sombras indeseadas, la iluminación no es uniforme.
Iluminación Lateral	Fácil de implementar, revela algunos detalles superficiales.	Puede crear sombras indeseadas, la iluminación no es uniforme.
Iluminación por Campo Oscuro	Ilumina defectos superficiales, provee imágenes de alto contraste	No ilumina de forma plana, difumina las superficies
Iluminación Coaxial	Elimina sombras, iluminación uniforme en todo el campo de visión.	Difícil de implementar, reflexión intensa en superficies brillantes.
Iluminación Difusa	Elimina sombras, elimina el deslumbramiento.	Debe rodear el objeto, el iluminador es grande, puede ser costosa.

Sierra Álvarez, S. (2012). Sistema de medición de objetos basado en visión artificial [5,6].

Nota. En la tabla 1 se pueden observar las ventajas y desventajas que se tienen según la técnica de iluminación a utilizada [5,6].

3.2 Tipos de luz y elección para módulo de iluminación

La elección del tipo de luz en la iluminación de un sistema de visión artificial es de suma importancia ya que facilita mucho la correcta inspección y detección de características, disminución de costos, flexibilidad en cuanto a uso, iluminación en áreas mayores o menores, estabilidad en la salida de luz, entre otros.

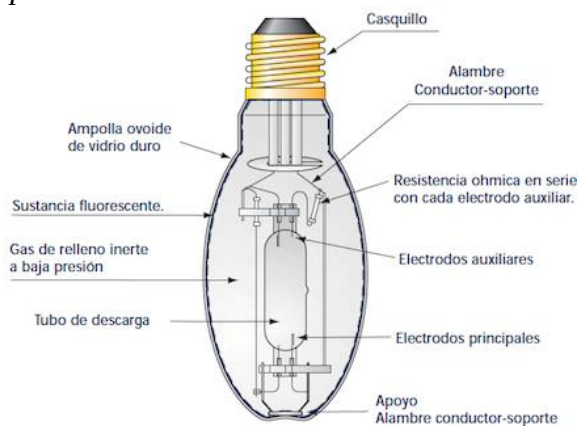
Figura 9. *Comparativa de distintos tipos de luz*

- Lámparas fluorescentes: Funcionan generando una película fluorescente que cubre el interior del tubo de vidrio producida por radiación ultravioleta. Su eficiencia energética es mayor a las incandescentes y también su vida útil, sin embargo, no es flexible en cuanto a tamaño y disposición dentro del módulo, además de presentar parpadeos inminentes que el sensor de visión artificial puede captar y obstaculizar una inspección adecuada [7].

Figura 10. *Lámparas fluorescentes*

- Lámparas de vapor de mercurio: Se constituyen por un vidrio de cuarzo en el cual se produce una descarga eléctrica en vapor de mercurio con una presión alta, iniciando el proceso por un circuito auxiliar que permite la emisión de luz, sin embargo, presentan un transitorio en su funcionamiento el cuál tarda la lámpara para llegar a un estado estable de funcionamiento., por esta razón tampoco son una elección viable para nuestro proyecto debido a las necesidades de variación en intensidad de luz y rapidez de respuesta de las fuentes de iluminación además de tener una capacidad limitada para reproducir colores [7].

Figura 11. Lámparas de vapor de mercurio



- LEDS: Es la más versátil de todas utilizando diodos como fuente principal de luz, la cual genera un flujo luminoso cuando conduce corriente eléctrica por el elemento. Tiene la ventaja de tener una respuesta muy rápida al encendido y al apagado, con una vida útil bastante extensa, tamaño reducido y apto para muchas aplicaciones, ahorro energético, entre otros [7].

Figura 12. Lámparas led

- En la mayoría de los sistemas de visión, así como para el desarrollo de este módulo de iluminación, se suele elegir luz LED debido a su gran flexibilidad en aplicación de diferentes tipos y a su larga vida útil, costo efectivo hora, siendo la iluminación en área la mayor desventaja que tiene, sin embargo, para nuestra aplicación que no requiere un área demasiado grande, resulta óptima. Además, tener la facilidad de poder elegir entre un amplio margen de longitud de onda permite aumentar el contraste en muchas situaciones a la hora de identificar piezas con diferentes colores y morfologías [7].

Nota. En las anteriores figuras se pudo observar algunos de los distintos tipos de luz implementados en la visión artificial

4. Plan de trabajo

Debido a la naturaleza del problema que se desea solucionar, y considerando la necesidad de implementar una estructura mecánica, sistema electrónico de control y desarrollar una tarea en el software de control del sensor de visión para el reconocimiento de patrones, los tres objetivos establecidos se desarrollaran de manera simultánea.

Al inicio de la práctica se comenzó por realizar una auto inmersión e investigación respectiva del sensor de visión para conocer su funcionamiento, rapidez, conexión e incidencia de

la luz en el reconocimiento de patrones y características y como estos factores influyen en un óptimo uso de dicho sensor.

Cabe recalcar que estos criterios de calidad y de patrones de interés para reconocer que una pieza está en óptimas condiciones o no, se brindan por el departamento de calidad que constantemente están haciendo diferentes pruebas para verificar la buena fabricación del producto.

Tabla 2. *Plan de trabajo dispuesto en semanas para el desarrollo del proyecto*

Actividad	Duración
Inducción y reconocimiento de la problemática a resolver, así como los elementos disponibles para el desarrollo del proyecto.	1 semana
Auto inmersión en el sensor de visión, pruebas de funcionamiento.	1 semanas
Desarrollar una solución para detectar marca de lote y fecha en tapas del producto	1 semana
Revisión y apropiación de factores presentes en la implementación de un sistema de visión artificial tales como tipos de luz e iluminarias, incidencia de la luz ambiente, filtros, así como una revisión de precios y proveedores tentativos para el desarrollo del proyecto.	3 semanas
Toma de medidas y prototipo inicial del módulo de pruebas teniendo en cuenta los conceptos adquiridos y facilidades para la obtención de características.	3 semanas
Modificación y arreglo de errores en el prototipo inicial, realizar prototipo más detallado con puesta en punto y pruebas de funcionamiento	4 semanas

