

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



Clasificador óptico de pellet fuera de especificaciones de producción

Trabajo de graduación presentado por
Jonathan Josué López Guevara
para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Electrónica

Guatemala
2016

Clasificador óptico de pellet fuera de especificaciones de producción

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



Clasificador óptico de pellet fuera de especificaciones de producción

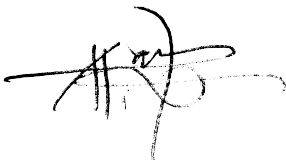
Trabajo de graduación presentado por
Jonathan Josué López Guevara
para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Electrónica

Guatemala
2016

Vo. Bo. :

(f) 
Ingeniero Mirlo Mauricio Manzo

Tribunal Examinador:

(f) 
Ingeniero Carlos Alberto Esquit Hernández

(f) 
Ingeniero César Augusto Cuevas Guerra

(f) 
Ingeniero Mario Andrés Búrbano Castro

Fecha de aprobación: Guatemala 08 de diciembre de 2016

ÍNDICE

Lista de cuadros	vii
Lista de figuras	viii
Resumen	xi
I. Introducción	1
II. Objetivos.....	2
A. Generales:	2
B. Específicos:.....	2
III. Justificación	3
IV. Marco teórico.....	4
A. Sector de alimentos y bebidas.....	4
1. Industria Alimentaria.....	5
B. Evolución tecnológica en la Industria Alimentaria.....	5
C. Salud en los operarios de la planta.....	6
D. Fotografía digital y tratamiento digital de imágenes.....	10
1. Funcionamiento de una cámara digital.....	10
2. Procesamiento de imágenes.....	18
3. Visión de máquina.....	20
E. Electroválvula neumática.....	21
V. Diseño experimental	23
A. Selección de cámara.....	23
B. Selección de software	24
C. Selección de plataforma.....	25
D. Configuración de la plataforma	26
E. Desarrollo del algoritmo	27
F. Selección de actuadores neumáticos.....	28
VI. Resultados.....	29
A. Visión de máquina	29
B. Tiempos críticos de ejecución.....	48
C. Estructura	49
D. Diagrama Eléctrico	57
E. Cotización.....	60
VII. Análisis de resultados	61

VIII.	Conclusiones	67
IX.	Recomendaciones	68
X.	Bibliografía	69
XI.	Anexos	71
A.	Comparación entre distintas plataformas	71
B.	Comparación entre plataformas raspberry pi y sus distintos modelos	75
C.	Pseudocódigo del algoritmo.....	76
D.	Ecuaciones del modelo físico del producto en caída libre	77
E.	Propuesta de prototipo con componentes industriales	78
1.	Cámara.....	78
2.	Plataforma	79
3.	Controlador lógico programable.....	80
4.	Módulo de salidas digitales	81
5.	Fuentes de poder.....	82

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Tiempo local y total de métodos empleados en análisis de imágenes utilizando filtro bilateral	40
Cuadro 2. Tiempo local y total de métodos empleados en análisis de imágenes utilizando desenfoque gaussiano	41
Cuadro 3. Comparación de tiempos entre el filtro bilateral y el desenfoque gaussiano	41
Cuadro 4. Tiempo de ejecución de 100 ciclos en ambas plataformas.....	41
Cuadro 5. Tiempo máximo entre capturas.....	48
Cuadro 6. Tiempo máximo promedio de inicio a fin de la captura.....	48
Cuadro 7. Cotización de materiales principales del prototipo	60
Cuadro 8. CPU y GPU de las plataformas.....	71
Cuadro 9. Especificaciones de RAM de las plataformas	71
Cuadro 10. Puertos, conectividad y precio de las plataformas.....	72
Cuadro 11. Comparación utilizando Sysbench con un thread.	75
Cuadro 12. Comparación usando Sysbench con 4 threads	75
Cuadro 13. Comparación usando MemTester para memoria RAM.....	76

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Acción correctiva en prevención de accidentes.....	6
Figura 2. Accidente como sistema y sus elementos.....	7
Figura 3. Ejemplo de un diafragma y sus distintas aperturas.....	11
Figura 4. Ejemplo de un objetivo de una cámara y sensor.....	12
Figura 5. Ejemplo de sensor Foveon X3.....	13
Figura 6. Vista de un esquema de la construcción de un pixel	14
Figura 7. Pixeles utilizando filtros de distintos colores	14
Figura 8. Ejemplo de interpolación de colores	15
Figura 9. Representación gráfica del modo RGB	16
Figura 10. Representación gráfica del modo HSV	17
Figura 11. Electroválvula de 2 vías normalmente cerrada.....	22
Figura 12. Captura en ambiente controlado 1	29
Figura 13. Transformación RGB a HSV en ambiente controlado 1	29
Figura 14. Resultado luego de aplicar máscara en ambiente controlado 1	30
Figura 15. Contornos encontrados para el ambiente controlado 1	30
Figura 16. Resultado de imagen en ambiente controlado 1	31
Figura 17. Captura en ambiente controlado 2.....	31
Figura 18. Transformación RGB a HSV en ambiente controlado 2	32
Figura 19. Resultado luego de aplicar máscara en ambiente controlado 2	32
Figura 20. Contornos encontrados para el ambiente controlado 2.....	33
Figura 21. Resultado de imagen en ambiente controlado 2	33
Figura 22. Captura en ambiente controlado 3	34
Figura 23. Resultado luego de aplicar máscara en ambiente controlado 3	34
Figura 24. Contornos encontrados para el ambiente controlado 3	35
Figura 25. Resultado de imagen en ambiente controlado 3	35
Figura 26. Captura en ambiente controlado 4.....	36
Figura 27. Resultado luego de aplicar máscara en ambiente controlado 4	36
Figura 28. Contornos encontrados para el ambiente controlado 4.....	37
Figura 29. Resultado de imagen en ambiente controlado 4	37
Figura 30. Captura en ambiente no controlado 1	38
Figura 31. Transformación RGB a HSV en ambiente no controlado 1	38
Figura 32. Resultado luego de aplicar máscara en ambiente no controlado 1	39
Figura 33. Contornos encontrados para el ambiente no controlado 1	39

Figura 34. Resultado de imagen en ambiente no controlado 1	40
Figura 35. Interacción de métodos y funciones del algoritmo implementado en la plataforma Raspberry Pi B+.....	42
Figura 36. Interacción de métodos y funciones del algoritmo implementado en MSI GE70 2PE.....	43
Figura 37. Interacción entre métodos y funciones del algoritmo implementado en Raspberry Pi B+ habilitando el despliegue de imágenes	44
Figura 38. Interacción entre métodos y funciones del algoritmo implementado en Raspberry Pi B+ deshabilitando el despliegue de imágenes	45
Figura 39. Interacción entre métodos y funciones del algoritmo implementado en MSI GE70 2PE habilitando el despliegue de imágenes.....	46
Figura 40. Interacción entre métodos y funciones del algoritmo implementado en MSI GE70 2PE deshabilitando el despliegue de imágenes	47
Figura 41. Comportamiento de la caída del objeto al final de la banda transportadora	49
Figura 42. Vista izquierda de la estructura con dimensiones en centímetros.....	49
Figura 43. Vista trasera de estructura con dimensiones en centímetros.....	50
Figura 44. Vista frontal de estructura con dimensiones en centímetros.....	50
Figura 45. Vista superior de estructura con dimensiones en centímetros	51
Figura 46. Vista inferior de estructura con dimensiones en centímetros	51
Figura 47. Vista izquierda de estructura con recubierto de hoja de lata	52
Figura 48. Vista trasera de estructura con recubierto de hoja de lata.....	52
Figura 49. Vista frontal de estructura con recubierto de hoja de lata.....	53
Figura 50. Vista superior de estructura con recubierto de hoja de lata	53
Figura 51. Vista inferior de estructura con recubierto de hoja de lata	54
Figura 52. Modelado 3D frontal de estructura final.....	54
Figura 53. Modelado 3D lateral de estructura final	55
Figura 54. Isométrico de estructura final	55
Figura 55. Detalle de instalación de válvulas solenoides neumáticas.....	56
Figura 56. Vistas de estructura final y posición de válvulas solenoides neumáticas	56
Figura 57. Diagrama eléctrico general.....	57
Figura 58. Diagrama eléctrico de fuentes de alimentación.....	58
Figura 59. Diagrama eléctrico de plataforma y cámara	58
Figura 60. Diagrama eléctrico de válvulas solenoides neumáticas.....	59
Figura 61. Procesos con un solo núcleo del CPU	72
Figura 62. Procesos multinúcleo del CPU	72
Figura 63. Velocidad de memoria RAM.....	73
Figura 64. Lectura/escritura de memoria Flash	73

Figura 65. Gráficos 2D	74
Figura 66. Consumo de potencia	74
Figura 67. Cámara <i>Grasshoper3</i>	79
Figura 68. Equipo SIMATIC BOX PC IPC627D	80
Figura 69. Controlador Lógico Programable S7-1200 6ES7214-1AF40-0XB0	81
Figura 70. Módulo de salidas digitales 6ES7222-1BH32-0XB0	82
Figura 71. Fuente de poder SITOP 6EP1337-3BA00	83
Figura 72. Fuente de poder LOGO!Power 6EP1311-1SH13	83

RESUMEN

El presente Trabajo de Graduación consiste en el desarrollo de un algoritmo capaz de detectar producto fuera de especificaciones de producción para poder ser utilizado en un prototipo que a través de válvulas solenoides neumáticas se separe producto. El objetivo general es lograr la clasificación del producto cumpliendo con los parámetros establecidos por el operador para lograr separarlo de la línea de producción y que sea depositado en un recipiente especial.

Como primer objetivo se tenía la implementación de un algoritmo optimizado para funcionar en tiempo real para poder adecuarse a los tiempos de producción de la planta.

Como segundo objetivo se tenía la correcta elección de las válvulas solenoides neumáticas neumáticos con la principal característica de que pudieran ser controladas utilizando señales eléctricas y que los tiempos para abrir y cerrar la misma sean lo suficientemente cortos para que no signifique un cuello de botella en la línea de producción.

Como tercer objetivo se tenía determinar una plataforma sobre la cual se pudiera realizar el análisis de imágenes obtenidas a través de una cámara para detectar y ubicar el producto fuera de especificaciones y lograr retirarlo utilizando la interfaz de entrada y salida que ofreciera la misma.

I. INTRODUCCIÓN

La industria alimentaria ha venido cobrando un gran auge a lo largo de la historia. A medida que el ser humano evoluciona en la dinámica del diario vivir, la alimentación se ha ido transformando para acomodarse a las necesidades del ser humano moderno. Una de esas necesidades es obtener alimentos de buena calidad, nutritivos y de fácil transporte ya que cada vez es más frecuente la continua movilidad en el diario vivir. Además de esto, los horarios de trabajo y las jornadas laborales han influido en que las personas adquieran productos alimenticios previamente preparados para facilitar la ingesta de alimentos y ahorrar tiempo para invertirlo en otras actividades.

Ahora bien, las personas también han ido adquiriendo el hábito de consumir alimentos que no necesariamente representen alguna de las comidas principales del día. Este es el caso de las boquitas o golosinas las cuales son consumidas a manera de refacción. Además, las personas prefieren este tipo de alimento debido a que se puede conservar por mayor cantidad de tiempo manteniendo la calidad y adquieren la garantía de tener un producto que satisfaga sus necesidades.

Por las razones anteriores, la industria alimentaria ha ido adquiriendo o se ha adaptado a las nuevas tecnologías que han surgido a lo largo de la historia. La fuerte demanda de los consumidores ha hecho que los procesos sean cada vez más industrializados. Por esta razón, resulta común encontrar maquinaria industrial operando en las grandes plantas de producción. Esto se debe a que se ha hecho necesario trabajar a gran velocidad manteniendo un alto estándar de calidad, características en las que un ser humano puede quedar corto. Por esta razón, respaldada también por las opiniones de los consumidores que buscan encontrar alimentos de alta calidad en cualquier momento, las plantas de producción no se pueden permitir un elevado número de fallos en su cadena de producción.

Por esta razón, se propone el diseño de un prototipo que apoye al mantenimiento de la calidad del producto para garantizar de mejor manera la satisfacción del consumidor. Dado que es un prototipo, se pretende diseñar utilizando herramientas de buena calidad sin incurrir en grandes costos y que el diseño se adecúe a las necesidades de la planta. Otro aspecto importante que se pretende cubrir es que un operario no incurra en riesgos de salud debido a las características propias de la línea de producción. El prototipo no busca sustituir a un operario, se busca que el recurso humano esté disponible para cumplir tareas más acordes a las capacidades del ser humano y a las necesidades de la planta de producción. Por eso, en este trabajo se presenta una breve investigación de las áreas de interés y temas pertinentes a la visión de máquina y procesamiento de imágenes, así como las partes mecánicas necesarias para su posterior implementación.

II. OBJETIVOS

A. GENERALES:

Evaluar un algoritmo de procesamiento de imágenes para clasificar, bajo los parámetros establecidos por el usuario, el producto que no cumpla con los mismos de tal forma que pueda separarse de la línea de producción para depositarlo en un recipiente especial.

B. ESPECÍFICOS:

- Utilizar las herramientas de software, ya sea *Open Source* o adquiridas con licencia, para desarrollar algoritmos óptimos para funcionar en tiempo real y que se adecúen a los tiempos de producción.
- Elegir correctamente las válvulas solenoides neumática, tomando en cuenta el tiempo para abrir y cerrar las válvulas solenoides neumáticas.
- Determinar la plataforma sobre la cual se desea realizar el análisis de imágenes tomando en cuenta su capacidad de procesamiento gráfico.

III. JUSTIFICACIÓN

Actualmente, en la fábrica de golosinas se realiza el proceso de clasificación de pellet fuera de especificaciones de producción de forma manual. Por lo tanto, existe un operario buscando producto que no cumple las especificaciones y los separa del producto bueno.

Se debe tomar en cuenta que los operarios no cumplen una sola tarea por lo que se detectó con frecuencia la ausencia de un operario clasificando producto. Si a esto se agregan los factores distracción y fatiga, fácilmente se obtienen omisiones en la clasificación y pueden conducir a pérdidas intangibles provenientes de los consumidores.

En el caso de la fatiga de los operarios, puede ser causante de los mismos inconvenientes antes mencionados e incluso puede afectar la salud de los operarios. Existen comentarios de los operarios acerca de mareos cuando se trabaja en esos turnos y se deben a causa de la vibración de la banda transportadora.

Los operarios pueden utilizar la palabra mareos para referirse al término vértigo visual. La vista contribuye significativamente a la orientación espacial, la percepción del movimiento y al balance en la postura. Por lo tanto, al estimular el sentido de la vista con situaciones no usuales para el ser humano puede llegar a producir desequilibrio y una incorrecta percepción visual de las cosas que puede causar una mala coordinación de los músculos al moverse para alcanzar un objetivo (Brandt, 2003).

Por esta razón, se desea realizar el proceso de clasificación en la fábrica de golosinas de forma automática, logrando optimizar la calidad del producto y reducir así los comentarios negativos provenientes de los consumidores.

IV. MARCO TEÓRICO

A. SECTOR DE ALIMENTOS Y BEBIDAS

El sector industrial denominado comúnmente Alimentos y Bebidas tiene como objetivo proporcionar comida a la población mundial donde la mayoría de los habitantes no producen los productos para su propia alimentación, sino que los adquieren de empresas especializadas. Este tipo de industria se incluye dentro del sector industrial o actividad económica de industrias manufactureras. Esto se detalla en la Clasificación Industrial Internacional Uniforme (CIIU) que utiliza las Naciones Unidas para clasificar sistemáticamente todas las actividades económicas con el objetivo de permitir compilar los datos estadísticos de cada país por categorías y así compararlos a nivel internacional. En términos generales, la industria de alimentos y bebidas se refiere a los alimentos que son procesados o que de alguna forma pasan por un proceso industrial, diferenciándolo así de la industria alimentaria en general ya que esta última incluye a los productores y comerciantes de productos agrícolas no procesados (SIB. 2012).

En Guatemala, el Sistema de Cuentas Nacionales se basa en al CIIU Revisión 3 que fue aprobada en 1989 y es aplicada en el país desde el año 2007. El nivel superior de la CIIU Rev. 3 incluye 17 categorías económicas, de las cuales el inciso D corresponde a las Industrias Manufactureras. Una Industria Manufacturera consiste en la transformación física y química de materiales, sustancias o componentes en productos nuevos, ya sea que el trabajo se efectúe mediante maquinaria o a mano, en una fábrica o un domicilio o que la venta del producto sea al por mayor o al por menor. Los materiales, sustancias o componentes transformados son materias primas procedentes de la agricultura, la ganadería, la silvicultura, la pesca y la explotación de minas y canteras. La actividad de industrias manufactureras se desagrega en 23 Divisiones, de las cuales el número 15 corresponde a la “Elaboración de productos alimenticios y bebidas” (SIB. 2012).

La División 15 se subdivide a la vez en los siguientes grupos (12):

- 151 - Producción, procesamiento y conservación de carne, pescado, frutas, legumbres, hortalizas, aceites y grasas
- 152 - Elaboración de productos lácteos
- 153 - Elaboración de productos de molinería, almidones y productos derivados del almidón, y de alimentos preparados para animales
- 154 - Elaboración de otros productos alimenticios
- 155 - Elaboración de bebidas

1. **Industria Alimentaria.** La Industria Alimentaria tiene como objetivo preparar, preservar, acondicionar y transformar en alimentos las materias primas que ofrecen el mar y la tierra. Suministrar alimentos a la población sigue siendo la preocupación fundamental del hombre y, en ese sentido, la tecnología ha venido a jugar un papel muy importante. Se requiere que la producción sea la suficiente para abastecer a la población. El producto debe ser seguro para garantizar su calidad y evitar así la desconfianza del consumidor. Debe ser también económico o al coste mínimo para ser asequible a la mayoría de la población, además de sanos y adecuados al máximo, tanto nutricionalmente como desde un punto de vista de durabilidad para que su distribución sea efectiva sin que se deteriore el producto (Santamaria, 2005).