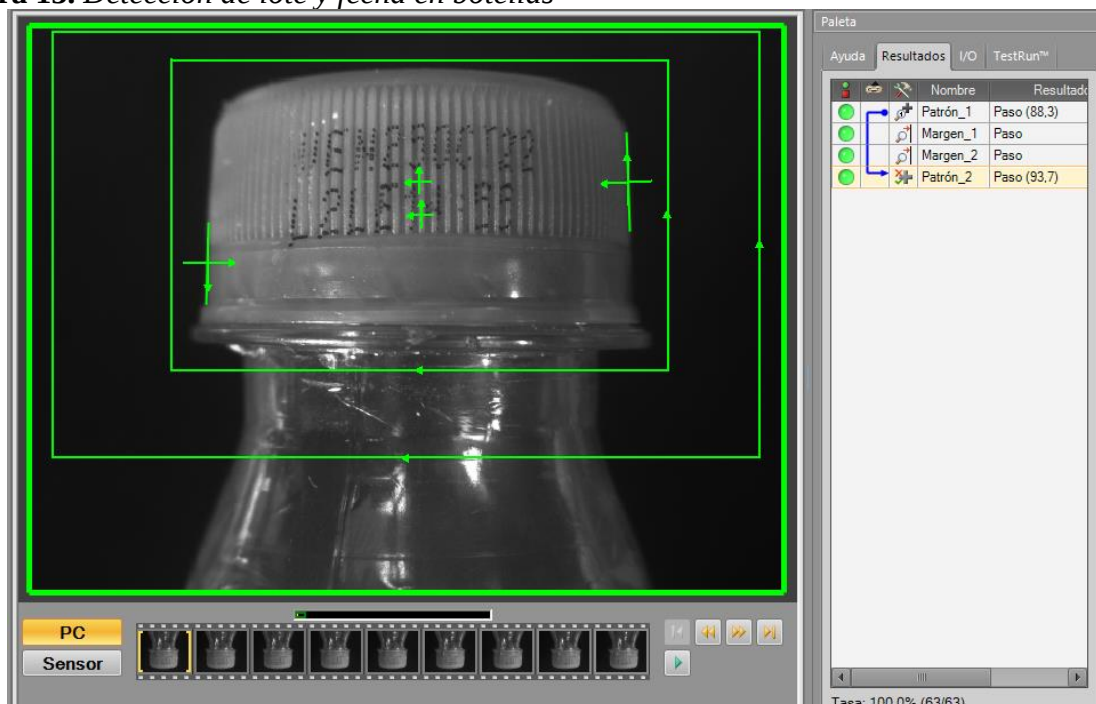
Diseño final con corrección de errores y espera de instrucciones por parte de la empresa para su posterior construcción e implementación.

4 semanas

Nota. En la tabla 2 se muestra el plan de trabajo general dispuesto en semanas que se siguió para el desarrollo del proyecto

4.1 Auto inmersión software y manejo del sensor de visión

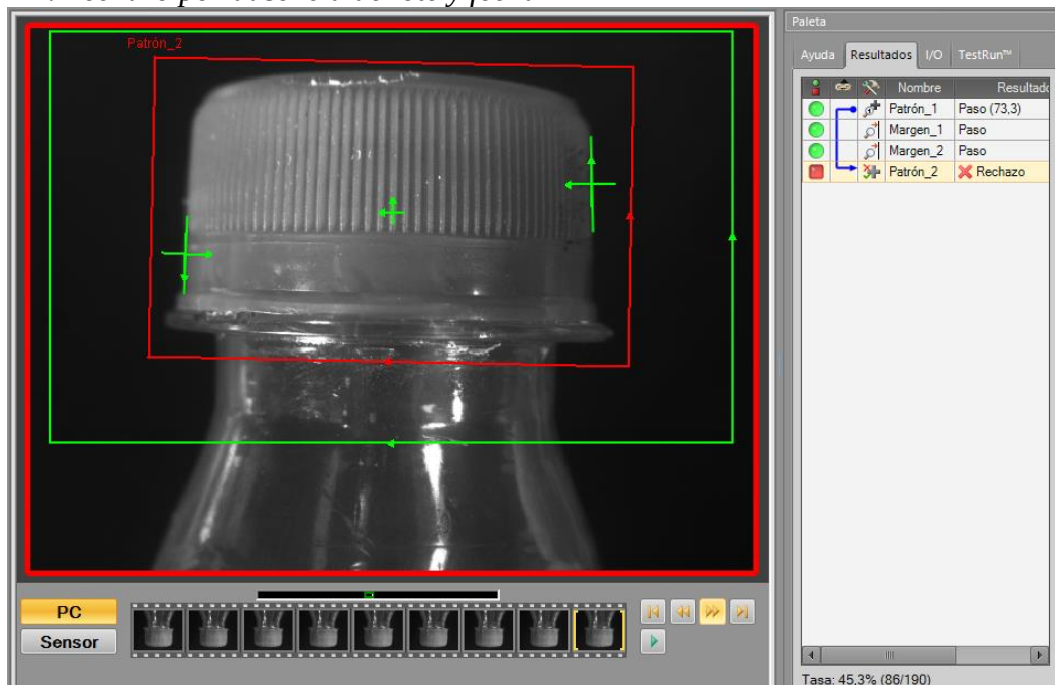
Figura 13. *Detección de lote y fecha en botellas*



Nota. La figura 13 se muestra una rutina programada en el sensor de visión que detecta la presencia de lote y fecha en botellas.

Se puede observar el comportamiento de una rutina parametrizada para identificar presencia de lote y fecha en tapas de botellas de bebidas, utilizando reconocimiento de patrones en un área de interés y también de márgenes, definiendo un margen de semejanza con una pieza de referencia.

Figura 14. Rechazo por ausencia de lote y fecha



Nota. En la figura 14, rutina para detección de lote y fecha clasifica como defectuosa la tapa al no detectar presencia de caracteres.

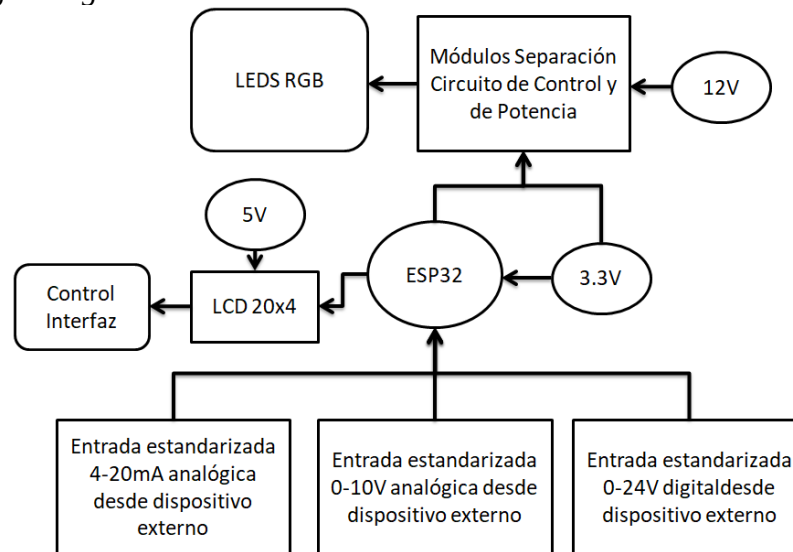
En este caso se observa como el sensor de visión si bien detecta la botella, posteriormente la rechaza, no la detecta como pieza en buenas condiciones porque no reconoció presencia de fecha y lote en la misma.