La Industria alimentaria es, probablemente, el primer sector industrial en la mayoría de países del mundo. Se trata de una industria donde convergen distintas ingenierías (industrial, química, mecánica, etc.) debido a la implementación de líneas de producción cada vez mayores. Además, existe interés de parte de las fábricas de la diversificación del producto y el mejoramiento de calidad. Esto permite una fuerte actividad en la industria para equipos de la industria alimentaria (Santamaria, 2005).

B. EVOLUCIÓN TECNOLÓGICA EN LA INDUSTRIA ALIMENTARIA

En la actualidad se requiere de tener un alto nivel de competitividad para lograr subsistir cuando se trata de industrias como la industria alimentaria. Existen diversos factores para que este tipo de industrias se vean obligadas a reducir costos en todas sus áreas de producción. La creciente competencia nacional y mundial y la constante demanda de productos por parte de consumidores y minoristas. Anteriormente este tipo de industrias solía emplear mucha mano de obra que a lo largo de los años se han convertido en industrias con gran capital gracias a que han ido implementando tecnología microelectrónica moderna. Es común observar la continua modernización en sus plantas y equipo con el objetivo de incrementar su productividad. Cabe resaltar que las medianas empresas están siguiendo este proceso de modernización y automatización de procesos (OIT, 1998).

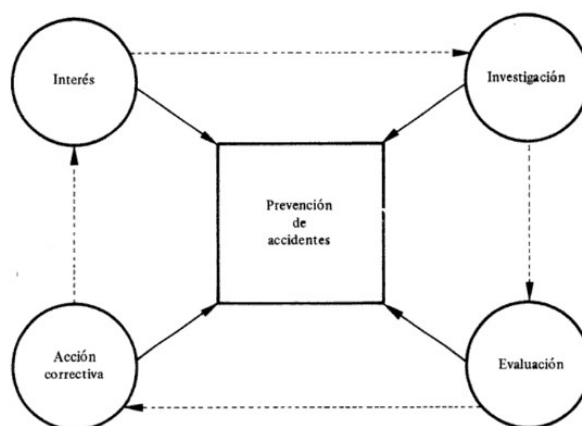
Una tendencia en la producción actual propia de los productores de alimentos que cuentan con escasos márgenes se contienen a la adquisición de tecnología cara y continúan utilizado mano de obra relativamente elevada que requiere de una fuerza de trabajo mayor y, en muchos casos, no calificada con salarios más bajos. En la planta de producción existen muchas operaciones repetitivas que podrían ser fácilmente ejecutadas por robots modernos. Esto se ve frustrado ya que para muchas pequeñas y medianas empresas los precios que manejan en esta área son elevados y su nivel de producción no les permite adquirirla (OIT, 1998).

Tener acceso a la tecnología ha llevado a la industria alimentaria a alcanzar una fase de automatización en otros países. A medida que avanza la tecnología a un nivel superior, toda la instalación industrial dispone de más información relativa a todo el proceso de producción. Es común tener información como la humedad, viscosidad y temperatura y parámetros del proceso de fabricación como el uso de materias primas, el volumen global del consumo y los defectos en toda la instalación industrial. El avance en la automatización industrial como utilizar ordenadores en el sistema de control, interfaces de operador que facilitan información sobre el proceso y la compilación de datos y dispositivos de control dentro del sistema de control, entiéndase sensores, dispositivos digitales, dispositivos de entrada y salida analógica o controladores de la visión. Más allá de la implementación de tecnología en una industria alimentaria, se debe tomar en cuenta que este sector demanda los más altos estándares de calidad y seguridad. Resulta común observar maquinaria construida con materiales como acero inoxidable el cual permite una operación higiénica y fácil limpieza (OIT, 1998).

C. SALUD EN LOS OPERARIOS DE LA PLANTA

Siempre en el marco del desarrollo industrial, a medida que se da un incremento en la infraestructura de la planta se está incrementando también el riesgo de accidentes laborales. Por esta razón se tiene la necesidad, incluso obligación, de aumentar las medidas de seguridad. A pesar de incrementar las medidas de seguridad, no sirve de nada si no existe una toma de conciencia por parte del empresario y el trabajador para perfeccionar la seguridad en el trabajo. Esto se puede lograr a través de una capacitación permanente y una considerable inversión en aspectos formativos (Ramírez, 2005).

Figura 1. Acción correctiva en prevención de accidentes

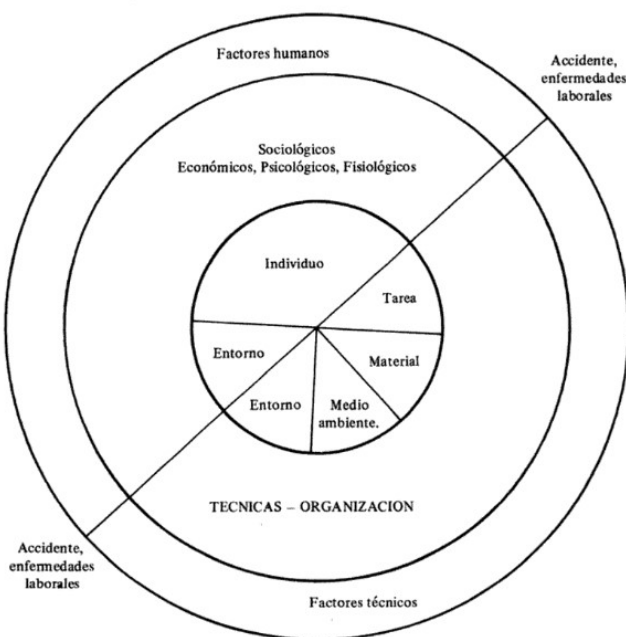


Existen objetivos específicos que el campo de la seguridad debe cumplir en beneficio del personal y los elementos físicos. El primero es evitar la lesión y muerte por accidente. Como segundo punto se busca reducir

los costos operativos de producción, maximizando así los beneficios. El tercer punto consiste en mejorar la imagen de la empresa y por ende la seguridad del trabajador para dar así un mayor rendimiento en el trabajo. El cuarto punto indica que se debe contar con un sistema estadístico que permita detectar el avance o disminución de los accidentes, así como la causa de los mismos. Como quinto punto se debe contar con los medios necesarios para montar un plan de Seguridad que permita a la empresa desarrollar las medidas básicas de seguridad e higiene (Ramírez, 2005).

Existen diversos factores que se derivan en accidentes. Dado que los accidentes son combinaciones de riesgos físicos y humanos, se puede clasificar los factores que inciden en la producción del accidente en técnicos y humanos. Los factores humanos abarcan aspectos psicológicos, fisiológicos, sociológicos o económicos. Los factores técnicos abarcan aspectos organizacionales. Una vez existe un disfuncionamiento en cualquiera de los anteriores se produce un accidente. El disfuncionamiento tiene distintos orígenes que pueden agruparse en el individuo, la tarea, el material y el entorno, medio ambiente o lugar de trabajo y el entorno (Ramírez, 2005).

Figura 2. Accidente como sistema y sus elementos



Analizando de forma más profunda al individuo como elemento del accidente, se puede decir que el individuo es el resultado de la interpretación de ciertas características que lo definen. Entre ellas se encuentra el temperamento, potencial, carácter, motivación, el yo y la personalidad.

El temperamento está dado por sistemas funcionales que componen el organismo humano como el mesodermo, endodermo y ectodermo. El mesodermo es el sistema óseo, muscular, circulatorio y adiposo. El endodermo está formado por el sistema visceral, glándulas, órganos internos, formación reticular y gran parte del encéfalo anterior. El ectodermo está formado por el sistema neuronal, los sentidos y el tejido epitelial (Ramírez, 2005).

Conocer los sistemas anteriores es útil para conocer el potencial de las personas. El potencial puede traducirse como la energía vital y puede clasificarse en energía mental o capacidad de pensamiento generada por el ectodermo. Si se tiene baja energía mental se puede producir gran cantidad de energía afectiva y mecánica. La energía afectiva o capacidad de sentimiento generada por el endodermo desarrolla el contenido biofísico. La energía física o capacidad de movimiento generada por el mesodermo posee energía libre que consume el sistema muscular cuando se desarrolla actividad física. La energía puede tener efectos positivos o negativos según la forma en que se utilice. Si se almacena energía y no se libera se produce tensión. La tensión debilita las energías del individuo y los rendimientos. Esto produce angustia y comienza una reacción de activación del sistema simpático y parasimpático de modo excesivo y de forma alterna provocando nuevas tensiones. Esto produce comportamiento inadecuados originando así problemas físicos como debilidad, fatiga, dolores de cabeza, problemas afectivos como irritabilidad o angustia y problemas mentales como falta de concentración, subjetivismo, rigidez mental, pesimismo, desorientación y confusión (Ramírez, 2005).

Ese tipo de problemas mentales mencionados anteriormente pueden verse influenciados por variables en el entorno, incrementando así el riesgo de incurrir en algún tipo de accidente dentro de la planta de producción. En la planta de producción se trata constantemente con todo tipo de bandas transportadoras. Existe un tipo de banda que utiliza vibraciones mecánicas para transportar producto de un lugar a otro. Estas vibraciones pueden entenderse como una señal periódica que hace que el producto se mueva de una forma particular que puede describirse o representarse como una señal de la forma $y(x) = A|\sin x|$ donde $A \in \mathbb{R}$. Este tipo de movimientos puede inducir a una persona a marearse. El mareo inducido por el movimiento, también denominado cinetosis, no es un proceso patológico sino más bien una respuesta normal a ciertos estímulos con los que el individuo no se encuentra familiarizado y, por lo tanto, no se ha adaptado (Ramírez, 2005).

El síndrome del mareo se produce por medio de estímulos visuales cuando se observan objetos en movimiento sin ningún movimiento físico del observador. Una banda transportadora como la anteriormente descrita puede representar ese estímulo visual y auditivo. La característica esencial de los estímulos que producen mareo inducido por el movimiento es que generan información discordante en los sistemas sensoriales que suministran al cerebro información de la orientación espacial y el movimiento del cuerpo. Esto produce una desadaptación entre las señales suministradas por los ojos y el oído interno respecto a las señales que espera el sistema nervioso central (Griffin, 1998).

La desadaptación más importante es la de las señales procedentes del aparato vestibular del oído interno, en el que los canales semicirculares, los receptores especializados de las aceleraciones angulares, y los otolitos, los receptores especializados de las aceleraciones lineales, no suministran información concordante. Las aceleraciones lineales de frecuencias menores a 0.5 Hz, como las que se producen a bordo de un barco o en un avión que atraviesa una turbulencia, generan también señales vestibulares contradictorias convirtiéndose así en potencial mareo. Otro caso común es cuando existe desacuerdo entre un factor visual y un factor vestibular. También la ausencia de una señal esperada y concordante en una modalidad sensorial determinada se considera la característica esencial del mareo inducido visualmente, dado que las claves visuales de movimiento no van acompañadas de las señales vestibulares que el individuo espera que se produzcan cuando está sometido al movimiento indicado por la presentación visual (Griffin, 1998).

Los signos y síntomas del mareo evolucionan en secuencias determinadas debido a la exposición del movimiento provocador en la que la escala temporal depende de la intensidad de los estímulos y de la susceptibilidad del individuo. Normalmente se da como primer síntoma el malestar epigástrico, seguido de náuseas, palidez y transpiración. Calor corporal, aumento de la secreción de saliva y eructos también son síntomas que prosiguen a los anteriores mencionados. Normalmente estos síntomas evolucionan con relativa lentitud, pero si continúa la exposición al movimiento se produce un rápido deterioro del bienestar y aumenta la intensidad de las náuseas, que finalmente desembocan en vómito o arcadas. Otros síntomas pueden darse de forma temprana. Entre ellos está la alteración del ritmo respiratorio, con suspiros y bostezos, y también puede producirse hiperventilación. Se tiene conocimiento de dolor de cabeza y vértigo. comunican casos de dolor de cabeza, tinnitus (campanilleo) y vértigo (Griffin, 1998).

El vértigo produce síntomas como mareos, palpitaciones, náuseas, vómitos, zumbidos y la más común que es la percepción de movimiento del entorno o de uno mismo. Estas sensaciones pueden durar minutos o incluso horas y en los casos más extremos pueden durar días. Este es sin duda un comportamiento que no se quiere reproducir dentro de una planta de producción ya que puede ser un foco de accidentes dentro de la misma (De Juan, 2014).

D. FOTOGRAFÍA DIGITAL Y TRATAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES

1. **Funcionamiento de una cámara digital.** El funcionamiento de una cámara digital puede explicarse utilizando una analogía con el ser humano. Después de todo, se buscaba plasmar lo que el sentido de la vista puede observar en algún trozo de papel o algo similar. Mencionando a grandes rasgos la anatomía del ojo humano, en la retina del ojo se encuentra una malla densa formada por celdas fotosensibles que convierten la luz incidente en señales eléctricas. Estas señales son transportadas al cerebro en donde son interpretadas como imágenes. De la misma forma, la retina del ojo puede ser sustituida por una parte de la cámara digital denominada objetivo que transmite la luz hacia el sensor de la cámara el cual, básicamente, está formado por un arreglo de detectores denominados *picture elements* o píxeles. Además, el ojo humano posee un mecanismo para regular la cantidad de luz que desea capturar. Es común detectar que el iris se contrae o se relaja para regular el paso de luz a través de la pupila. Este mecanismo o músculo también fue implementado en las cámaras digitales con la ayuda del obturador y el diafragma. Las dimensiones de un píxel se encuentran normalmente en el orden de los micrómetros. El número de píxeles en una malla se conoce como la resolución del sensor de imagen (Bigshot, 2013).

Existen numerosos tipos de cámaras digitales por lo que se tratarán características comunes entre ellas para no detallar cada característica de cada tipo de cámara digital. Todos los elementos de las cámaras digitales tienen una misión específica la cual se explicará brevemente y se dará detalle de algunas tecnologías que se han desarrollado a lo largo de la historia (Calleja, 2014).

a. **Objetivo.** El objetivo es un dispositivo compuesto por un conjunto de lentes convergentes y divergentes con la misión de enfocar y dirigir los rayos de luz hacia el sensor. El objetivo puede ser fijo o desmontable e intercambiable por otro. Dependiendo de lo que se quiere fotografiar se debe elegir el objetivo adecuado. El objetivo fijo solamente puede dar imágenes nítidas de temas a una distancia mínima de dos o tres metros. Los objetivos intercambiables tienen un anillo de enfoque, es decir, poseen un aro que al ser girado puede cambiar la distancia de las lentes al plano focal. La ventaja de este tipo de objetivos es que permite obtener imágenes nítidas de objetos situados a medio metro o a largas distancias (Sierra, 1992).

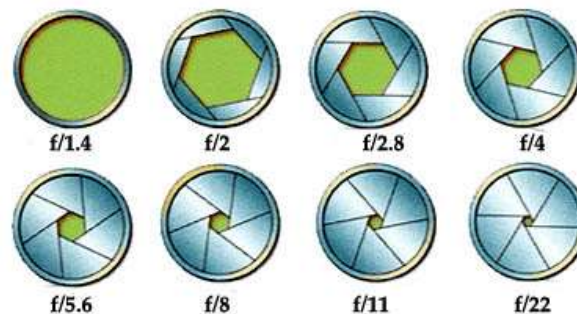
El objetivo también posee como característica la capacidad de poseer apertura única o apertura variable. Cuando posee apertura variable posee un mecanismo denominado diafragma. Este mecanismo funciona como el iris del ojo. Es un elemento importante ya que se encarga de limitar el rayo de luz que entra a través de las lentes hacia el sensor (Sierra, 1992).

b. **Obturador.** El obturador está localizado entre el objetivo y el sensor digital y tiene como función principal controlar el tiempo. Existen distintos tipos de obturadores. El obturador central o de laminillas se instala generalmente en las cámaras de visor- El segundo tipo es el obturador de plano no focal y está compuesto por dos cortinillas situadas justo delante de la película. La ventaja que presentan los últimos es que permite intercambiar de objetivos en cualquier momento (Langford, 1988).

Una cámara que posee distintas velocidades de obturación facilita la exposición correcta en distintos tipos de iluminación. Además de esto, tiene la capacidad de capturar algún tipo de movimiento en lo que se está fotografiando, además de distorsionar la imagen hasta el punto de observar borroso lo que se fotografía (Langford, 1988).

c. **Diafragma.** El diafragma es una parte del objetivo que tiene como función limitar el rayo de luz que penetra en la cámara. Como se mencionó anteriormente, funciona como el iris en el ojo humano ya que se abre o se cierra dependiendo de la cantidad de luz que desea dejar pasar el usuario. Cada objetivo posee una apertura de diafragma máxima y va a depender de lo que el usuario desee fotografiar. Lo abierto que se encuentre el diafragma se denomina apertura de diafragma y se mide en números f en donde el salto de un valor a otro se denomina paso (Sierra, 1992).

Figura 3. Ejemplo de un diafragma y sus distintas aperturas



d. **Sensor.** El sensor es el encargado de captar las imágenes. Sobre el sensor se proyecta la luz donde queda plasmada la imagen del objeto que se está fotografiando. aquello sobre lo cual se proyecta la luz dibujando una imagen que representa lo que nuestra cámara ve. Los sensores se componen de millones de componentes sensibles a la luz denominados píxeles. Los píxeles son fotosensibles y deben permanecer

siempre en un ambiente oscuro ya que al entrar en contacto con la luz se plasma la figura enfocada (Sierra, 1992).

Una norma común para determinar la calidad de las imágenes es el tamaño del sensor. Entre mayor sea el tamaño del sensor mejor resultado se obtiene. No está de más mencionar que es importante la forma de las celdillas o píxeles y su organización. Existen tres tipos de sensores (Sierra, 1992).

Figura 4. Ejemplo de un objetivo de una cámara y sensor



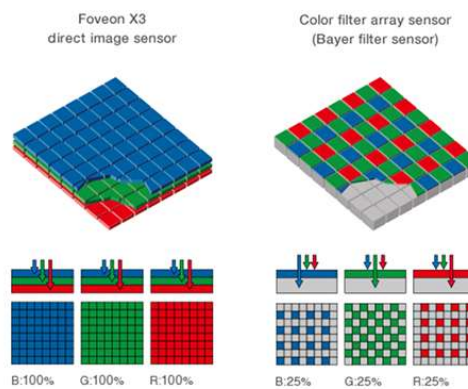
1) Sensor CCD. Nombrado así por sus siglas en inglés que significa *Charge Coupled Device*. Poseen un tamaño pequeño con lo que se puede reducir el tamaño de las cámaras y provocan menos ruido en comparación a otros tipos. Tiene como aspectos positivos la calidad de imagen obtenida. Entre sus desventajas se encuentra la disminución de sensibilidad a luces de poca intensidad, el consumo de batería y su elevado precio. Este tipo de sensores dispone de un arreglo de píxeles en el cual se asigna un único color a cada píxel. Es por esta razón que se debe implementar distintas funciones para lograr obtener una alta gama de colores (Sierra, 1992).

2) Sensor CMOS. Nombrado así por sus siglas en inglés *Complementary Metal Oxide Semiconductors*. Poseen un menor coste y mejor desempeño en situaciones de poca luz, no sufren del efecto *blooming* y consumen menos batería. Difieren en los sensores CCD dado que el procesamiento de la información se realiza dentro del sensor gracias a los transistores que posee. Es el tipo de sensor que se ha implementado en las últimas generaciones de cámaras debido a que posee un menor tamaño, traducido en menor coste de fabricación y equipos de gama alta de menor tamaño. Anteriormente se mencionó la palabra *blooming* que es un fenómeno que se presenta cuando se satura un píxel debido a la luz que incide sobre él y

comienza a saturar a sus pixeles vecinos. Al igual que los sensores CCD, dispone de un arreglo de pixeles para asignar un color a cada uno y realiza funciones para lograr obtener una alta gama de colores (Sierra, 1992).

3) Sensor Foveon X3. Su característica principal es la discriminación de los tres colores utilizando tres capas de distintos sensores que absorben la información que corresponde a su color. La principal ventaja es que se obtienen fotografías con mayor fidelidad de color, mayor contraste y menor ruido. Esto se debe a que en este tipo de sensores no existen filtros de color que causan una pérdida de información transmitida por la luz, al igual que no existe un filtro pasa baja que permite corregir la interferencia que causa la matriz de filtro de color. Otra de las ventajas es que se omite la interpolación artificial que utilizan otros sensores para rellenar los colores faltantes. Es importante mencionar que los sensores tipo Foveon X3 son basados en tecnología CMOS con la diferencia de estar formado por tres capas de fotodiodos apiladas verticalmente, cada capa con distinta profundidad y correspondiente a un color RGB.

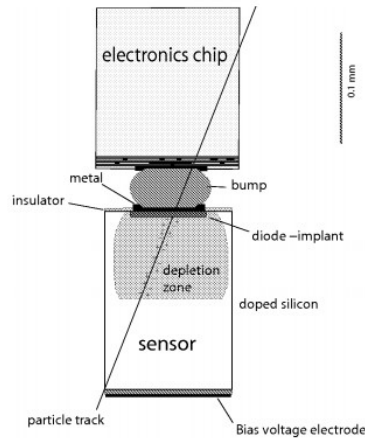
Figura 5. Ejemplo de sensor Foveon X3



e. Pixel. Mostradas las generalidades de una cámara digital, se hace necesario hablar de pixeles. Las cámaras digitales tienen como principal función lograr plasmar en algún formato o sustrato algún objeto que el ser humano desee a través de una imagen digital. Se ha explicado que esto se logra con la ayuda del sensor, independientemente del tipo de sensor. Cada sensor está formado por una cuadrilla o arreglo de pequeños elementos fotosensibles denominados pixeles. En la Figura 4 se aprecia un bosquejo de la forma que presenta un píxel y una idea del tamaño que posee. Además, se resalta que su componente principal es el silicio sensible a la luz (Rossi, 2006).

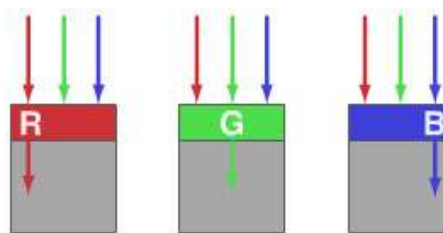
Cuando se somete a la cantidad de luz adecuada ocurre el efecto fotoeléctrico el cual surge cuando los átomos de silicio alcanzan la energía suficiente para lograr desprender electrones de los átomos. Los átomos libres son recolectados en el pozo de potencial justo debajo del detector interno y el número de electrones libres depende directamente de la intensidad de la luz percibida por el pixel. Es por esto que se puede afirmar que el voltaje en el pozo de potencial es una medida del brillo de la imagen del pixel (Bigshot, 2013).

Figura 6. Vista de un esquema de la construcción de un pixel



Ahora bien, un pixel no es capaz de detectar colores por sí solo. Para poder realizar esta función es necesario implementar filtros para lograr medir la intensidad de un color. Un filtro, a grandes rasgos, es una capa de algún material polarizado con la capacidad de permitir el paso de una banda del espectro electromagnético. Los filtros se colocan delante de los pixeles para detectar la intensidad de luz de una banda específica, es por esto que no pueden obtener información de distintas bandas a la vez, es decir, no es posible detectar distintos colores en un mismo pixel de forma simultánea. A pesar de esto, se puede mezclar los tres colores primarios de luz (rojo, verde y azul) para obtener una alta gama de colores. Puesto que un pixel no puede medir de forma simultánea los tres colores primarios, la mayoría de sensores de imagen emplean mosaicos que contienen pixeles con los tres tipos de filtros disponibles. En la Figura 3 se puede apreciar un mosaico muy popular denominado mosaico Bayer (Bigshot, 2013).

Figura 7. Pixeles utilizando filtros de distintos colores



Existe una función denominada interpolación de colores con la cual se logra determinar el valor de otros colores a partir de la información que poseen los pixeles vecinos. Esto es necesario debido al principio de que cada pixel posee únicamente la información de un color debido al filtro que se utiliza. Esta función es un promedio de los valores obtenidos por los vecinos para cada uno de los valores desconocidos por un pixel. (Bigshot, 2013).

Figura 8. Ejemplo de interpolación de colores



f. **Imagen digital.** Una imagen digital puede definirse como una función bidimensional $f(x, y)$ donde x e y son coordenadas en el plano y f es denominada como la intensidad o nivel de gris en el punto (x, y) . Cuando x, y y f son todos finitos, es decir que son discretos, se denomina a la función una imagen digital. A partir de esto se dice que una imagen digital está compuesta por un número finito de elementos denominados pixeles que poseen un valor y posición particular (Yadav, 2009).

Las imágenes digitales se obtienen a través de dispositivos de conversión analógico-digital (*Analog-Digital Converter* o ADC por sus siglas en inglés) las cuales son almacenadas posteriormente en memoria mediante unidades de información binaria (*Binary Units* o bits por sus siglas en inglés). Dependiendo de la técnica de codificación utilizada para realizar la conversión una imagen digital puede ser una imagen de mapa de bits o una imagen vectorial (ITE, 2012).

g. **Imagen vectorial.** Una imagen vectorial es aquella que se construye a partir de objetos generados matemáticamente denominados vectores. En este caso, los vectores son una serie de puntos que poseen manejadores que funcionan para controlar la forma de la línea al conectar con dos de esos puntos. Cuando los puntos no se conectan con una línea recta sino con una curva surgen los llamados elementos esenciales de una curva de *Bézier* que son curvas representadas matemáticamente. Los elementos esenciales son los puntos de anclaje o nodos y los manejadores que permiten el modelado de la forma de la línea. Las ventajas de este tipo de imágenes es que ocupan poca memoria y poseen la capacidad de escalarlas sin que pierdan su calidad gráfica (Alcalá, 2008)

h. Imagen de mapa de bits. Una imagen de mapa de bits, también denominada *bitmap* o gráfico rasterizado consiste en un arreglo rectangular de pixeles que representan una imagen. La representación de una imagen se logra a través de la asignación de un solo color a cada elemento del arreglo. Este tipo de imágenes no puede escalarse sin sufrir consecuencias que alteren su aspecto. Las imágenes de mapa de bits poseen características que se deben tomar en cuenta (Alcalá, 2008)

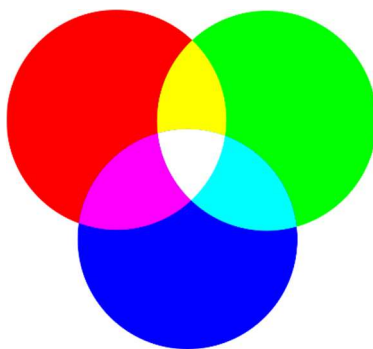
Entre esas características se encuentra la resolución que permite tener mayor o menor nitidez para lograr apreciar mayor o menor detalle de la imagen. La dimensión de una imagen se relaciona directamente con la resolución de la imagen y el espacio en memoria que ocupan. Debido a que siempre son rectangulares se mide en alto y ancho y el área que ocupa su dimensión se mide en pixeles (Alcalá, 2008)

La profundidad de color es el término que se utiliza para representar la cantidad de bits que se utilizan en un pixel para representar un color en una imagen de mapa de bits. A mayor profundidad de color, mayor es el espectro de colores que se puede representar. Sea n la profundidad de color, se dice que una imagen tiene 2^n colores o niveles de representación. Cada píxel puede asumir un único nivel de representación o color. Si un píxel tiene una profundidad de 8 bits, dicho píxel puede asumir uno de 256 valores posibles (Alcalá, 2008)

i. Modos de color. Se conoce como modos de color al sistema de coordenadas que sirve para describir los colores de forma numérica. En este caso se profundizará en el modo RGB y el modo HSV.

1) Modo de color RGB. El modo RGB es el que se utiliza en una imagen en la que el color se obtiene por mezcla aditiva de colores. En imágenes utilizando este espacio la gama completa de colores se obtiene a partir de la mezcla de los tres colores primarios. Un color en el modo RGB se describe mediante la tupla de tres valores numéricos correspondientes a un tercio de la profundidad de color, *i.e.* si se tiene una profundidad de color de 24 bits, cada canal se describe con un número de 8 bits (UNSL, 2012).

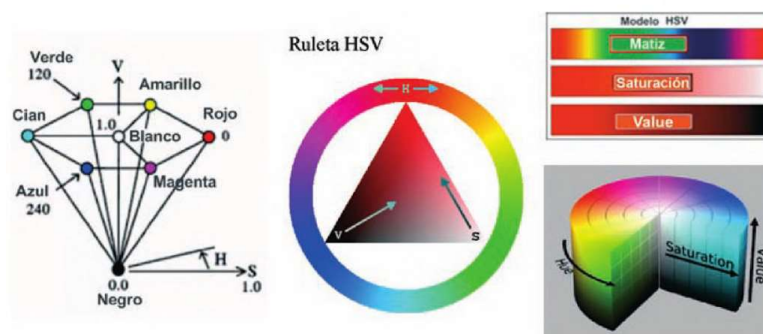
Figura 9. Representación gráfica del modo RGB



2) Modo de color HSV. El modo HSLV de sus siglas en inglés *Hue* (tonalidad o matiz), *Saturation* (saturación), *Value* (valor) es un modo de color habitualmente utilizado por los artistas ya que resulta más intuitivo en cuanto al tratamiento de la matiz y saturación. Este modo de color se trata de una transformación no lineal del modo RGB y se puede utilizar en progresiones de color. Su representación tridimensional parte de la representación espacial del cubo del modo RGB. Se tiene un eje que pasa por los vértices negro y blanco y se efectúa una proyección del contorno de los otros seis vértices del cubo sobre un plano perpendicular al eje. Si se sitúa en el vértice del blanco, la proyección resulta ser un hexágono regular con los vértices ocupados por los tonos verde y en el opuesto su complementario magenta, rojo y en el opuesto su complementario cian, azul y en el opuesto el complementario amarillo. Una pirámide hexagonal resulta al conectar los puntos anteriores con el vértice negro. Si en lugar de describir un hexágono en el vértice del blanco se describe como un cono, se tiene el vértice del negro en el punto $(0, 0, 0)$ en coordenadas cilíndricas y los colores contenidos en el sólido de revolución se localizan según sus coordenadas (Muñoz, 2012)

La tonalidad se representa como un ángulo que va de 0 a 360° y puede ser normalizado de 0 a 100%. Cada ángulo en grados corresponde a un color. La saturación se representa como la distancia al eje del valor negro-blanco. Los valores van de 0 a 100%. Cuanto más se aleje del eje, más saturado está. El valor o brillo del color representa la altura en el eje negro-blanco. Los valores posibles van de 0 a 100% donde 0 es negro. Dependiendo de la saturación, 100% puede ser blanco o un color más o menos saturado (Muñoz, 2012)

Figura 10. Representación gráfica del modo HSV



Para poder convertir desde RGB a HSV, los valores (R, G, B) deben ser expresados como números del 0 al 1. Entonces, los componentes del espacio HSV se pueden calcular de la siguiente manera:

$$H = \begin{cases} 60 \times \frac{G - B}{MAX - MIN} + 0, & \text{si } MAX = R \text{ y } G \geq B \\ 60 \times \frac{G - B}{MAX - MIN} + 360, & \text{si } MAX = R \text{ y } G < B \\ 60 \times \frac{B - R}{MAX - MIN} + 120, & \text{si } MAX = G \\ 60 \times \frac{R - G}{MAX - MIN} + 240, & \text{si } MAX = B \end{cases}$$

$$S = \begin{cases} \frac{MAX - MIN}{MAX + MIN} = \frac{MAX - MIN}{2L}, & \text{si } L \leq \frac{1}{2} \\ \frac{MAX - MIN}{2 - (MAX + MIN)} = \frac{MAX - MIN}{2(1 - L)}, & \text{si } L > \frac{1}{2} \end{cases}$$

$$V = \frac{1}{2}(MAX + MIN) = L$$

Donde MAX es el valor máximo de los componentes (R, G, B) y MIN es el valor mínimo de esos mismos valores.

2. **Procesamiento de imágenes.** El procesamiento de imágenes es el conjunto de transformaciones al espacio donde se encuentran originalmente los datos de una imagen, con el objetivo de poner en evidencia o realzar un cierto conjunto de patrones espaciales o espectrales (Lira, 2010). El procesamiento digital de una imagen consta de una serie de etapas o pasos según sea el entorno en donde se realiza la aplicación. En el área de investigación científica el procesamiento de imágenes consta de once etapas: adquisición de imagen, mejoramiento de la imagen, restauración de la imagen, procesamiento de imagen a color, procesamiento de ondículas y multiresolución, compresión, procesamiento morfológico, segmentación, representación y descripción, reconocimiento y conocimiento base (Yadav, 2009).

a. **Adquisición de imagen.** Es la primera etapa del procesamiento de imágenes. Su objetivo es obtener una imagen a través de un sensor que detecte la iluminación, así como la reflexión u observación del objeto. En esta parte también se desarrolla un pre-procesamiento de la imagen obtenida, como escalar la misma. Un ejemplo claro para este proceso es el de obtener una imagen utilizando una cámara digital (Yadav, 2009).

b. **Mejoramiento de imagen.** Luego de obtener una imagen, es adecuado resaltar características de la imagen según el objetivo que se desea lograr al procesar la imagen. Por ejemplo, se puede incrementar el contraste de la imagen para resaltar detalles y poder apreciarlos de mejor manera (Yadav, 2009).

c. **Restauración de imagen.** Este proceso puede confundirse con el mejoramiento de la imagen. Se puede decir que el mejoramiento de imagen es un proceso subjetivo basado en la percepción humana. La restauración de la imagen es un proceso objetivo basado en modelos matemáticos y probabilísticos de la degradación de una imagen. Se realiza un análisis del porqué de la degradación para luego remover la razón utilizando métodos matemáticos. Por esta razón, un ejemplo común para utilizar la restauración de imagen es cuando la misma se ve afectada por alguna distorsión o ruido (Yadav, 2009).

d. **Procesamiento de imagen a color.** El procesamiento de imágenes a color utiliza modelos y procesos matemáticos donde se involucran imágenes a color. No es lo mismo tratar con una imagen en blanco y negro que una imagen a color. Las propiedades de la imagen son distintas y los métodos que se utilizan requieren de mayor capacidad de procesamiento de datos (Yadav, 2009).

e. **Procesamiento de ondículas y multiresolución.** Las ondículas son la base fundamental para representar imágenes en varios grados de resolución. En esta parte se aplican transformadas de un dominio a otro para lograr detectar o clasificar el tamaño de objetos, por ejemplo. Se basa en un procesamiento en el dominio de frecuencia donde distintas frecuencias corresponden a distintos tamaños de objetos. Por esta razón, las ondículas permiten analizar la información del espacio y la frecuencia combinadas, es decir, indica qué frecuencias existen en la imagen y dónde están localizadas en la misma (Yadav, 2009).

f. **Compresión.** Es una técnica utilizada para reducir el tamaño de almacenamiento en memoria al momento de guardar una imagen. De esta forma también se reduce el ancho de banda requerido para la transmisión de la misma (Yadav, 2009).

g. **Procesamiento morfológico.** Con este tipo de procesamiento de imágenes se logra detectar la forma de los objetos utilizando las herramientas pertinentes. Como resultado se obtienen atributos de la imagen (Yadav, 2009).

h. **Segmentación.** La segmentación consiste en convertir la imagen en pequeños segmentos para lograr extraer atributos de la imagen de una forma más precisa. Para ellos se implementan filtros en donde se realiza una convolución discreta en 2D de la imagen que se desea filtrar con una matriz cuadrada de orden n llamada comúnmente máscara o kernel. La máscara hace las veces de una ventana móvil cuyo centro recorre todos los píxeles que conforman a una imagen. El procedimiento de filtrado consiste en

reemplazar el valor central de la matriz de filtrado por un valor derivado de los valores de los píxeles vecinos y de una operación matemática (moda, mediana, laplaciano, gaussiano, etc.) (Yadav, 2009).

i. **Representación y descripción.** La representación extrae los atributos que son útiles para procesarlos a través de una computadora. La representación puede ser de bordes causados por las esquinas y las inflexiones, así como regional que se centra en las propiedades internas de la imagen como la textura, contraste, etc. La descripción, también denominada selección de características, extrae los atributos cuantitativos de interés. Puede utilizarse para diferenciar una clase de objetos de otra (Yadav, 2009).

j. **Reconocimiento.** En este proceso se da una etiqueta a los objetos detectados en la imagen. Esto se realiza basado en los parámetros definidos por el usuario en base a las características de los objetos que se desean identificar (Yadav, 2009).

k. **Base del conocimiento.** Puede definirse como el software que puede ayudar al usuario a procesar una imagen para mejorarla, restaurarla o comprimirla a través de métodos programados. Además, puede ser útil al momento de segmentar una imagen (Yadav, 2009).