Revisando el funcionamiento de la interfaz y el reconocimiento de patrones que realiza el sensor de visión se tuvo la problemática al reconocer bordes y características de interés debido a la incidencia de la luz ambiente en el material ya que la técnica de iluminación implementada no era la adecuada para la morfología de una tapa de botella, ya que, al ser iluminada únicamente con

el flash propio del sensor, se genera un deslumbramiento por la reflexión de gran cantidad de luz hacia la cámara por el ángulo de incidencia de la iluminación, en las figuras 13 y 14 se implementó una iluminación difusa, iluminando la totalidad del área visualizada por la cámara, lo cual permitió un mejor reconocimiento de los patrones deseados y previamente parametrizados en el sensor de visión.

4.2 Diseño del circuito electrónico del módulo de iluminación

Teniendo en cuenta que se requiere tener un control electrónico de la iluminación, variación de intensidad y color, se hace relevante el uso de un sistema embebido que permita utilizar diferentes configuraciones lumínicas dentro del módulo y que accione la señal de control para la variación de intensidad, en este caso mediante las salidas de PWM de la esp32 el cuál es el sistema embebido elegido debido a la alta frecuencia que permite utilizar en sus pines de PWM, ya que debido a la rapidez de captura de imagen de la cámara si la frecuencia del PWM es muy baja, el sensor de visión captura la fotografía en el ciclo bajo de la modulación. Además de esto se habilitarán 3 pines de la esp32 como entradas (2 entradas analógicas y 1 digital) estandarizadas industrialmente de (AI 4-20mA, AI 0-10V, DI 0-24V), se linealizarán estos valores para que nuestro sistema embebido no sufra ningún daño por los niveles de tensión de trabajo del controlador y permita leer sin problemas dichas señales, Además el módulo se controlará por medio de una interfaz visualizada en un LCD, y manejo dentro de la misma mediante un joystick.

Figura 15. Diagrama general del circuito del módulo de iluminación

Nota. En la figura 15 se muestra el diagrama de flujo general del dispositivo.

El sistema embebido ESP32, se encargará de controlar el funcionamiento del módulo permitiendo variar las condiciones y técnicas de iluminación desde una interfaz parametrizada por medio de un menú. Dependiendo de la elección del usuario, el controlador regulará el encendido y apagado de los leds separando la etapa de control de la de potencia (distintos niveles de tensión). Además de esto se estableció un total de 3 entradas estandarizadas industrialmente, con el fin de permitir la variación de la intensidad y del encendido y apagado de luces desde un dispositivo externo.

4.2.1 Elementos electrónicos presentes en el módulo de iluminación

Figura 16. Fuente de voltaje 15VDC – 23ª



Función dentro del circuito:

- Convertir nivel de tensión de 110V en corriente alterna, a 15V en corriente directa, ya que los dispositivos de control implementados en este prototipo funcionan con niveles de tensión DC.

Figura 17. Convertidor reductor buck DC-DC (9A)



Función dentro del circuito:

- Reducción de nivel de tensión a 12V para el circuito de potencia (nivel de alimentación de los leds), además de posibilitar la limitación de corriente por medio de un potenciómetro.

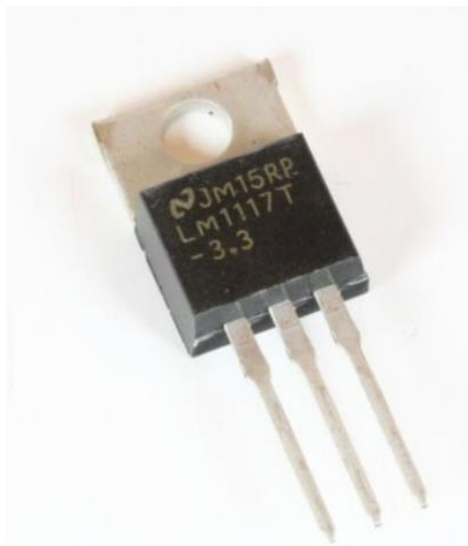
Figura 18. *Convertidor DC-DC LM2596*



Función dentro del circuito:

- Reducción del nivel de tensión a 5V el cuál se utilizará para la alimentación del LCD 20x4 y para alimentar el circuito reductor de 5 a 3.3V para el correcto funcionamiento de la esp32, y nos permitirá separar la alimentación del circuito de control de la de potencia.

Figura 19. *Regulador LM1117T (3.3V)*



Función dentro del circuito:

- Reducción de nivel de tensión a 3.3V para alimentación de esp32 y respectivas señales de control a dicho nivel de voltaje, este circuito esta implementado junto con dos capacitores de 100 y 10 microfaradios.

Figura 20. *Convertidor de señal 4-20mA a 3.3V*



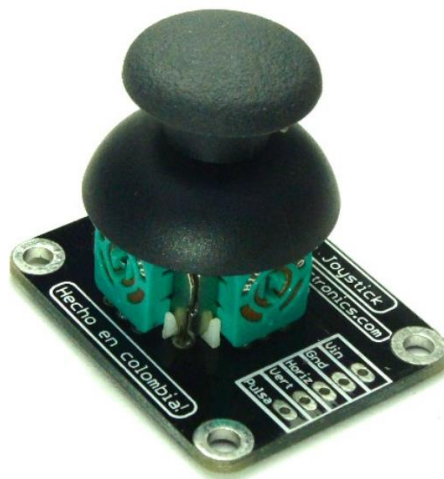
Función dentro del circuito:

- Permite a la esp32 recibir mediante una entrada analógica diferentes valores de intensidad de luz desde un dispositivo externo que trabaje con el estándar industrial de 4 a 20mA y lo traduce a un nivel de 0 a 3.3V.

Figura 21. *LCD 4×20 alfanumérica con I2C*

Función dentro del circuito:

- Permite visualizar la interfaz de control y controlar las diferentes técnicas de iluminación a utilizar dentro del mismo.

Figura 22. *Joystick compatible con ESP32*

Función dentro del circuito:

- Navegar y ajustar las distintas configuraciones disponibles en la interfaz de menú establecida para el control del módulo de iluminación.

Figura 23. Sistema embebido ESP 32

Función dentro del circuito:

- Permite controlar la intensidad de luz dentro del módulo, así como que técnica y cuantos leds se van a encender para un determinado proceso de inspección por medio de una interfaz programada en Arduino IDE.

Figura 24. Interruptor Basculante Redondo KCD1 Verde

Función dentro del circuito:

- Encender y apagar el módulo de iluminación.