3. **Visión de máquina.** Debido al desarrollo de la tecnología, especialmente en el poder computacional, se ha podido tener grandes avances en el procesamiento de imágenes y reconocimiento de patrones. Este concepto puede englobarse en el término visión de máquina y se ha venido aplicando de forma más abierta, uniforme y sistemática a lo largo de la última década dentro de la industria alimentaria (Davies, 2000).

Esta tecnología se ha venido aplicando particularmente en la inspección de productos durante su producción. En la industria alimentaria también es común encontrarla en la inspección de la materia prima proveniente de la agroindustria (Davies, 2000). Esto permite que su uso derive en aspectos propios de un proceso de producción, como lo es un control de calidad. Resulta mucho más efectivo incluso cuando se pretende mantener la calidad del producto en una planta donde se puede llegar a fabricar millones de "ejemplares" por día.

Para aplicar el concepto de visión de máquina se hace necesario poseer imágenes de lo que se desea visualizar. Para esto se utilizan dispositivos denominados cámaras. Existen cámaras especializadas para cumplir ciertos aspectos que se necesitan en la industria. En este caso se puede utilizar una cámara digital que posea interfaz continua con una computadora. Una vez obtenida una imagen se puede proceder a realizar

un análisis de la misma para obtener la información que se desea o requiere del producto con el que se trabaja (Davies, 2012).

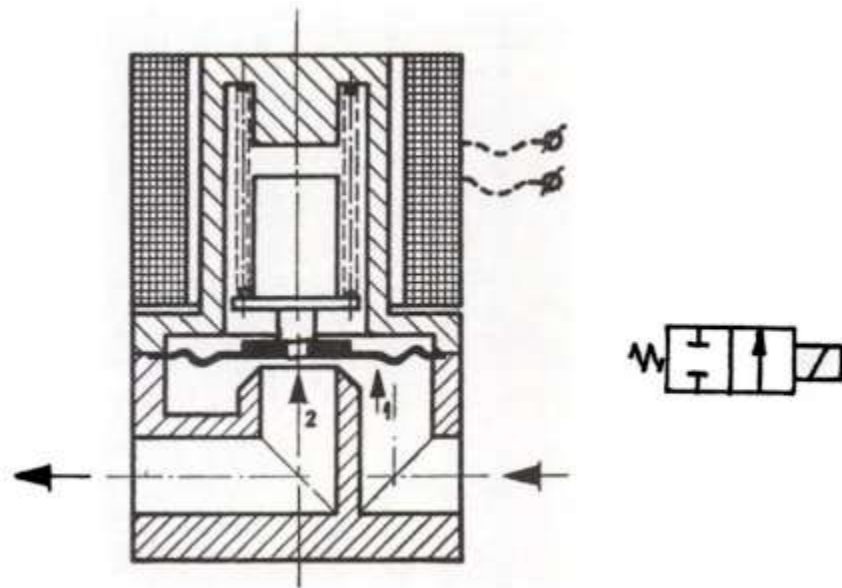
Por esta razón, se puede decir que el procesamiento de imágenes es la conversión de una imagen en otra donde el mismo objeto aparece en la misma posición relativa pero presentada en una sucesión de imágenes donde puede haberse aplicado una cancelación de ruido, resaltar bordes, detectar bordes, medir bordes y así identificar objetos y evaluarlos. Además de esto, se puede obtener una imagen en blanco y negro a partir de una imagen a color con el fin de definir sus límites para obtener representaciones de formas que luego pueden ser modificadas y analizadas.

El objetivo es entonces lograr extraer información de alto nivel mientras se trabaja solamente en el espacio de la imagen. A pesar de esto, si solamente se utilizara el procesamiento de imágenes se tendría poco desempeño y por esto se debe sumar alguna forma de mejorar el reconocimiento de patrones y así lograr su máximo desempeño. El reconocimiento de patrones se basa en que la computadora debería memorizar las características del objeto y su clasificación de tal manera que pueda interpretar automáticamente si ha alcanzado a detectar los mismos objetos (Webb, 2002). Cuando esto se logra se tiene la base para obtener un sistema con visión de máquina viable. Además, se debe tomar en cuenta que esto debe realizarse en tiempo real. Es un requerimiento que debe cumplirse para permitir el flujo de producto en la línea de producción.

E. ELECTROVÁLVULA NEUMÁTICA

En la industria son muchas las aplicaciones donde se precisa únicamente abrir o cerrar un conducto para controlar el paso de aire comprimido, gases o líquidos. Una de las aplicaciones comunes de este tipo de válvulas, generalmente denominadas electroválvulas neumáticas de dos vías/dos posiciones, es la expulsión de piezas por medio de un chorro libre. En la Figura 10 se logra apreciar una electroválvula de dos vías normalmente cerrada de maniobra por membrana. El paso de fluido se efectúa en el sentido que señala la flecha. Cuando la bobina ubicada en el núcleo no esté excitada se mantiene cerrado el orificio de paso señalado con el número 2 y el fluido pasa por el orificio 1 llenando así la cámara superior de la membrana. De esta forma se puede generar una presión mayor encima de la membrana con lo que la misma descende tapando así el orificio principal de paso. Al excitar la bobina se genera un campo magnético eleva el núcleo y consigue abrir el orificio de paso 2, despresurizando la cámara superior ya que el orificio 2 posee un mayor tamaño que el orificio 1 (Millán, 1998).

Figura 11. Electroválvula de 2 vías normalmente cerrada



V. DISEÑO EXPERIMENTAL

A. SELECCIÓN DE CÁMARA

Para seleccionar la cámara se tomaron en cuenta aspectos técnicos, así como la confianza que transmite la marca del producto al consumidor. Además de lo anterior, se optó por una solución económica dado que se trata del diseño de un prototipo. Existe un sinnúmero de dispositivos en el mercado de los cuales se podía elegir algún modelo, sin embargo, resaltó la calidad, precio y renombre de una cámara web fabricada por Logitech. Logitech es una compañía dedicada a la fabricación de productos electrónicos, específicamente periféricos para ayudar a interactuar a las personas con el mundo digital. Actualmente sus productos son comprados en casi cualquier país del mundo. Su inventario consta de productos dedicados a periféricos de PC, videojuegos, comunicaciones vía internet, música digital y entretenimiento. Desde su fundación en Suiza en el año 1981, Logitech ha sido pionero en la innovación de sus productos. Es por esto que esta marca se adecúa perfectamente a las necesidades del desarrollo del prototipo.

La cámara seleccionada es una Logitech HD Pro Webcam C920. Las especificaciones de esta cámara incluyen la toma de imágenes Full HD 1080p (1280 x 1080 píxeles), una de las mejores resoluciones actuales en el mercado. Además de esto posee corrección de luz baja haciendo que la toma de imágenes sea mejor en ambientes oscuros. Estas características nos permiten capturar mejores imágenes, aspecto necesario ya que se pretende clasificar objetos a través de su color. Probablemente la mayor desventaja viene de la mano con una de sus mayores ventajas. Tener una imagen de 1280 x 1080 píxeles conlleva a mayor capacidad para procesar información, traducido en mayor tiempo de procesamiento y mayor potencia consumida por la plataforma.

La forma de conexión de esta cámara es a través de puerto USB 2.0. Esto puede representar un problema ya que las velocidades de transmisión alcanzan los 480 Mbps. El promedio de tasa de transmisión de bits para una resolución 1080p es 20Mbps, por lo tanto para este prototipo no representa algún problema, sin embargo, si se desea contemplar el uso de múltiples cámaras, probablemente utilizar una conexión a través de un puerto USB 2.0 no sea lo adecuado y se deba cambiar a un puerto con mayor capacidad de transmisión de datos, como USB 3.0 o GigE visión cuyos protocolos permiten controlar cámaras con mayor capacidad de capturas por segundo (*Frames per second, FPS*, por sus siglas en inglés), ideales al momento de necesitar el análisis de objetos en un intervalo de tiempo muy corto.

A pesar de esto, la cámara Logitech HD Pro Webcam C920 posee una ventaja respecto a otras y es que posee un formato de compresión de datos denominado H.264. El estándar H.264 reduce la cantidad de información necesaria para reproducir un video. Utilizan la técnica de estimulación de movimiento con el fin

de encontrar texturas coincidentes. Esto es importante ya que se puede transmitir más información en el mismo ancho de banda disponible sin reducir la calidad del video o imagen transmitida.

Además de esto, la cámara posee una característica denominada *Autofocus* la cual permite tener una imagen más nítida de los objetos que se desean capturar en una imagen. Esto es importante ya que las imágenes obtenidas no presentan distorsión o ruido apreciable al ojo humano, permitiendo tener bordes definidos y una apariencia clara de los objetos, ideal para poder detectarlos, diferenciarlos y seleccionarlos. Además de esto, posee el respaldo de la compañía Carl Zeiss en los lentes u objetivos que posee. Zeiss International es una reconocida empresa en el campo de la óptica y optoelectrónica fundada hace 170 años. Posee trabajos en las áreas de microscopía, tecnología médica, espectroscopía, lentes de cámara y cine, lentes para aplicaciones industriales, etc.

B. SELECCIÓN DE SOFTWARE

Debido a que se quiere realizar un prototipo para demostrar la funcionalidad de la tecnología propuesta, el *software* a utilizar debe elegirse de manera correcta para obtener un resultado robusto y siempre cuidando el presupuesto disponible. Si bien es cierto que existen licencias de programas, muchas veces pueden costar cientos de dólares. Esta es una opción a tomar en cuenta, quizá para futuras mejoras, ya que existe un soporte de parte de los desarrolladores al momento de que algún problema se presente.

Otra opción es inclinarse por el uso de *software Open Source* ya que existe un gran respaldo de la comunidad que apoya este tipo de programas y se han venido desarrollando excelentes librerías para el procesamiento de imágenes. Además de esto, no representaría ningún gasto para la empresa y el resultado es, prácticamente, el mismo si se compara con algún programa adquirido por medio de una licencia. Dicho esto, y con la ayuda de la plataforma que se utiliza en el desarrollo del proyecto, se decidió inclinarse por este tipo de *software*.

El *software* con el cual se implementó el dispositivo se denomina OpenCV y su versión es la 3.1.0. Este paquete de librerías incluye las mismas para el manejo de cámaras, preprocesamiento de imágenes, restauración de la imagen, filtros que se deban aplicar, transformaciones de un modo de color a otro, etc. Además de esto está disponible para poder escribir en lenguaje *Python* o *C++*.

Con este *software* se obtiene un ambiente robusto para desarrollar programas, el apoyo de una comunidad de usuarios y desarrolladores que pueden respaldar en el momento de tener algún problema, no se incurre en costos por adquisición de licencias y se puede instalar de forma sencilla en la plataforma seleccionada.

La elección de utilizar las librerías de OpenCV se basó en la gran cantidad de documentación que existe para dichas librerías, además de ser capaz de utilizarse en distintos lenguajes de programación sin presentar grandes variantes en el código de la implementación. Siendo este proyecto un prototipo donde se pretende detectar objetos con cierto color para poder retirarlos de la línea de producción se considera que es una librería bastante robusta para poder seguir mejorando el algoritmo en un futuro sin la necesidad de comenzar desde cero.

C. SELECCIÓN DE PLATAFORMA

En la actualidad existen distintas plataformas para poder desempeñar tareas básicas a nivel computacional. Sin embargo, es necesario poder seleccionar una plataforma que contenga la suficiente capacidad de procesamiento de datos para que el sistema funcione como un sistema embebido. La plataforma debe ser capaz de aceptar una cámara digital, ya sea a través de conexión *Universal Serial Bus* (USB) o algún puerto especial que posea la plataforma. Además de eso, debe ser capaz de procesar la imagen capturada, tomando en cuenta los pasos que se detallaron en el marco teórico. El tiempo es una variable esencial en la línea de producción, por esa razón se debe optar por una plataforma con bastante poder computacional.

Además de eso, la plataforma debe ser capaz de soportar las librerías necesarias para realizar el procesamiento de imágenes. Aunque el algoritmo a desarrollar se pueda implementar en distintos lenguajes de programación, se debe conocer el software en el cual se debe trabajar para determinar si la plataforma soporta o no el software computacional requerido. En este caso, como se explica anteriormente, se utilizó una librería que puede ser desarrollada en el lenguaje de programación *Python 2.7* sobre el cual se poseen los conocimientos necesarios para el desarrollo del algoritmo.

Dado que la cámara a utilizar es una Logitech C920 HD Pro Webcam y su interfaz de conexión es USB, la plataforma debe tener puertos USB disponibles para ser utilizados. La memoria no es estrictamente necesaria en este caso ya que no se guardan las imágenes capturadas por el sistema.

Para llegar a cumplir con estos requerimientos y debido al software que se seleccionó para desarrollar el proyecto se optó por utilizar una plataforma de desarrollo basada en el sistema operativo Linux. Las plataformas basadas en Linux poseen la ventaja de ser plataformas de desarrollo libre. Existe una gran comunidad de desarrolladores que brindan ayuda y documentación necesaria para lograr los objetivos del proyecto. Cabe destacar que se han desarrollado distintas plataformas basadas en este sistema operativo para desarrollar todo tipo de proyectos, por esta razón, resulta una buena opción para desarrollar el proyecto.

D. CONFIGURACIÓN DE LA PLATAFORMA

Raspberry Pi es una fundación que trabaja para llevar los sistemas digitales a las manos de las personas alrededor del mundo para que sean capaces de entender y formar el creciente mundo digital. De esta forma también pueden ser capaces de resolver problemas convenientes para ellos y lograr también darles herramientas para obtener alguna plaza de trabajo en un futuro. Esto se realiza a través de computadoras de alto desempeño a bajo costo que las personas utilizan para aprender, resolver problemas y divertirse. Desarrollan recursos gratis para ayudar a las personas a aprender computación y a hacer proyectos con computadoras y a entrenar a educadores para guiar a otras personas para aprender.

La plataforma Raspberry Pi 3 es la tercera generación de dispositivos fabricados por la compañía. Posee un procesador ARMv8 *quad-core* a 1.2GHz de frecuencia de reloj y un tamaño de palabra de 64 bits. Su memoria RAM es de 1GB, acelerador de gráficos 3D VideoCore IV y una ranura para tarjetas Micro SD. Entre sus periféricos destacan sus 4 puertos USB, 40 pines de entrada y salida de propósito general (*General Purpose Input/Output* GPIO), puerto HDMI, puerto ethernet, interfaz de cámara, display, Bluetooth 4.1 y Bluetooth Low Energy (BLE).

Teniendo en cuenta lo anterior se procedió a instalar el sistema operativo en la plataforma. La página oficial de Raspberry Pi brinda un sistema operativo llamado Raspbian Jessie. Existen dos versiones de ese sistema operativo, se optó por instalar la versión completa ya que incluye librerías para poder controlar de forma remota la computadora, herramienta útil al momento de querer realizar mantenimiento a la misma. Raspbian Jessie es un sistema operativo basado en Debian Linux. Es ideal ya que viene con el lenguaje de programación *Python 2.7* instalado por defecto y muchas de sus aplicaciones, incluso el editor de su ventana principal está escrito en *Python*.

Una vez instalado el sistema operativo se procede a instalar las librerías necesarias para desarrollar el algoritmo. Esto se realiza a través del cliente SSH (Secure Shell) a través de una red de área local. Existe una serie de pasos para lograr realizar de los cuales se detallará los aspectos generales. Es necesario tener actualizado el sistema operativo y asegurarse que la memoria micro SD tenga espacio suficiente (al menos 4 GB) de memoria para instalar todo lo necesario. Hecho eso se debe instalar las herramientas de desarrollador que nos permiten crear, depurar, mantener o darle soporte a los programas o aplicaciones. Luego se instalan las librerías requeridas para manipular imágenes y videos, como los *codecs* para permitir abrir y manipular los archivos en formato de imagen, como JPEG, PNG, TIFF, etc.

Existe un módulo especial para una cámara ensamblada por el fabricante, sin embargo, se va a utilizar una cámara distinta conectada a un puerto USB por lo que es necesario instalar otra librería a la instalada por

defecto. Esto permitirá utilizar métodos programados en la librería OpenCV. El controlador necesario para esto se denomina Video4Linux. Luego de realizar estos pasos se debe configurar *Python*, ya sea la versión 2.7 o la versión 3. Incluso puede instalarse OpenCV 3.1.0 para ambas versiones. Luego se procede a descargar, configurar, compilar e instalar OpenCV. Este proceso es bastante largo y dependerá de la plataforma donde se implemente.

E. DESARROLLO DEL ALGORITMO

Teniendo ya el software que se va a utilizar para realizar el procesamiento de imágenes se procede a plantear un algoritmo capaz de realizar las operaciones requeridas. Se eligió el lenguaje de programación *Python* para desarrollar el algoritmo debido a que es un lenguaje sencillo y robusto con una comunidad de desarrolladores bastante amplia y que sigue en ascendiendo debido a la gran compatibilidad que maneja ya que puede implementarse en la gran mayoría de plataformas actuales. Además de esto, tiene licencia de distribución libre que puede ser utilizado incluso en productos comerciales. Además de esto, *Python* tiene la ventaja de que puede utilizarse como un lenguaje de programación orientado a objetos. Si bien es cierto no se buscaba utilizar ese paradigma de la programación, se implementó debido a la necesidad de utilizar temporizadores en el prototipo. De la mano de la gran comunidad de desarrolladores deriva la gran cantidad de documentación que posee este lenguaje de programación.

Para desarrollar el algoritmo se procuró seguir las etapas del procesamiento de imágenes. De esta forma, la captura de imágenes se obtiene a través de la cámara web que funciona en este caso como el sensor que captura la luz reflejada por el producto. Para poder obtener una imagen a través de la cámara web se utilizó la librería de OpenCV denominada VideoCapture. Esta librería permite el uso de la cámara web como si estuviera tomando un video, sin embargo, no se requiere de almacenamiento en memoria ya que se realiza a través de un *buffer* en el cual se pueden obtener un *frame* que puede utilizarse como una imagen. A partir de esta imagen se aplica una máscara la cual realiza una operación matemática donde se multiplica la matriz de la imagen por una matriz cuyos valores están dados por un rango de posibles tonos de colores en el modo de color HSV. El resultado es un arreglo donde lo que no cumple con el rango se torna color negro y lo que sí cumple se torna color blanco. A partir de allí se pueden detectar patrones y obtener sus coordenadas en la pantalla para poder conocer la posición y de esa manera inicializar los temporizadores que se encargarán de activar las electroválvulas neumáticas.

F. SELECCIÓN DE ACTUADORES NEUMÁTICOS

Las válvulas solenoides neumáticas juegan un papel muy importante dentro del desarrollo del prototipo. Es sabido que en el momento de contar con dispositivos mecánicos se debe tomar en cuenta el tiempo de ejecución que manejan los mismos. No es una novedad encontrarse con tiempos críticos de respuesta en los sistemas marcados por los actuadores mecánicos. Debido a que se debe clasificar una gran cantidad de producto en un tiempo corto, se debe considerar electroválvulas neumáticas de rápida conmutación. Probablemente no sea necesario este tipo de actuadores para un prototipo, sin embargo, se piensa en una posible expansión del prototipo en la cual no se deba cambiar de dispositivos ya que esto significaría un gasto extra para la empresa.

Además de eso, se debe contar con el respaldo y garantía de una marca reconocida a nivel mundial y con representación en Guatemala. Existen varios tipos de actuadores neumáticos, pero se consideró utilizar actuadores fabricados por Festo. Festo es una empresa dedicada a brindar soluciones en cualquier segmento industrial en cualquier parte del mundo. Están presentes en 176 países y brindan soporte al momento de montar equipos o al realizar instalaciones eficientes dentro de la planta. En muchos países, por ejemplo México, Festo se ha logrado colocar como una marca líder en automatización neumática. Por esta razón se decidió utilizar esta marca, además de tomar las recomendaciones hechas por personal de la empresa.

No solamente contar con el respaldo de una buena marca es importante. Luego de investigar dentro de su catálogo de productos, se encontró con que poseen electroválvulas de conmutación rápida. Este tipo de válvulas poseen las dimensiones adecuadas para utilizarse en el prototipo y poseen tiempos de encendido y apagado en el orden de los milisegundos. Además de esto, dado que son electroválvulas necesitan solamente de una señal de encendido/apagado por parte del controlador, en este caso la plataforma Raspberry Pi.

VI. RESULTADOS

A. VISIÓN DE MÁQUINA

Figura 12. Captura en ambiente controlado 1



Figura 13. Transformación RGB a HSV en ambiente controlado 1

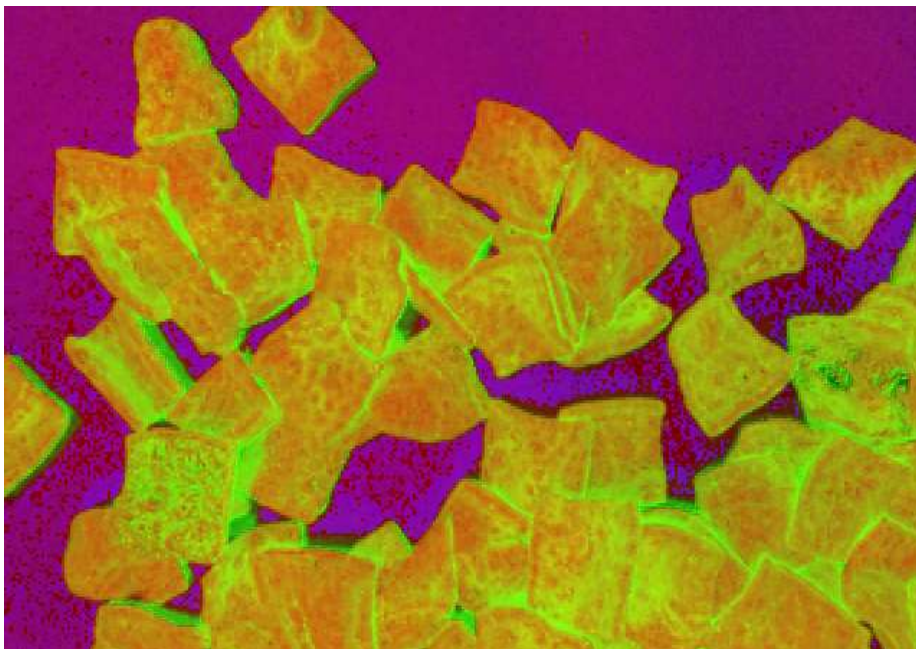


Figura 14. Resultado luego de aplicar máscara en ambiente controlado 1



Figura 15. Contornos encontrados para el ambiente controlado 1



Figura 16. Resultado de imagen en ambiente controlado 1

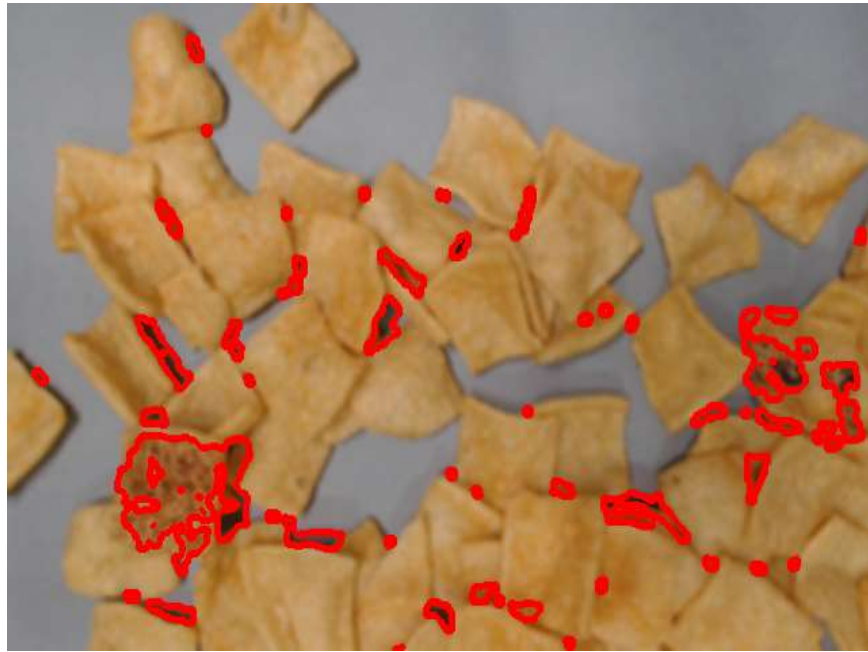


Figura 17. Captura en ambiente controlado 2



Figura 18. Transformación RGB a HSV en ambiente controlado 2

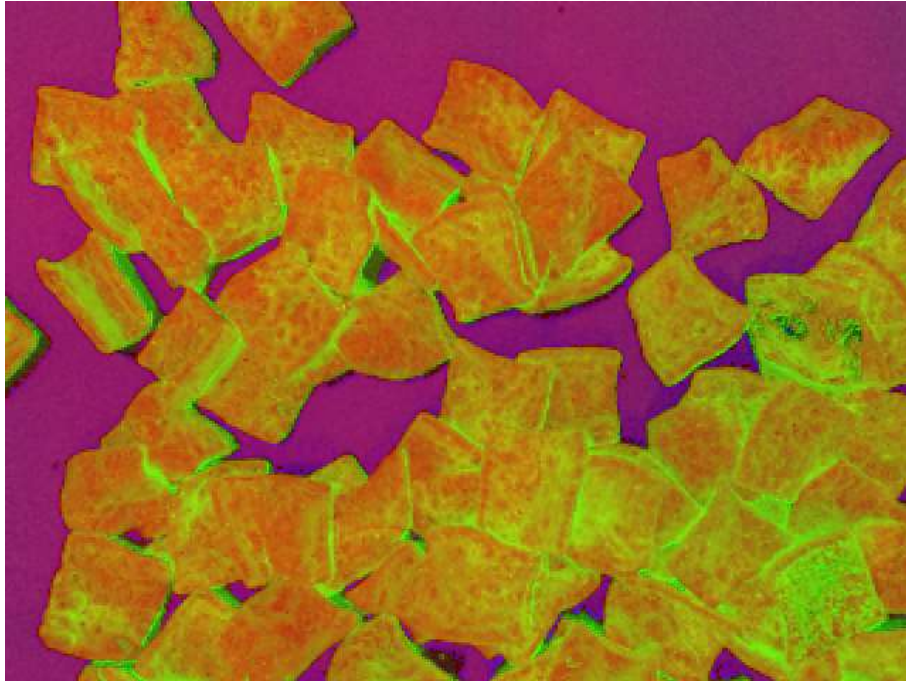


Figura 19. Resultado luego de aplicar máscara en ambiente controlado 2



Figura 20. Contornos encontrados para el ambiente controlado 2



Figura 21. Resultado de imagen en ambiente controlado 2



Figura 22. Captura en ambiente controlado 3



Figura 23. Resultado luego de aplicar máscara en ambiente controlado 3

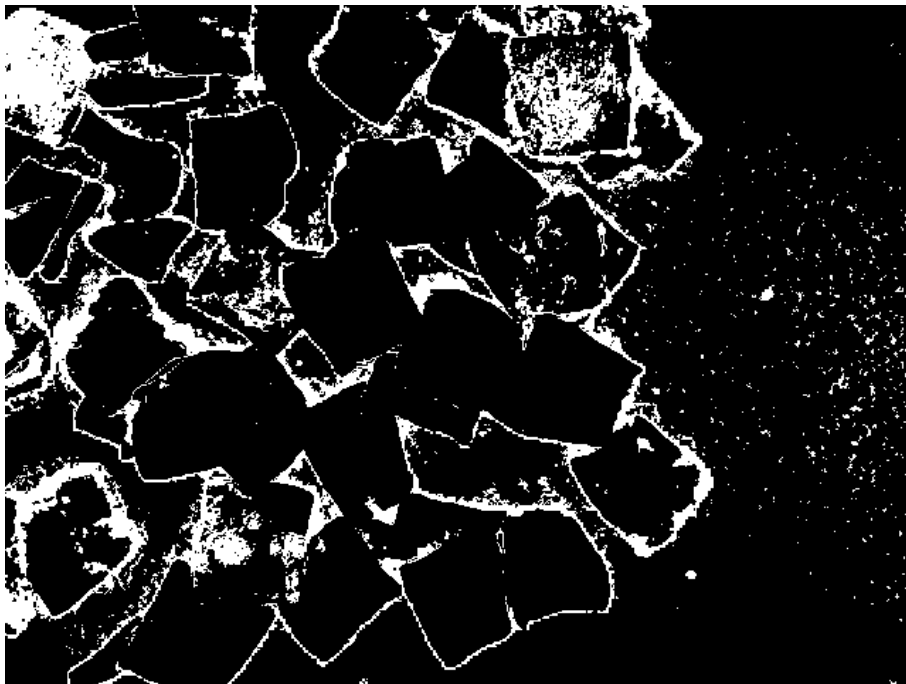


Figura 24. Contornos encontrados para el ambiente controlado 3

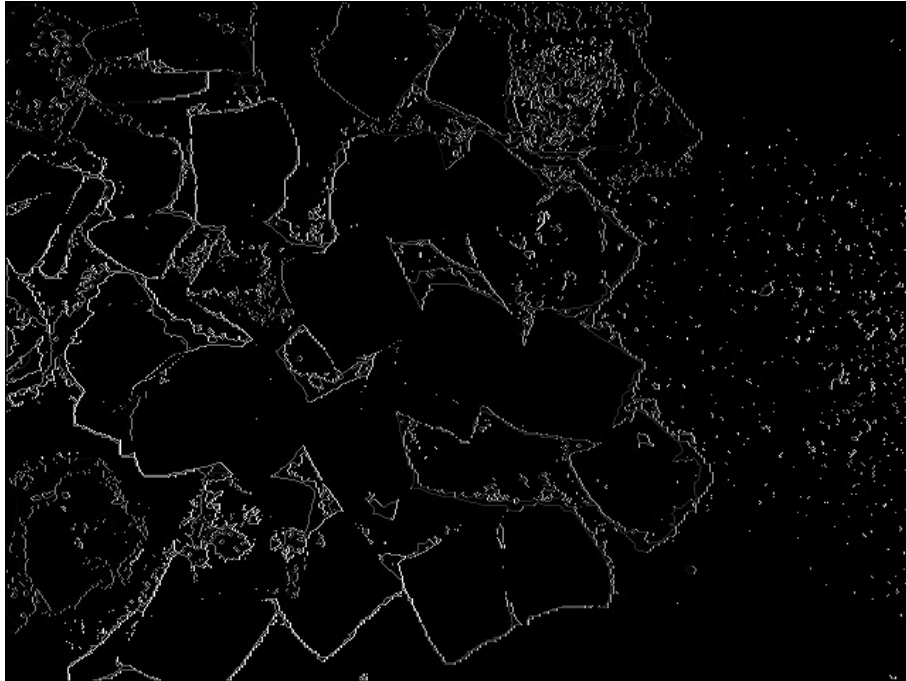


Figura 25. Resultado de imagen en ambiente controlado 3



Figura 26. Captura en ambiente controlado 4



Figura 27. Resultado luego de aplicar máscara en ambiente controlado 4

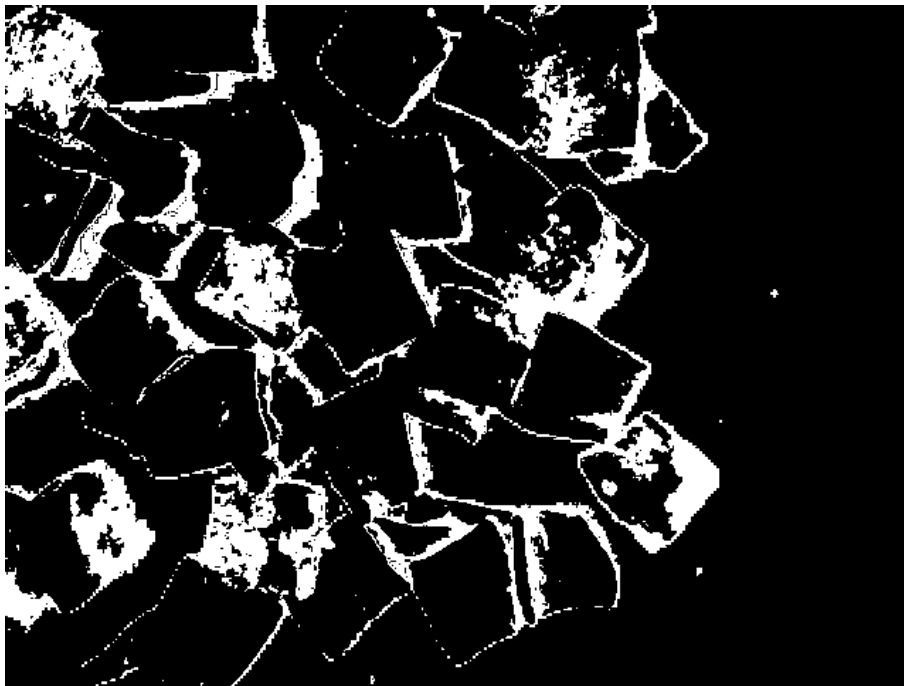


Figura 28. Contornos encontrados para el ambiente controlado 4

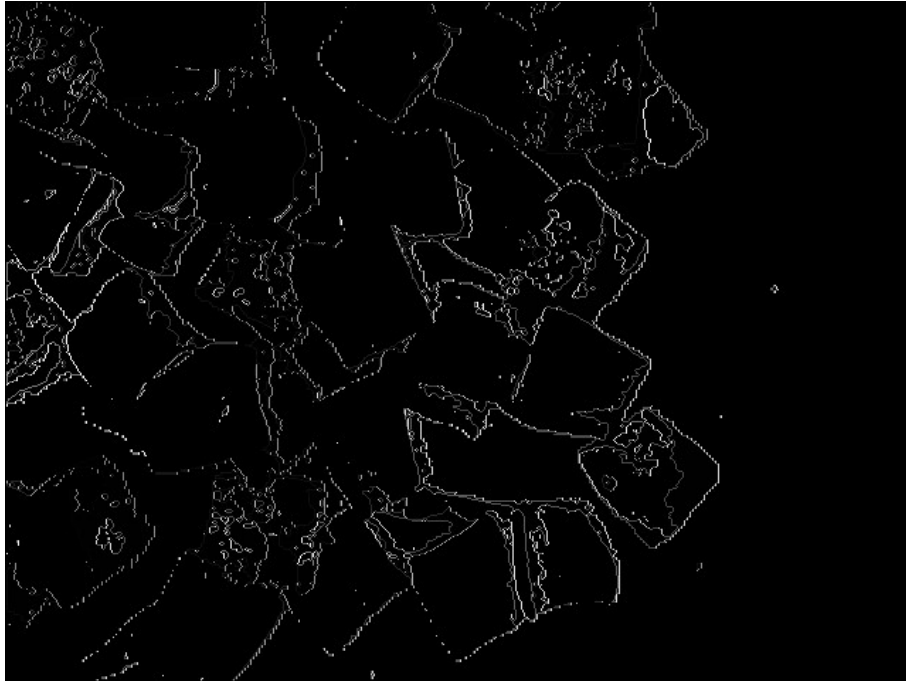


Figura 29. Resultado de imagen en ambiente controlado 4



Figura 30 .Captura en ambiente no controlado 1



Figura 31. Transformación RGB a HSV en ambiente no controlado 1

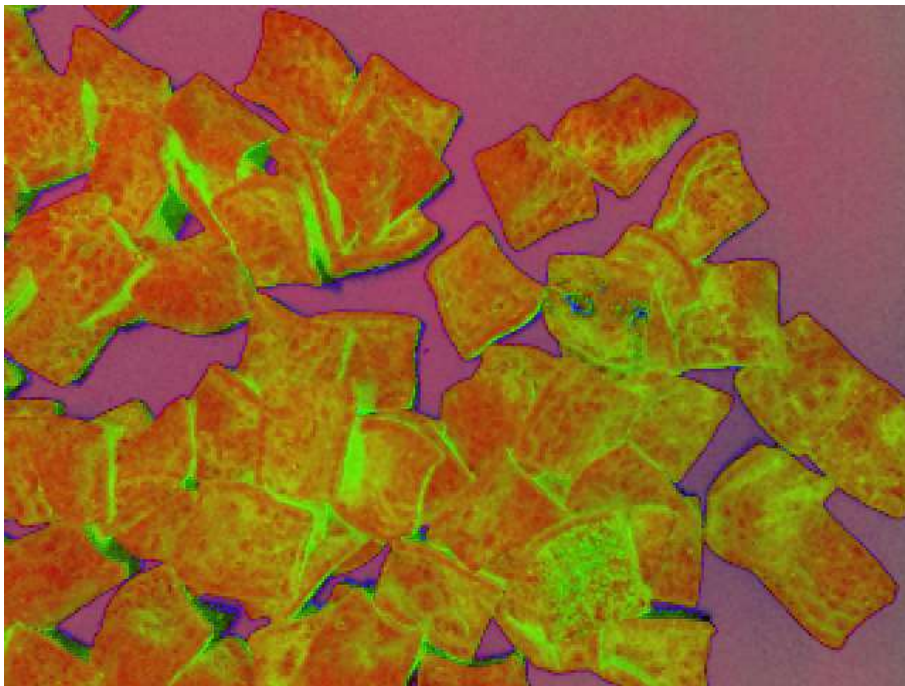


Figura 32. Resultado luego de aplicar máscara en ambiente no controlado 1



Figura 33. Contornos encontrados para el ambiente no controlado 1



Figura 34. Resultado de imagen en ambiente no controlado 1



Cuadro 1. Tiempo local y total de métodos empleados en análisis de imágenes utilizando filtro bilateral