Figura 25. *Interruptor de disparo módulo de accionamiento PWM MOSFET*

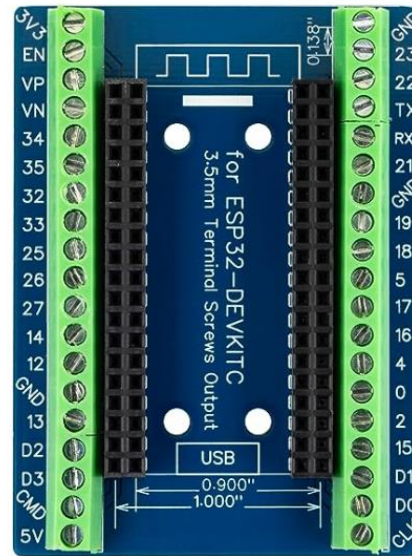
Función dentro del circuito:

- Conmutar el encendido y apagado de los leds, uniendo el circuito de control con el de potencia.

Figura 26. *Borneras para PCB*

Función dentro del circuito:

- Conexión de los elementos a la PCB donde se implementará la lógica electrónica de control del módulo.

Figura 27. Terminal GPIO Placa de expansión para ESP32

Función dentro del circuito:

- Permitir la conexión de la esp32 con los distintos periféricos además de permitir retirar el sistema embebido en caso de que se requiera algún cambio en la programación.

Nota. En las figuras anteriores, se muestran los componentes electrónicos que componen el circuito electrónico del módulo.

4.2.2 Diseño de PCB para control del módulo de iluminación

En la figura 28 se puede observar el circuito implementado en el software Easyeda, donde es posible diseñar el circuito impreso que se utilizara dentro del módulo. Los dispositivos de conmutación para separar la etapa de control de la de potencia, en este caso son módulos compatibles con esp32 que permiten manejar corrientes altas (más de 10A) sin necesidad de tener ningún tipo de disipación de potencia. Abajo se muestra el circuito respectivo de la PC.

La lógica del circuito es bastante simple, consiste en el encendido y apagado de la iluminación LED por medio de la conmutación por modulación por ancho de pulso PWM a una frecuencia lo suficientemente alta (en este caso de 20KHz) para que el cambio entre ciclos altos y bajos no pueda ser detectado por el sensor de visión artificial lo cual dificultaría el proceso de inspección. Se cierra el circuito de potencia por medio de un módulo mosfet el cuál recibe una señal de control PWM desde el esp32 y cierra una etapa de potencia alimentada a 12V que encenderá los leds a una intensidad deseada y ajustada por la interfaz.

Además de esto, en el circuito están integrados dos divisores de tensión con resistencias de precisión para poder recibir en el esp32 una entrada digital de 24V para el encendido de los leds y también dos entradas analógicas, de 0 a 10V estandarizada industrialmente y otra entrada desde un módulo externo que permite recibir una señal de 4 a 20mA y convertirla a una de 0 a 3.3V.

The figure consists of two side-by-side images of a PCB layout. The left image is a detailed layout on a grid, showing various components including resistors, capacitors, and integrated circuits. The right image is a simplified block diagram of the same PCB layout, showing the main components and their connections in a more abstract manner.

4.3 Interfaz de control del módulo

La interfaz es el medio que permite controlar la iluminación y técnica de luz deseada por un usuario según sea conveniente para facilitar el proceso de inspección.

Está siendo programada mediante Arduino Ide, utilizando la librería LiquidCrystalI2C la cual permite controlar el LCD 20x4 que muestra la interfaz y el menú en el cual se puede navegar por medio del Joystick compatible con Arduino, y la librería LiquidMenu que facilita la implementación de un menú programable.

En la pantalla principal de la interfaz, tendremos las siguientes opciones:

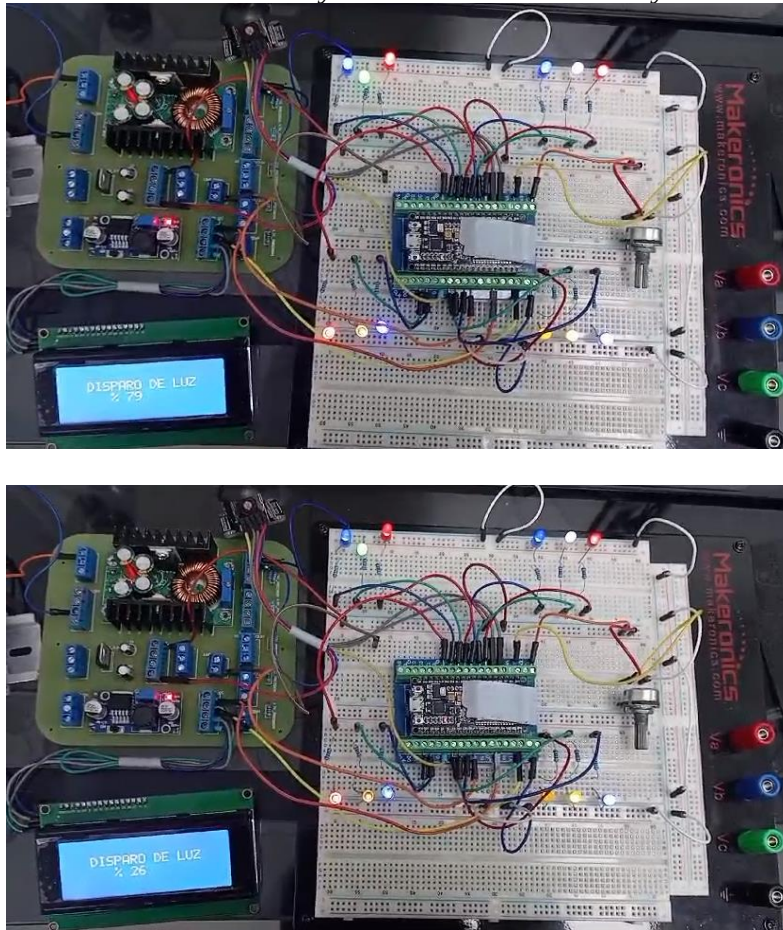
- **Automático:** Esta programado para recibir una señal analógica de un dispositivo externo y traducirla en un valor de 0 a 100% que el esp32 convertirá a una intensidad de luz en específico y mediante una señal digital también externa encenderá las luces leds a la intensidad ajustada, además el modo manual estará desactivado siempre que el automático este activo.
- **Manual:** Permite variar la intensidad de las luces leds por medio del Joystick compatible con Arduino, además de encender las mismas por medio de una señal digital que proviene al pulsar el mismo Joystick, además el modo automático estará desactivado siempre que el modo manual este activo.
- **Técnica de iluminación:** Este modo permite elegir una técnica de iluminación deseada (se tienen 5 posibles técnicas de iluminación programadas), según la técnica de iluminación elegida se encenderán ciertos grupos de leds cuando bien se reciba una señal de un dispositivo externo (automático) o se varíe la intensidad por medio del Joystick, dependiendo del modo de operación del módulo.
- **Luz personalizada:** Permite encender cada grupo de leds por individual según se desee, lo cual permite combinar diferentes técnicas de iluminación personalizando el color de cada grupo según la necesidad del usuario.