Método	Sub-método	Tiempo local	Tiempo total
bilateralBlur		1.18	0
	bilateralFilter	1.18	1.18
mascara		0.002	0.327
	imshow	0.528	0.528
	cvtColor	0.204	0.204
	inRange	0.055	0.055
	erode	0.021	0.021
	dilate	0.016	0.016
	numpy.core.multiarray.array	0.002	0.002
analisis		0.002	0.064
	findContours	0.038	0.038
	drawContours	0.021	0.021
	moments	0.001	0.001
	contourArea	0.001	0.001
	range	0	0
	"append" de "list"	0	0
	len	0	0
	circle	0	0

Cuadro 2. Tiempo local y total de métodos empleados en análisis de imágenes utilizando desenfoque gaussiano

Método	Sub-método	Tiempo local	Tiempo total
gaussianBlur		0.113	0
	GaussianBlur	0.113	0.113
maska		0.444	0.005
	imshow	0.623	0.528
	cvtColor	0.248	0.204
	inRange	0.077	0.055
	erode	0.035	0.021
	dilate	0.024	0.016
	numpy.core.multiarray.array	0.004	0.002
analisis		0.051	0.002
	findContours	0.034	0.034
	drawContours	0.013	0.013
	moments	0.001	0.001
	contourArea	0.001	0.001
	range	0	0
	"append" de "list"	0	0
	len	0	0
	circle	0.001	0.001

Cuadro 3. Comparación de tiempos entre el filtro bilateral y el desenfoque gaussiano

Método	Sumatoria de tiempo total	Método	Sumatoria de tiempo total	Relación
bilateralBlur	1.18	gaussianBlur	0.113	10.44
maska	1.153	maska	0.831	1.387
analisis	0.125	analisis	0.052	2.404
Total	2.458	Total	0.996	2.468

Cuadro 4. Tiempo de ejecución de 100 ciclos en ambas plataformas

Dispositivo	Despliegue en pantalla	Tiempo total (s)	Diferencia (s)
MSI GE70 2PE	Sí	4.065	0.072
	No	3.993	
Raspberry Pi B+	Sí	79.72	24.483
	No	55.24	

Figura 35. Interacción de métodos y funciones del algoritmo implementado en la plataforma Raspberry Pi B+

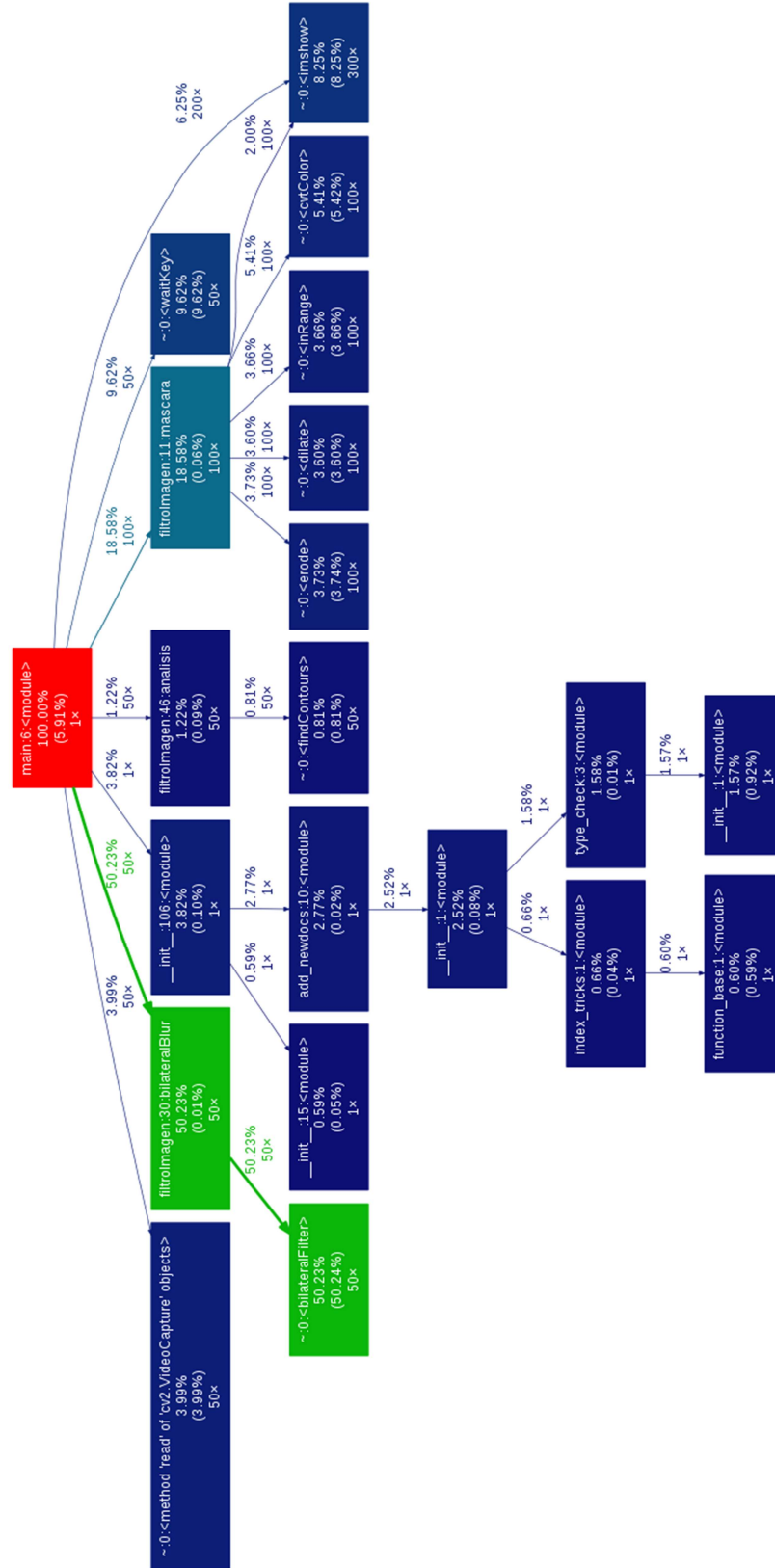


Figura 37. Interacción entre métodos y funciones del algoritmo implementado en Raspberry Pi B+ habilitando el despliegue de imágenes

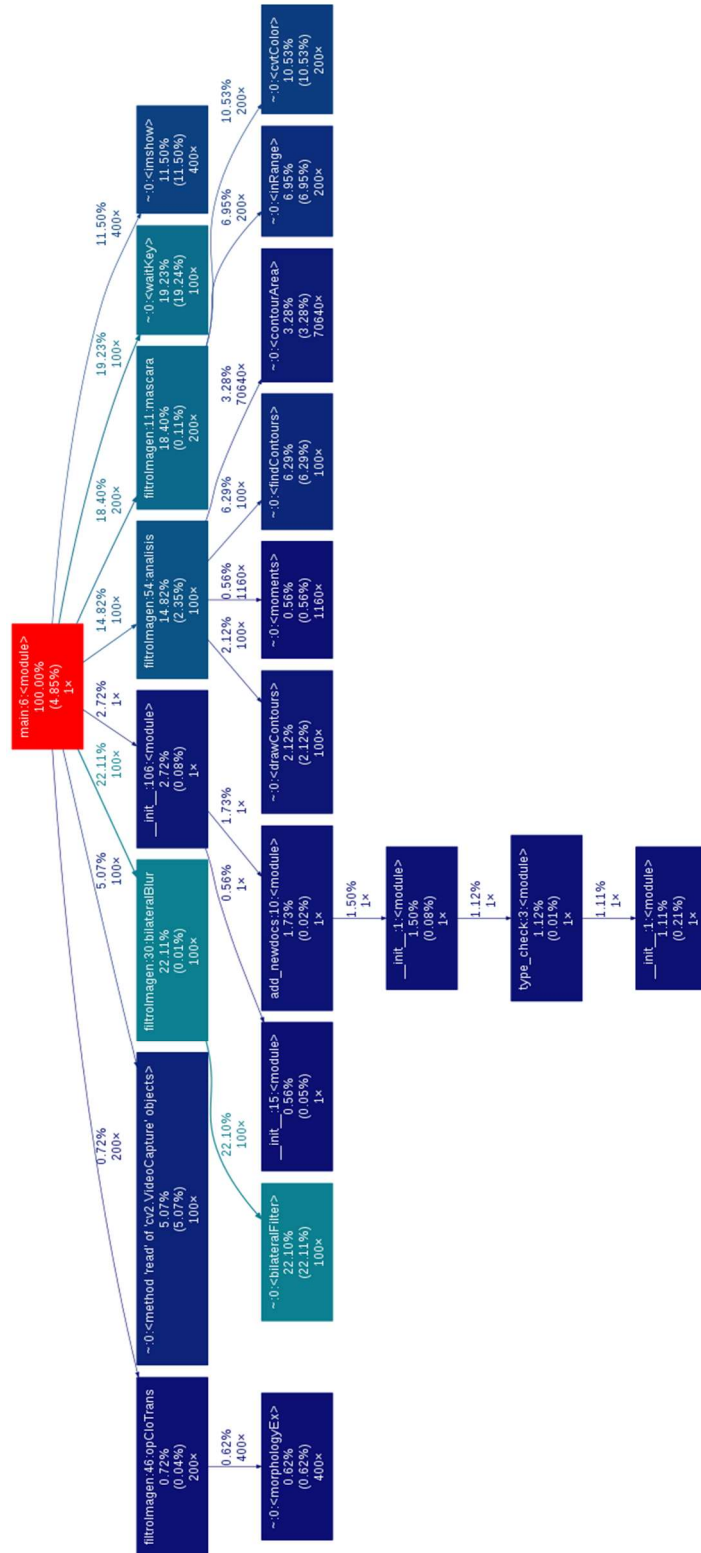
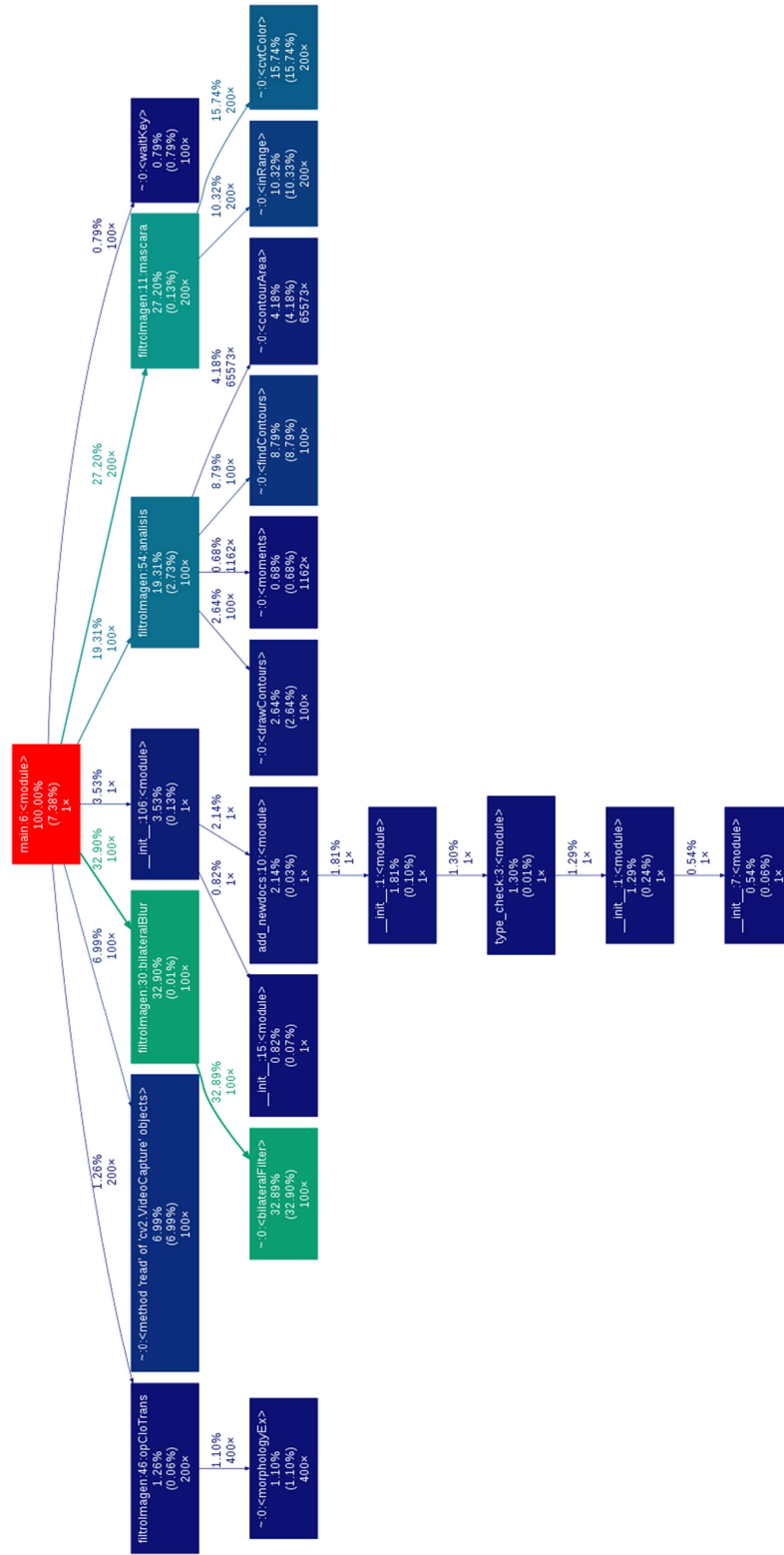


Figura 38. Interacción entre métodos y funciones del algoritmo implementado en Raspberry Pi B+ deshabilitando el despliegue de imágenes



B. TIEMPOS CRÍTICOS DE EJECUCIÓN

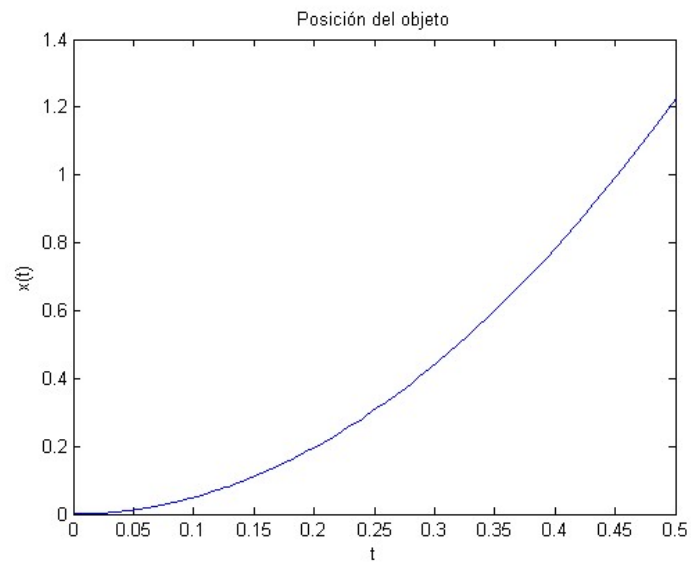
Cuadro 5. Tiempo máximo entre capturas

Iteración	Distancia (m)	Tiempo (s)
1	0.7	4.11
	0.5	4.5
2	0.7	4.04
	0.5	4.85
3	0.7	4.09
	0.5	4.92
4	0.7	4.21
	0.5	4.88
5	0.7	4.06
	0.5	4.94
6	0.7	4.1
	0.5	4.9
7	0.7	3.99
	0.5	4.85
8	0.7	3.95
	0.5	4.83
9	0.7	4.07
	0.5	4.87
10	0.7	3.95
	0.5	4.92
11	0.7	4.1
	0.5	4.86
12	0.7	4.09
	0.5	4.79

Cuadro 6. Tiempo máximo promedio de inicio a fin de la captura

Distancia (m)	Tiempo promedio (s)
0.6	4.06
0.5	4.84

Figura 41. Comportamiento de la caída del objeto al final de la banda transportadora



C. ESTRUCTURA

Figura 42. Vista izquierda de la estructura con dimensiones en centímetros

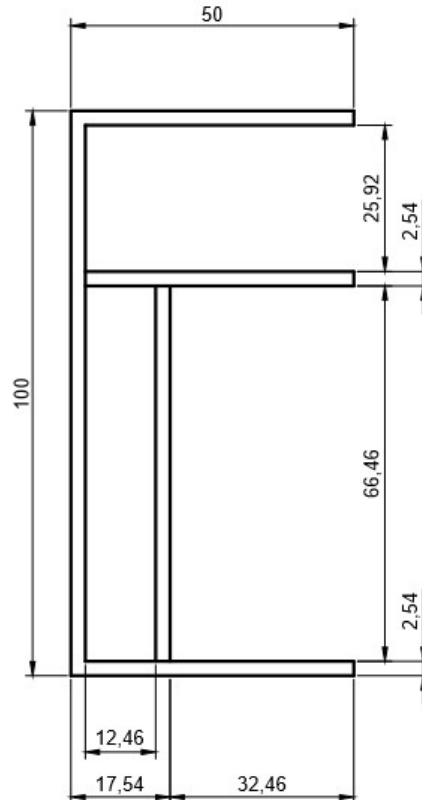


Figura 43. Vista trasera de estructura con dimensiones en centímetros

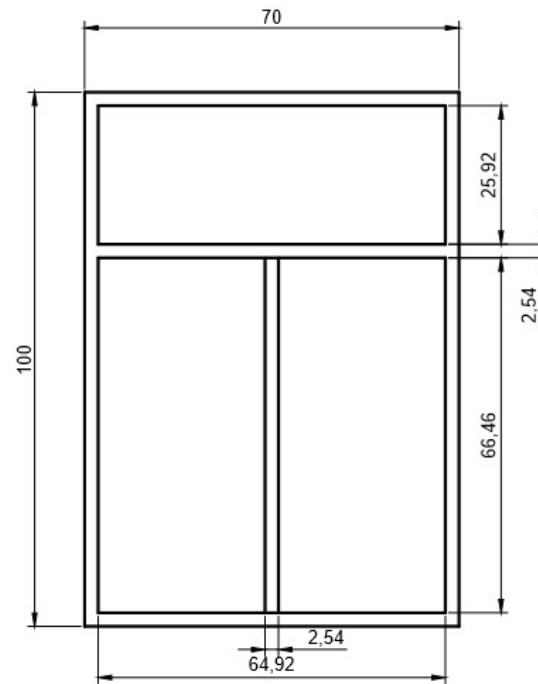


Figura 44. Vista frontal de estructura con dimensiones en centímetros

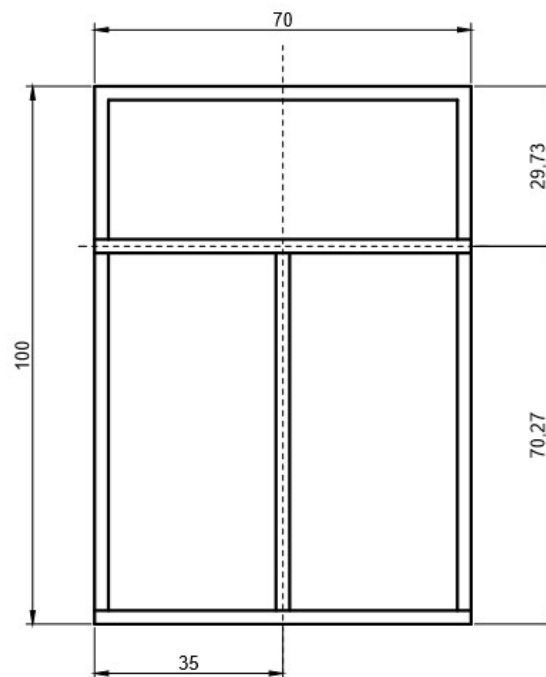


Figura 45. Vista superior de estructura con dimensiones en centímetros

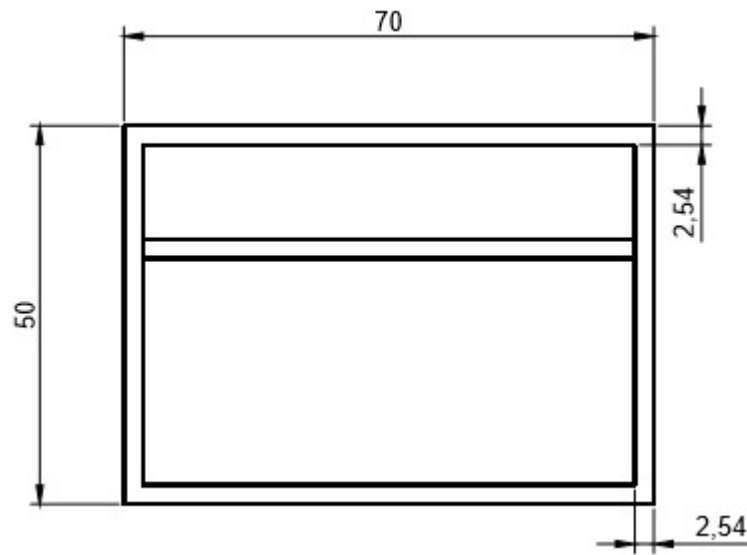


Figura 46. Vista inferior de estructura con dimensiones en centímetros

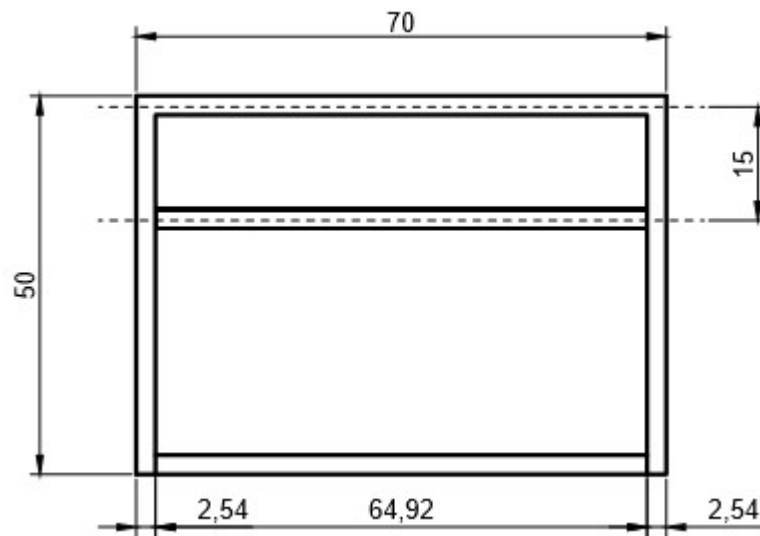


Figura 47. Vista izquierda de estructura con recubierto de hoja de lata

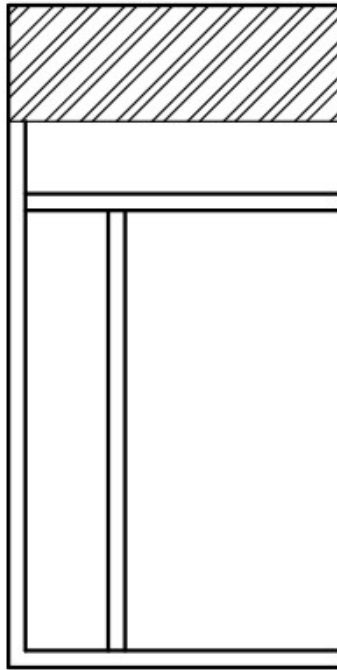


Figura 48. Vista trasera de estructura con recubierto de hoja de lata

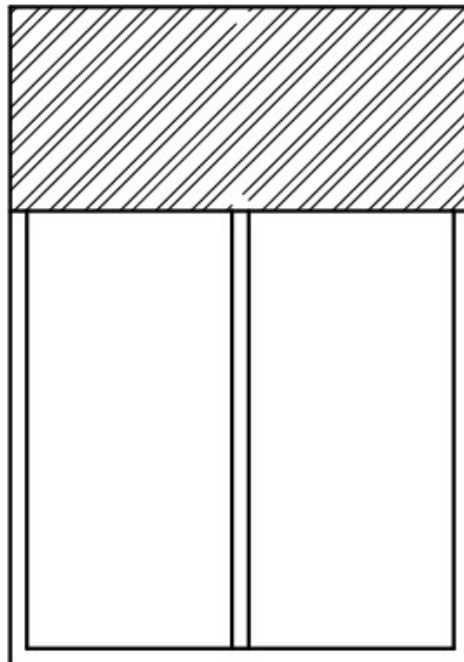


Figura 49. Vista frontal de estructura con recubierto de hoja de lata

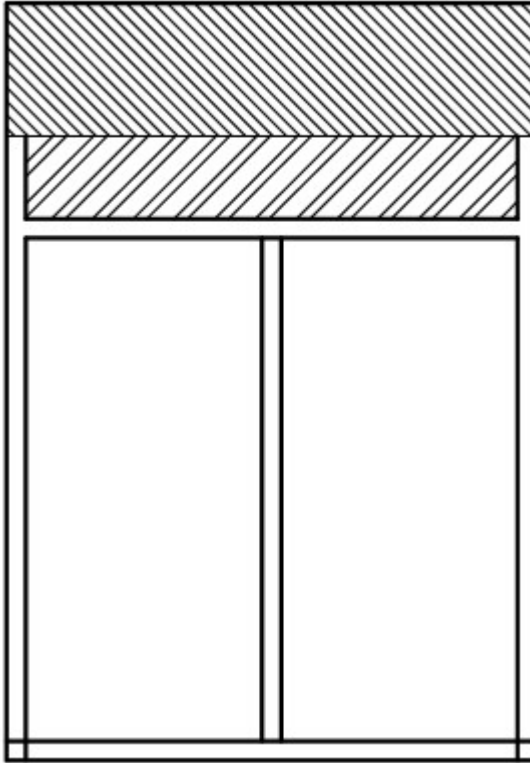


Figura 50. Vista superior de estructura con recubierto de hoja de lata

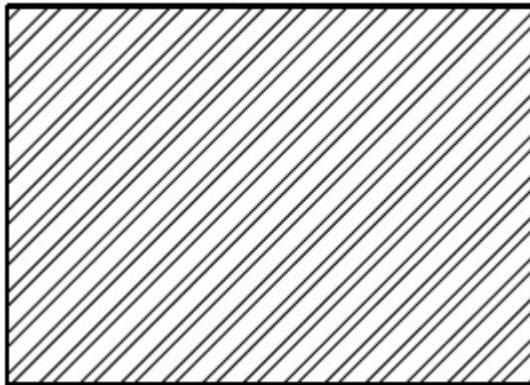


Figura 51. Vista inferior de estructura con recubierta de hoja de lata

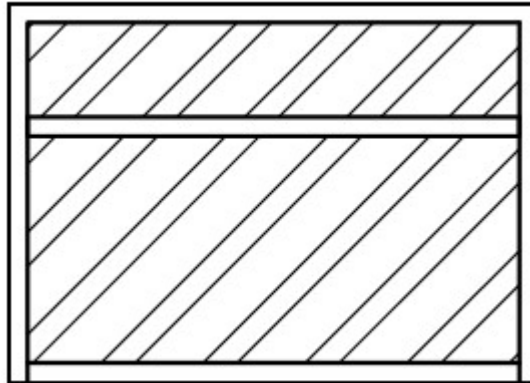


Figura 52. Modelado 3D frontal de estructura final

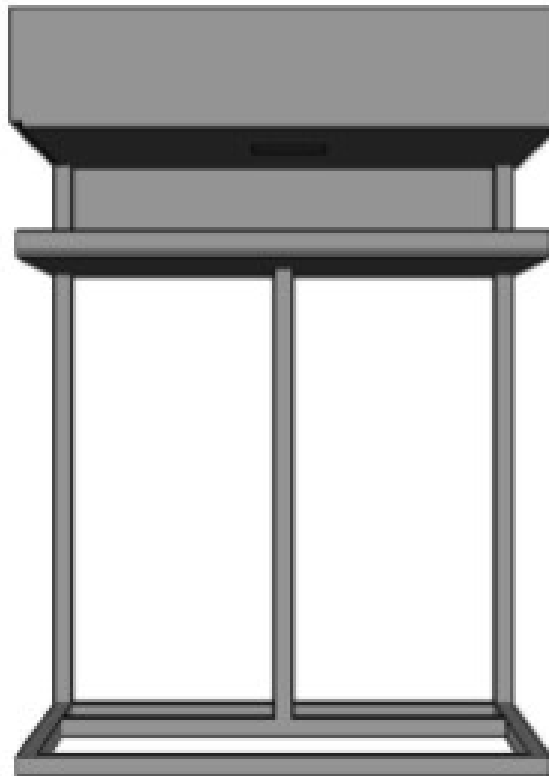


Figura 53. Modelado 3D lateral de estructura final

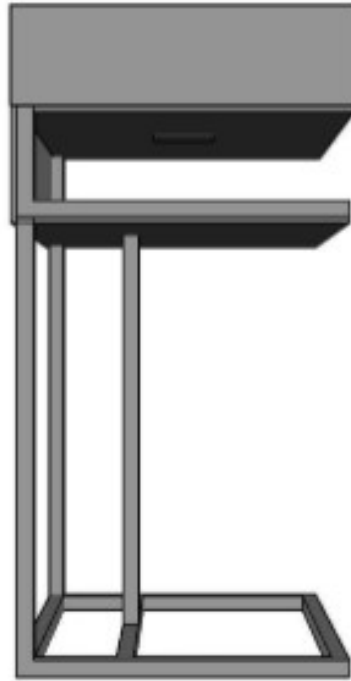


Figura 54. Isométrico de estructura final

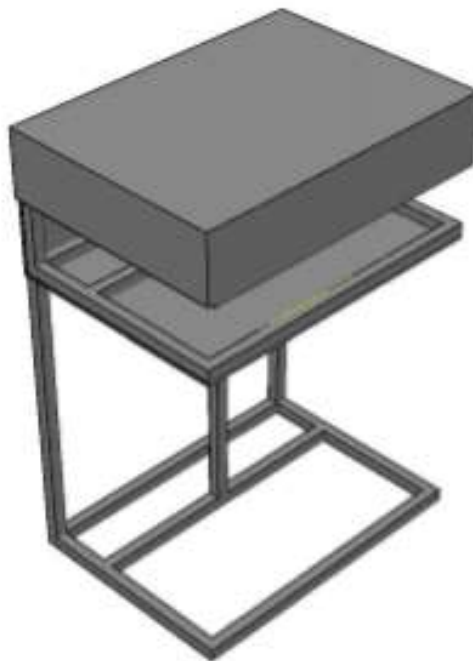


Figura 55. Detalle de instalación de válvulas solenoides neumáticas

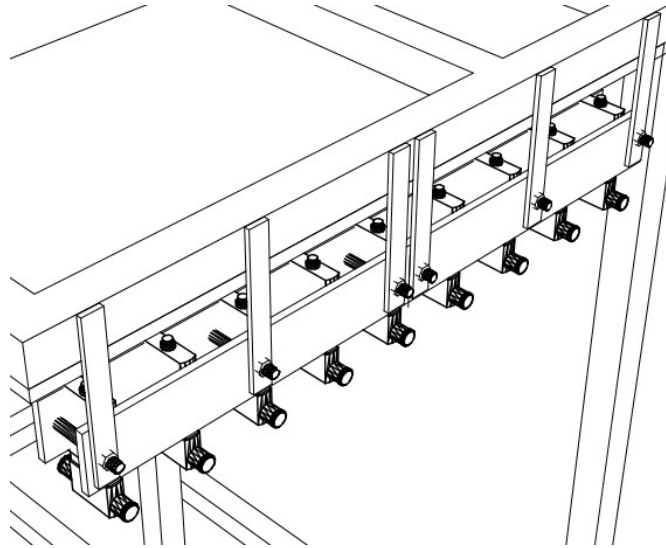
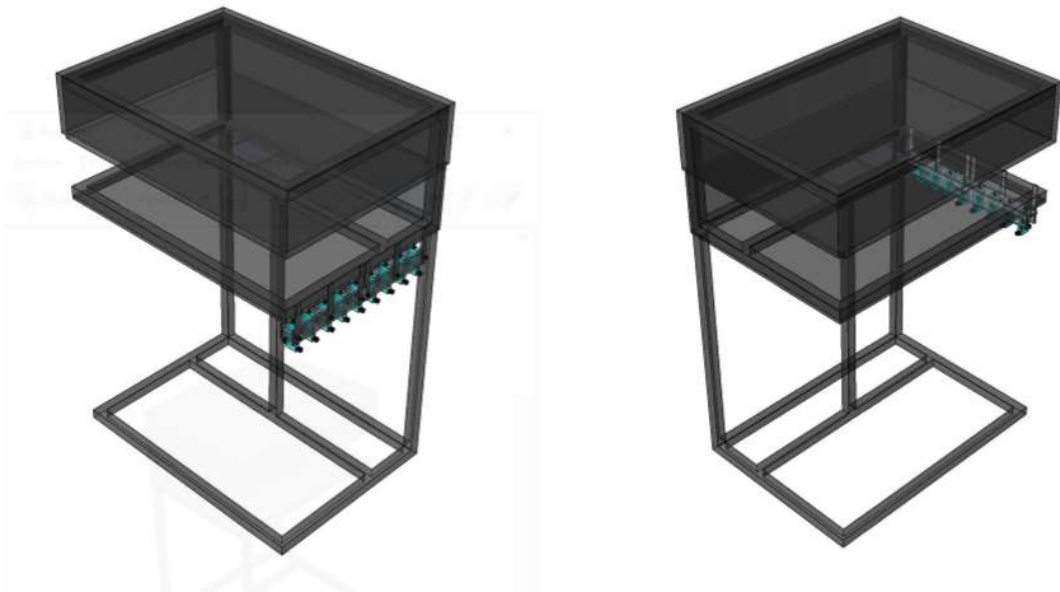


Figura 56. Vistas de estructura final y posición de válvulas solenoides neumáticas