Figura 30. *Interfaz de control del módulo*

Nota. En la figura 30 se observa el diseño de la interfaz de control del módulo.

Se muestra el funcionamiento de la interfaz, mostrando las diferentes opciones de menú que se tienen. En la figura 31 se puede observar cómo se puede variar la intensidad de unos leds de prueba lo cual evidencia que se está enviando una señal de control de intensidad por medio de modulación por ancho de pulso (PWM), señal de control que conmutara los módulos de mosfet.

Figura 31. Visualización señal de control y variación de intensidad y color con leds RGB



Nota. En la figura 31 se observa la variación de intensidad de luz mediante circuito de control.

La variación intensidad se realiza por medio de la señal de control PWM, que en este caso a modo de demostración está siendo variado por una entrada analógica de un potenciómetro, el cuál simula la salida analógica de un dispositivo externo, por ejemplo, un PLC.

4.4 Diseño mecánico del módulo

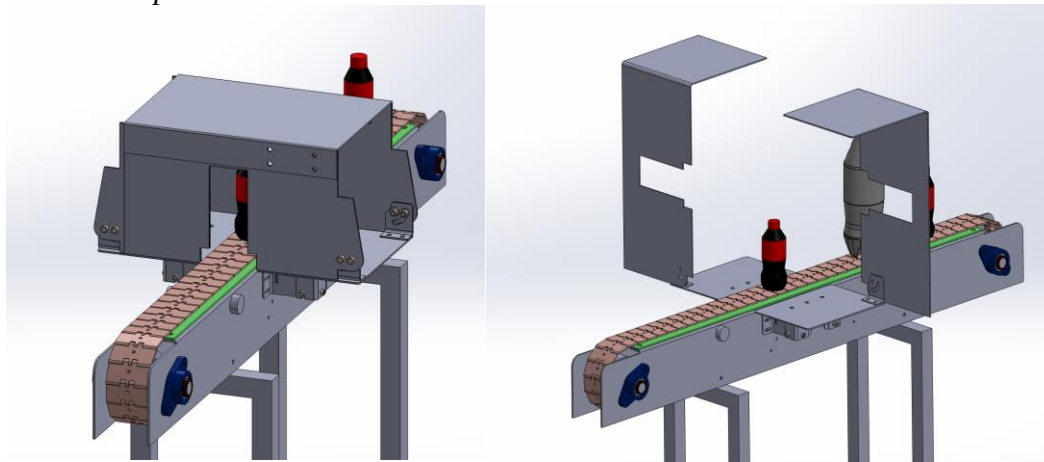
El diseño mecánico del módulo ha estado abierto a muchos cambios y a distintas versiones de este las cuáles se han ido descartando o modificando para encontrar una mejor solución ante la problemática presente la cuál es hacer posible la fácil inspección de objetos de diferentes tamaños,

tales como los dosificadores propios que sea inyectan en la empresa, o la inspección de botellas buscando características de interés para mantener la calidad de un producto. Teniendo en cuenta esto se buscó un diseño que fuera adaptable en cuanto a tamaño y que permitiera acoplar diferentes técnicas de iluminación para tener diversas alternativas de luz a la hora de reconocer patrones y anomalías.

Uno de los principales factores que se ha buscado con este diseño es la facilidad de construcción y posible replica, y teniendo en cuenta que es un prototipo o punto de partida para desarrollar en un futuro un producto real para ofrecerlo al mercado.

En la figura 32 se puede observar una de las primeras versiones en cuanto al diseño de la carcasa del módulo, sin embargo, este tenía la dificultad de que no permitía muchas variaciones en cuanto al tamaño de objetos, y al estar construido en lamina metálica debido a las dimensiones de este, estaba sujeto a pandearse y a deflactarse con el uso regular.

Figura 32. *Versión previa del módulo*

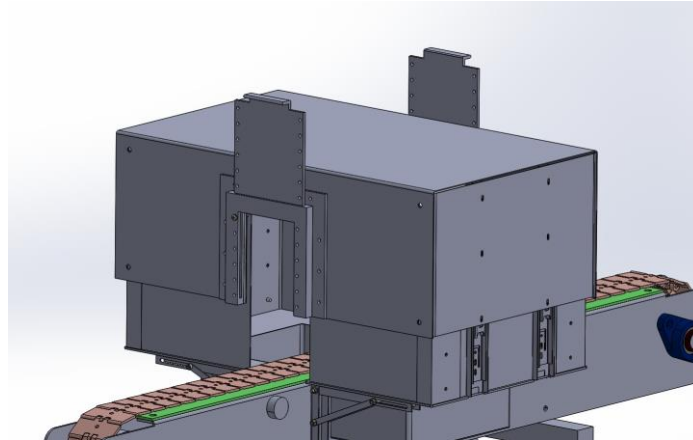


Nota. En la figura 32 se muestra la versión previa del módulo con algunos problemas de diseño.

Se decidió variar el anterior diseño a uno con mayor versatilidad considerando la variación de dimensiones de los objetos, más precisamente teniendo en cuenta la altura de estos. Dicho esto,

se implementó un diseño inicial corrigiendo este inconveniente como se puede observar en la figura 33.

Figura 33. *Diseño del módulo con variación de alturas*

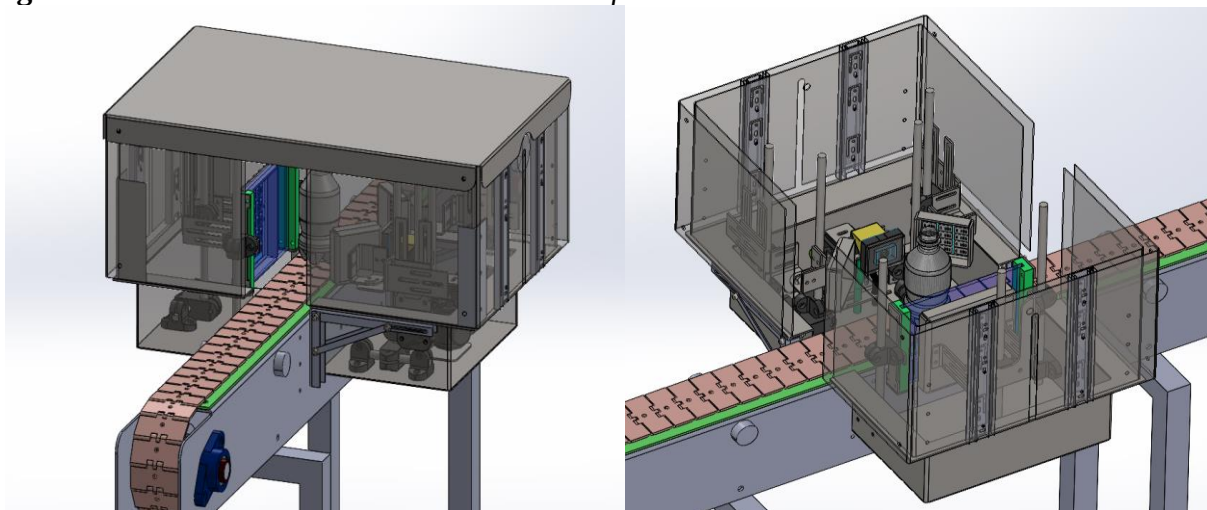


Nota. En la figura 33 se visualiza el diseño del módulo de iluminación considerando la variación de alturas de los objetos.

Como se observa en la imagen anterior, en los laterales se incorporaron unos rieles que permitirán deslizar el módulo de manera vertical, variando el tamaño de este y ajustándolo a la altura del objeto que se desee inspeccionar. En este punto todavía no se había tenido en cuenta los soportes y la iluminación dentro del módulo, y no se había decidido la implementación de un material en concreto para el dispositivo.

En la figura 34 se puede observar el modelo con los componentes internos y las respectivas configuraciones para las técnicas de iluminación que se implementaran dentro de este, es decir, backlight, difusa, direccional horizontal y vertical.

Figura 34. Vista isométrica del módulo con componentes internos de iluminación



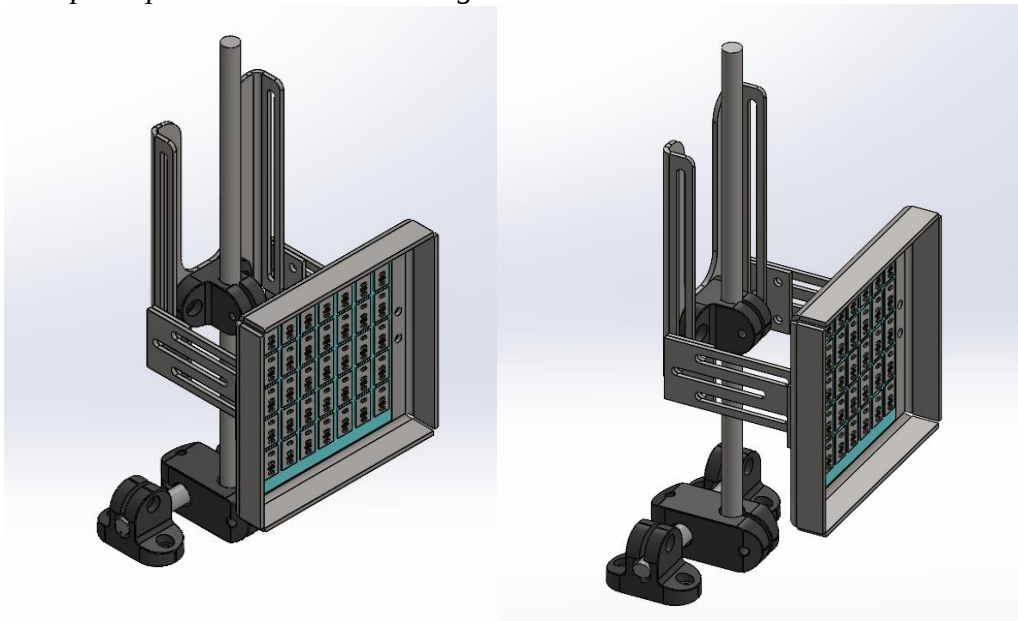
Nota. En la figura 34 se observa la vista isométrica con los componentes internos requeridos para la variación de las condiciones de iluminación.

Teniendo en cuenta que en el interior del módulo se deben soportar y fijar la cámara, luces leds y cableado pertinente. Se consultó y evaluó en conjunto con el departamento de diseño el material más conveniente para la fabricación del módulo considerando factores tales como el tema de inocuidad (cuidado en productos alimenticios), facilidad de obtención de material dispuesto por proveedores de uso común en la empresa, calibre de las láminas a utilizar considerando el peso de la estructura, facilidad de corte y doblado, criterios de diseño por el equipo del área con el objetivo de encontrar la mejor solución, entre otros. Habiendo considerado todos estos factores al final se optó por desarrollar el módulo en acero inoxidable AISI 304 debido a que es bastante robusto para la aplicación que se le va a dar, también se tuvo como referencia estructuras que ya se habían diseñado previamente en la empresa con el objetivo de cubrir la cámara de golpes y aislarla de la luz ambiente fabricadas en este material.

Se realizaron diversos ajustes en el diseño para optimizar la variación de posiciones tanto de la cámara como de las luces led para facilitar la incidencia del ángulo de la luz según sea conveniente para el proceso de reconocimiento.

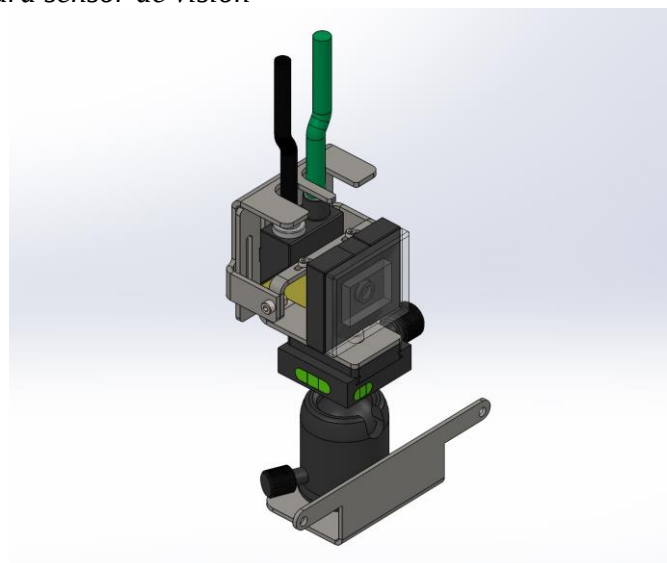
En las próximas figuras se puede apreciar de manera más clara los elementos internos de soporte para los leds y cámara. Estos diseños para han ido variando conforme se han visualizado posibles mejoras y disminución de problemas mecánicos a la hora de ensamblar el módulo.

Figura 35. Soporte para iluminación Backlight



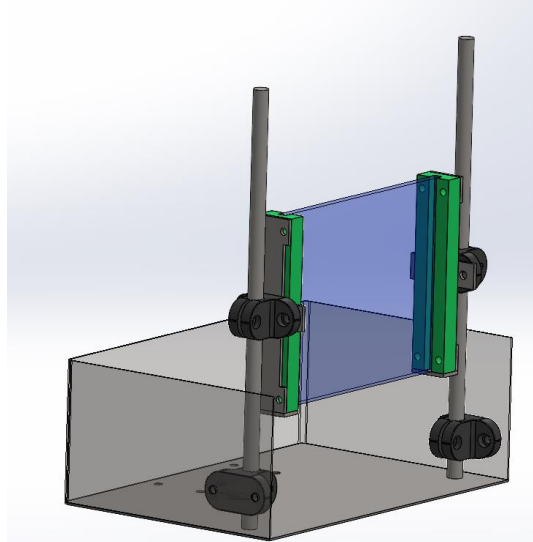
- Soporte para implementación de técnica de iluminación backlight

Figura 36. Soporte para sensor de visión



- Soporte y sujeción al trípode del sensor de visión para la variación en ángulo y altura del campo de visión de la cámara.

Figura 37. Soporte variación de fondos



- Soporte para variación de fondos.

Figura 38. Soportes para implementación de técnica de iluminación difusa



- Soporte para la implementación de la técnica backlight.

Nota. En las figuras anteriores se observa el diseño mecánico que permitirá utilizar las diferentes técnicas de iluminación.

4.5 Diseño final del módulo de iluminación

Se desarrollaron variaciones finales en la estructura externa del módulo y ajustes con los componentes electrónicos del mismo, pensando en eficiencia y por supuesto en acoplarlo con otras etapas de producción, puesto que durante el desarrollo del proyecto se decidió optar por enfocar el prototipo en la inspección de botellas y ofrecer en un futuro toda la etapa de producción con énfasis en embotellado. Teniendo lo anterior en cuenta también se consideró acoplar el diseño con la siguiente etapa de producción que en este momento se encuentra en desarrollo por el equipo de diseño. Actualmente se tiene en espera la construcción mecánica del módulo para implementarla en un futuro debido a que se tienen en este momento diferentes prioridades en la compañía.

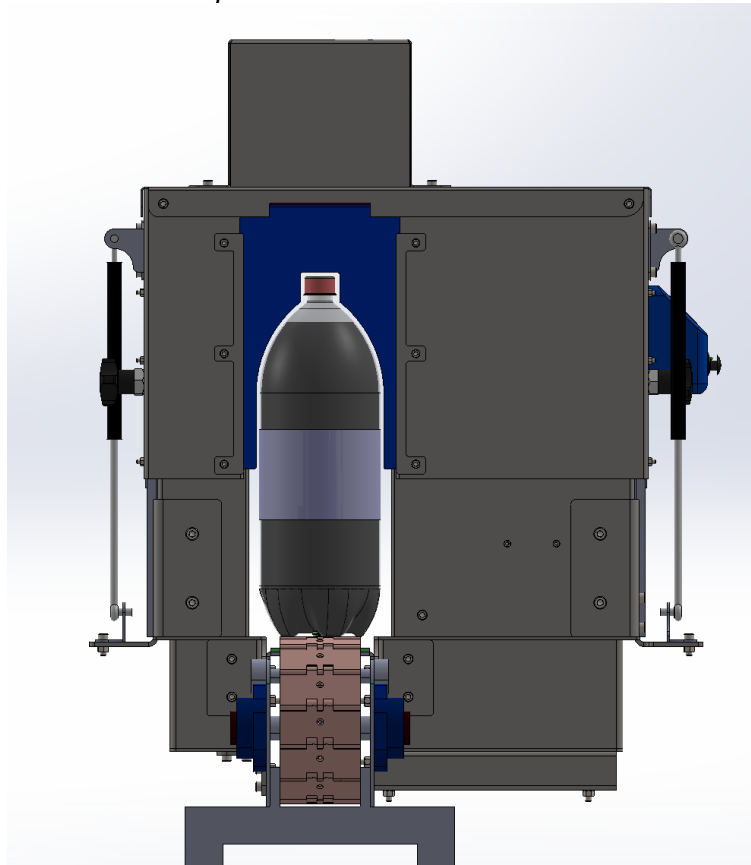
A continuación, se muestra la estructura externa final del módulo, teniendo en cuenta aspectos como seguridad, fácil implementación y robustez a la hora de utilizarlo.

Figura 39. *Vista isométrica del diseño final del módulo de iluminación*



Nota. En la figura 39 se muestra la vista isométrica del diseño final del módulo de iluminación.

Figura 40. Vista frontal del diseño final del módulo de iluminación



Nota. La figura 40 muestra la vista frontal del diseño final del módulo de iluminación.

Se observa que, en el diseño final, se incluyeron elementos de seguridad, como lo son amortiguadores en los laterales, manijas para el ajuste de alturas, u soportes en la parte inferior para soportar el peso de la estructura.

5. Resultados

5.1 Implementación de rutina con el sensor de visión para reconocimiento de lote y fecha

Interactuando con el software y el sensor de visión, medio por el cual se tomaron las fotografías y se parametrizaron rutinas de detección de distancias y márgenes, se puede observar

la necesidad de aislar la luz ambiente en el campo de visión de la cámara, puesto que una ligera variación en unas condiciones de referencia afectaba directamente en la rutina previamente programada para reconocer la presencia de lote y fecha, rechazando las botellas que en pruebas con la rutina sin variaciones en la iluminación, fueron correctamente inspeccionadas y aprobadas. Como se puede observar en la comparativa entre las figuras 13 y 14. Por dicha razón es bastante útil tener la posibilidad de variar las condiciones de iluminación y poder replicarlas de una forma determinada, facilitando así el reconocimiento de márgenes y formas de interés.

5.2 Desarrollo de circuito electrónico para la variación en condiciones de iluminación

Como se observa en las figuras 30 y 31 en el plan de trabajo, se implementó un sistema electrónico de control, que mediante un periférico de visualización LCD y un sistema de control manual (Joystick) permite variar intensidad de luz y color utilizando la gama de colores RGB en un entorno cerrado y reflejarlo de manera uniforme según se necesite, igualmente acoplándolo con un componente mecánico que permite utilizar distintas técnicas de iluminación. Además de esto el dispositivo es capaz de comunicarse mediante estándar industrial con otros dispositivos externos tales como un PLC o un PLC industrial.

5.3 Diseño CAD de la estructura mecánica del módulo de iluminación

Se diseñó la estructura mecánica final del módulo de iluminación, el cual permite la variación de alturas según sea la necesidad y las dimensiones del objeto a inspeccionar, de igual manera la estructura externa aísla de la luz ambiente el interior del módulo y posibilita la implementación de diferentes técnicas de iluminación, infiriendo positivamente en el proceso de reconocimiento de bordes sin una incidencia de factores externos. En la figura 39 y la figura 40,

se desarrolló un prototipo final de utilidad para la empresa, con el objetivo de construir el prototipo final en el futuro, y posteriormente realizar pruebas y correcciones para garantizar la calidad industrial del producto antes de su lanzamiento al mercado.

6. Recomendaciones

Durante el desarrollo del proyecto y la auto inmersión en el funcionamiento del sensor de visión y el campo de la visión artificial, se hace evidente la importancia de una adecuada iluminación en todo sistema de visión, ajustada a las necesidades a las cuáles se les quiere dar solución, ya sea con la correcta técnica de iluminación, intensidad, color, pertinente parametrización del sensor de visión aprovechando el máximo de la capacidad del equipo, entre otros. De esta manera se mejora el análisis de imágenes y la inspección disminuyendo los deslumbramientos o el mal enfoque de la cámara.

Sería pertinente dar una mayor importancia al área del diseño en la institución enfocándolo más al cómo se fabrican las piezas y productos que se diseñan en un software CAD, trayendo a la realidad la fabricación de las máquinas, puesto que se deben tener en cuenta diversos factores tales como radios y longitudes mínimos de brida según el calibre de la lámina al trabajar con láminas de acero, cuestiones de tolerancias y ajustes si se requiere que algunas piezas encajen en otras a presión o con un ajuste suave o fino...etc.

7. Conclusiones

Realizando pruebas de laboratorio con el sensor de visión se pudo observar que variando las condiciones de iluminación en el campo de visión del sensor, mejoró el porcentaje del 90% al 97% aproximadamente en piezas aprobadas con las que se probó la rutina, es decir se disminuyó

la cantidad de piezas que anteriormente eran rechazadas por irregularidades y variaciones en el entorno captado por la cámara, puesto que si bien antes se tenía un 10% de piezas de las cuáles había cierto porcentaje de piezas correctamente rechazadas, había otro porcentaje de falsos rechazos en el análisis realizado por el departamento de calidad, esto evidencia una disminución en el porcentaje de piezas que son rechazadas debido a variaciones en el entorno de visión. Teniendo en cuenta lo anterior asegurar una iluminación uniforme y constante es relevante, para no permitir variaciones externas en el campo de visión del sensor y dificultar la inspección de objetos.

Elegir una adecuada técnica de iluminación, además de un color con una longitud de onda pertinente a la hora de inspeccionar un objeto, permite contrastar de mejor manera las características de interés, facilitando el trabajo del dispositivo y en algunas ocasiones mejorando el tiempo de inspección.

Tener buen método a la hora de iniciar el diseño de una máquina permite realizar modificaciones de manera rápida y eficiente, puesto que siempre se está abierto a múltiples variaciones y mejoras a futuro a la hora de desarrollar un proyecto de este tipo, esto reduce el tiempo invertido en la corrección del diseño pensando en su posterior construcción.

Se debe tener en cuenta los calibres, tolerancias, longitudes y radios mínimos dependiendo del material a utilizar a la hora de trabajar con láminas metálicas o perfiles, así como tener claridad en el proceso de mecanizado cuando se va a trabajar cualquier pieza. Debe pensarse desde un inicio en cómo se va a fabricar para no tener inconvenientes a la hora de diseñar.

Referencias

- [1] S.A.S BIC Rambal, "Recuperado el 15 de octubre de 2023 de," 2023.
<https://rambal.com.co/>
- [2] D. Martin, "A practical guide to machine visionlighting," Midwest Sales and Support Manager, Adv Illum2007, pp. 1-3, 2007. [Online]. Available:
<https://www.advancedillumination.com/wp-content/uploads/2018/10/A-Practical-Guide-to-Machine-Vision-Lighting-v.-4-Generic.pdf>.
- [3] "INTRODUCTION TO MACHINE VISION. A guide toautomatingprocess&qualityimprovements," Cognex. [Online]. Available:
<https://www.cognex.com/es-co/resources/on-demand-webinars/introduction-to-machine-vision>.
- [4] A. L. B. E. R. T. Nogué and J. O. R. D. I. Antiga, "Aplicación práctica de la visión artificial en el control de procesos industriales," Gobierno De España (Ministerio De Educación), 2012. [Online]. Available:
http://www.infoplcn.net/files/documentacion/vision_artificial/infoPLC_net_Conocimientos_vISIONARTIFICIAL.pdf.
- [5] S. Sierra Álvarez, "Sistema de medición de objetos basado en visión artificial" [Bachelor'sthesis], Universidad EAFIT, 2012. [Online]. Available:

- https://repository.eafit.edu.co/bitstream/handle/10784/4518/Santiago_SierraAlvarez_2012.pdf?sequence=3.
- [6] C. E. Giraldo Montero, "Dimensionamiento de piezas usando el sistema de visión de la celda de manufactura flexible en la Facultad de Ingeniería Mecánica," 2007. [Online]. Available: <https://repositorio.utp.edu.co/items/21f3f53f-16a7-4b34-aad4-2718dc73208c>.
- [7] R. Forster, "Tipos de luz," Recuperado el 21 de Octubre de 2023. [Online]. Available: [http://alumnos.ipchile.cl/biblioteca_web/ENCICLOPEDIA%20DE%20SALUD%20Y%20SEGURIDAD%20EN%20EL%20TRABAJO%20\(OIT\)/Vol.II_parte%20VI_%20Riesgos%20Generales/Cap.46_Iluminaci%C3%B3n.pdf](http://alumnos.ipchile.cl/biblioteca_web/ENCICLOPEDIA%20DE%20SALUD%20Y%20SEGURIDAD%20EN%20EL%20TRABAJO%20(OIT)/Vol.II_parte%20VI_%20Riesgos%20Generales/Cap.46_Iluminaci%C3%B3n.pdf).
- [8] E. A. S. Malpartida, "Sistema de visión artificial para el reconocimiento y manipulación de objetos utilizando un brazo robot," Pontificia Universidad Católica del Perú (Perú), 2011. [Online]. Available: <https://search.proquest.com/openview/1012aed86f88feec968e80c5af36dbb6/1?pq-origsite=gscholar&cbl=51922&diss=y>.
- [9] J. Wesoloski, "Introduction to Machine Vision," Recuperado el 20 de octubre de 2023, 2019. [Online]. Available: <https://www.cognex.com/es-co/blogs/machine-vision/vision-sensors-the-case-for-automation-with-machine-vision>.