D. DIAGRAMA ELÉCTRICO

Figura 57. Diagrama eléctrico general

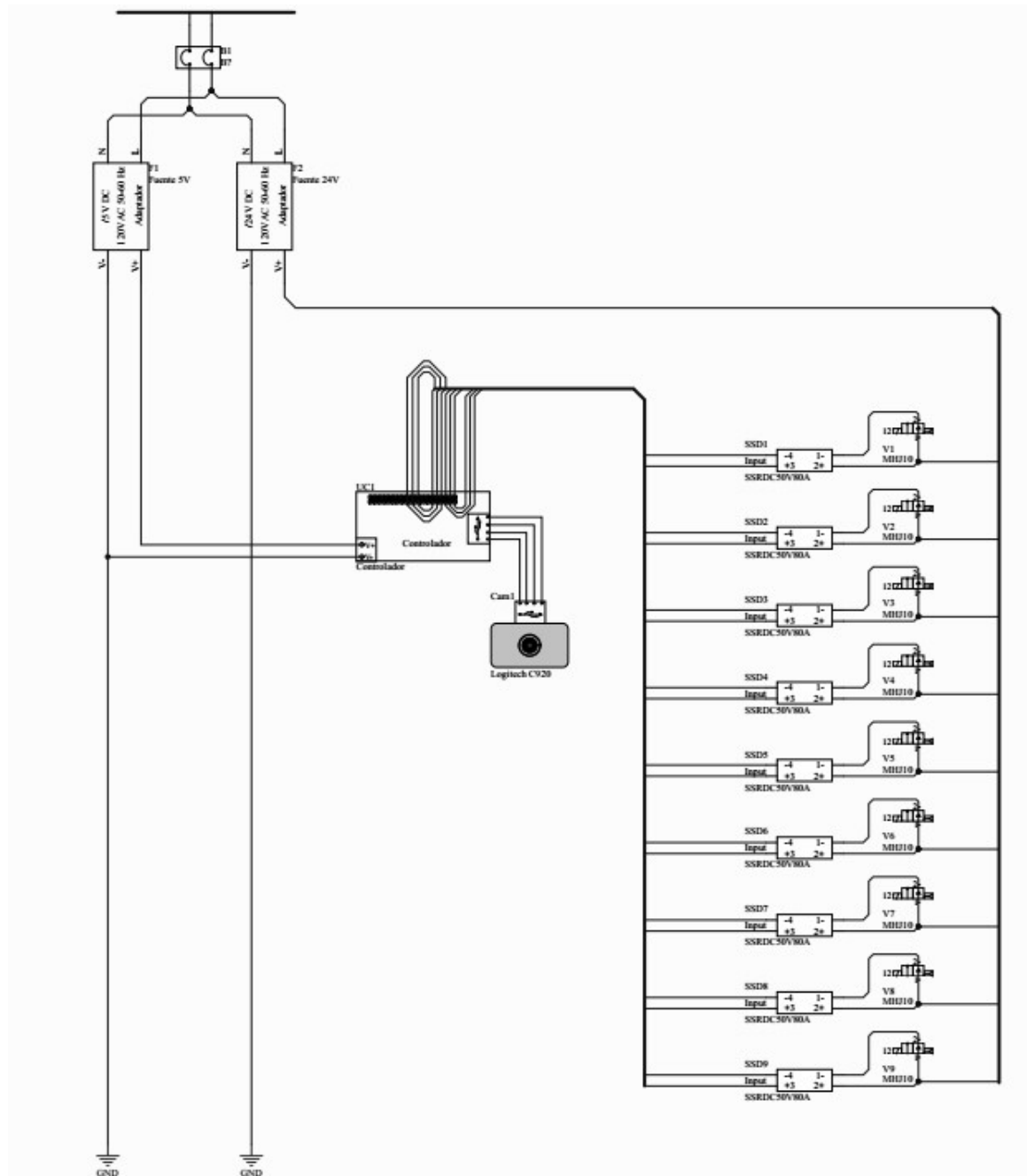


Figura 58. Diagrama eléctrico de fuentes de alimentación

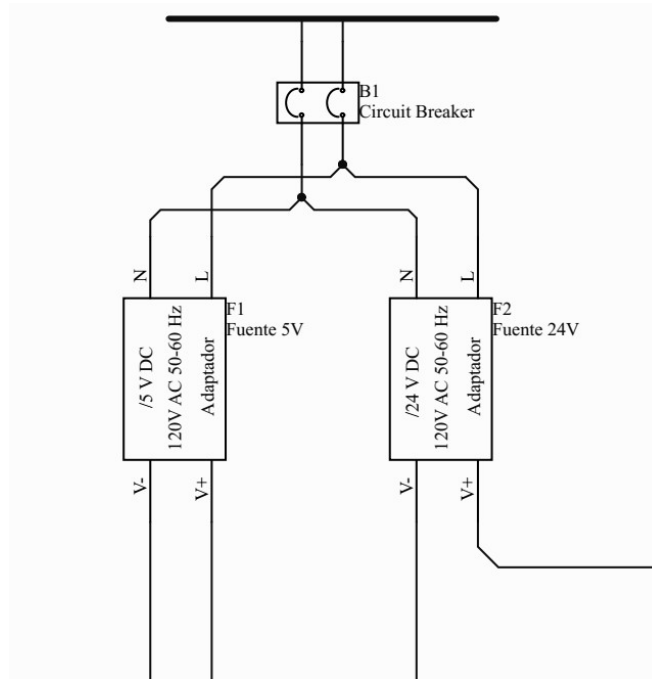


Figura 59. Diagrama eléctrico de plataforma y cámara

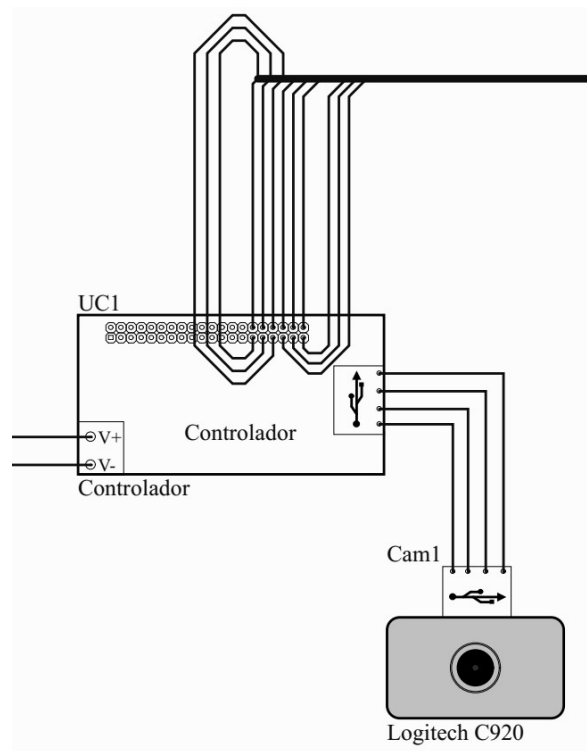
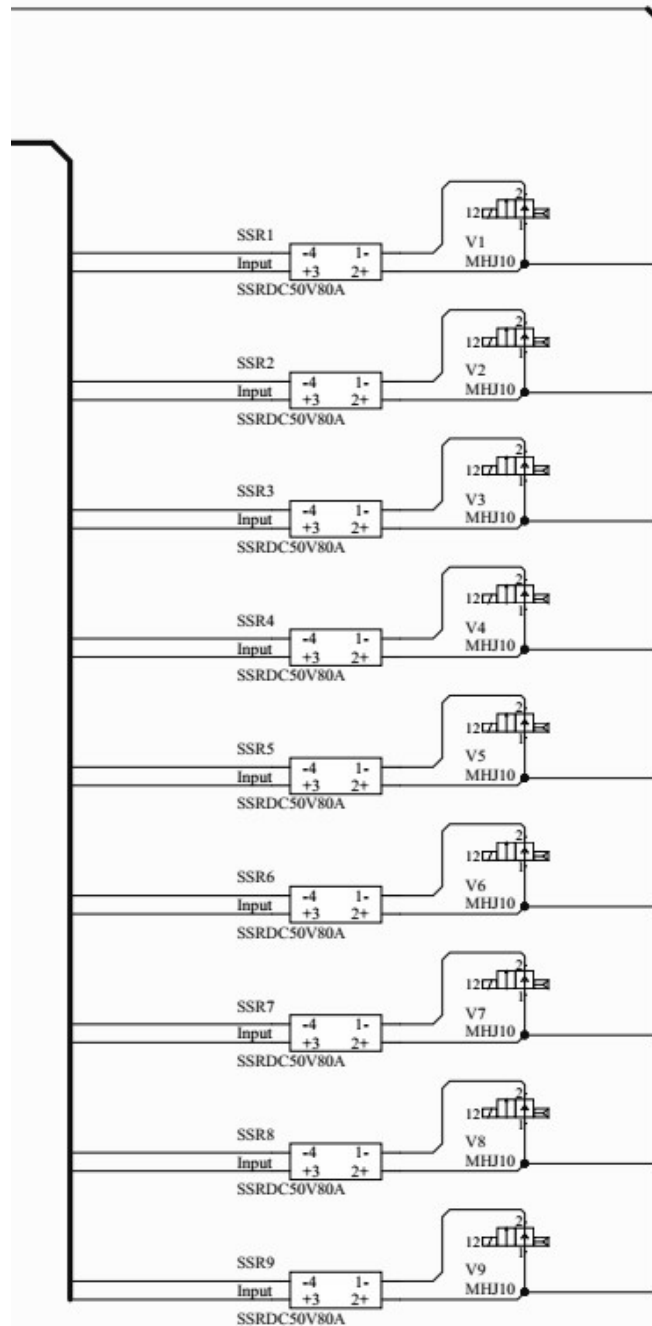


Figura 60. Diagrama eléctrico de válvulas solenoides neumáticas



E. COTIZACIÓN

Cuadro 7. Cotización de materiales principales del prototipo

Cantidad	Componente	Fabricante	Modelo	Precio unitario	Subtotal
1	Controlador/plataforma	Raspberry Pi	3	259.10	259.10
9	Relé de estado sólido	Crydom Co.	DMO063	170.33	1532.97
1	Circuito de protección	Siemens	5SL35327	37.75	37.75
1	Cámara	Logitech	C920 HD	865.00	865.00
1	Fuente de voltaje	Siemens	6EP1337-3BA00	3453.96	3453.96
1	Fuente de voltaje	Allen-Bradley	1606-xlp25a	1209.52	1209.52
9	Válvula neumática	Festo	MHJ10-S-2.5-QS-4-MF	1934.20	17407.80
2	Tubo cuadrado	- - - - -	1" Acero inoxidable	121.00	242.00
2	Lámina galvanizada	- - - - -	Hoja lisa calibre 12	156.49	312.98
	Total				25321.08

VII. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para iniciar con el análisis de resultados se considera pertinente explicar algunos problemas que se tuvieron para implementar el algoritmo en la plataforma. Si bien es cierto que Raspberry Pi garantiza la compatibilidad en cada uno de sus modelos ya que todos los modelos, con excepción del modelo Raspberry Pi 1, comparten físicamente los mismos puertos de entradas y salidas que pueden ser programadas con el lenguaje de programación Python que, como se ha mencionado, es un lenguaje multiplataforma. A pesar de esto, el modelo Raspberry Pi 1 A, A+, B, B+ y Zero poseen un controlador ARMv6 mientras que el modelo Raspberry Pi 2 posee ARMv7 y Raspberry Pi posee ARMv8. Esto no quiere decir que no se pueda garantizar la compatibilidad entre las plataformas, sin embargo, existe un conjunto de instrucciones para cada modelo de procesador y muchas veces no son compatibles hacia atrás.

Este es el caso para la Raspberry Pi B+. Se debe tomar en cuenta que esta plataforma presenta el procesador más lento y la menor cantidad de memoria RAM comparado con una Raspberry Pi 2 y 3. Por esta razón se espera que el tiempo de ejecución sea mayor si se compara con los modelos mencionados, no se diga comparado con una plataforma que disponga de un procesador Intel Core i5. Esto es importante debido a que, al momento de construir y compilar la librería OpenCV 3.1.0 en una Raspberry Pi B+ se tomó un tiempo de aproximadamente 70 horas. Además de esto, en los primeros intentos de compilar la librería la memoria RAM se vio escasa y la plataforma se apagaba. Para evitar esto se realizó un procedimiento en el cual se agregó un archivo *swap* con el fin de ampliar las prestaciones de la plataforma. El procedimiento descrito por (Gite, 2006) fue efectivo ya que se logró terminar la compilación sin problemas. Al momento de importar la librería se desplegó un mensaje de instrucción ilegal y es a partir de ella que se logra determinar las razones explicadas anteriormente.

Para solucionar ese inconveniente se debe deshabilitar opciones propias de una versión ARMv7 o ARMv8 al momento de compilar. Hecho esto se logró compilar e instalar la librería OpenCV 3.1.0 en la plataforma Raspberry Pi B+ por lo que se prosiguió a ejecutar el algoritmo desarrollado. En temas de funcionamiento se logró tomar imágenes provenientes de la cámara, filtrarlas y analizarlas, ubicar la posición del producto que no cumple con las especificaciones de producción e inicializar los temporizadores necesarios para activar las válvulas solenoides neumáticas cuando sea pertinente. El inconveniente es que la plataforma Raspberry Pi B+ no posee los recursos necesarios para procesar los datos de forma fluida por lo que no es funcional esta plataforma.

El algoritmo desarrollado para detectar y ubicar el producto que no cumple con las especificaciones de producción tiene como resultado la capacidad de analizar la imagen capturada desde la cámara y ubicar a través del color el producto. Sin embargo, se debe profundizar en los resultados ya que, a pesar de ser los

esperados, existen problemas que pueden afectar el rendimiento de los resultados al momento de clasificar el producto. En la Figura 12 y 17 se logra apreciar la existencia de producto con un color distinto al promedio del producto. Tanto del lado izquierdo como del lado derecho de la imagen se logra distinguir a simple vista la presencia de producto con un color café y producto que presenta manchas negras. En la Figura 14 y 19 se aprecia el resultado luego de aplicar una transformación de color de BGR a HSV, mostrado en la Figura 13 y 18, y aplicarle una máscara para colocar en color negro todos los pixeles que estén fuera del rango establecido por el filtro, mientras que en color blanco se encuentran los que están dentro.

Se mencionó en el marco teórico el modo de color RGB, sin embargo, el software OpenCV 3.1.0 utiliza el modo de color BGR que no es más que invertir los canales de la imagen a color. Realmente no es una transformación de un modo de color a otro y por ende no se debe profundizar mucho en el tema. Solo se debe saber que el uso de este modo de color se debe a razones históricas donde los fabricantes de cámaras utilizaban este formato debido a la arquitectura de los procesadores x86 donde se guardaba en los registros de forma contraria a la actual. Por ejemplo, si se quería guardar el entero 0x01020304 se guardaba en memoria como 0x04030201.

En la Figura 14 se puede apreciar claramente la presencia de varios conjuntos de pixeles blancos ubicados en distintas partes de la imagen que no corresponden a los lugares esperados. Esto se da como resultado de las sombras que proyecta el producto debido a la iluminación utilizada. Este es sin duda un problema serio. Incluso se puede notar en la Figura 22 que todo el producto analizado no cumpliría con las especificaciones de producción, sin embargo, la imagen fue capturada en un ambiente no controlado. Esto recalca la importancia de la iluminación en el prototipo. Bajo este principio, se puede llegar a pensar que entre mayor iluminación exista las sombras se reducirán, lo cual es una afirmación válida. Lo que parece solucionar un problema simplemente conlleva a otro ya que al momento de iluminar demasiado el ambiente se afecta el brillo del producto. El resultado en la imagen es que no se logra detectar la presencia de producto que no cumple con las especificaciones.

Para evitar el problema anterior, se propone tomar en cuenta el área de cada conjunto de los pixeles. Esta mejora del algoritmo permitió pulir el análisis de la imagen en búsqueda de eliminar esas regiones de sombra. A pesar de eso, existen regiones de sombra de gran tamaño, por lo que no fue suficiente como para mejorar la identificación del producto fuera de especificaciones de producción. Ahora bien, tampoco es una solución eficiente ya que cabe la posibilidad de presenciar distintos tonos de colores en el mismo producto que sean de menor tamaño al área establecida, dejando pasar así un producto fuera de especificaciones. Otra solución que se implementó fue el filtrado de la imagen en la etapa de pre-procesamiento. Se busca entonces eliminar ruido de la imagen a la vez que se busca resaltar los bordes dentro de la imagen. Para esto se aplicaron distintos filtros, como el desenfoque gaussiano y el filtro bilateral. Se decidió utilizar el filtro bilateral ya que realiza la misma función que un desenfoque gaussiano con la ventaja de preservar los bordes. Ahora bien, se

sabe que es necesario sacrificar algún aspecto con el fin de incrementar otro. En este caso, el filtro bilateral consume más recursos y funciona en mayor lapso de tiempo comparado con un desenfoque gaussiano.

Una vez realizado el procesamiento de imágenes se realiza un análisis de contornos con el fin de conocer el área de la región determinada por la máscara, como se ha dicho con anterioridad. Además, estos contornos brindan información importante para ubicar el producto fuera de especificaciones de producción. Otorgan la coordenada x y coordenada y de donde se ubicó el producto y esto se analiza para determinar los índices correspondientes a una matriz de la cual se obtienen los tiempos para activar las electroválvulas. Se realiza una cuadrícula imaginaria en la matriz que divide la imagen en 81 cuadros. Esto se realiza con el fin de hacer canales imaginarios que corresponden a la cantidad de actuadores que se planifica instalar en el prototipo. Es importante mencionar que a mayor cantidad de actuadores se mejora la separación de producto fuera de especificaciones de producción, además se debe mencionar que realizar el cambio en el algoritmo no resulta ser complicado. El único inconveniente por el momento es conocer los tiempos que maneja la banda transportadora ya que su estructura implica tener mayor velocidad en un extremo comparado con el otro.

Es necesario mencionar que para el ambiente controlado uno y dos mostrados en las figuras 12 y 17 se implementaron algoritmos para reducir ruido en la máscara conocidos como *Erosion* y *Dilation* que solamente buscan degradar los píxeles negros cercanos a los píxeles blancos y degradar los píxeles blancos cercanos a los píxeles negros, respectivamente. Esto se realizó con el fin de suavizar los bordes de la máscara aplicada y lograr así definir mejor la ubicación del producto que no cumple con especificaciones de producción. En el ambiente controlado tres y cuatro mostrado en las figuras 22 y 26 se aplicó otro algoritmo para reducir ruido. En este caso se implementó el filtro *Opening* y *Closing* que es la aplicación de un filtro *Erosion* seguido de un *Dilation* para eliminar el ruido blanco sobre las zonas negras y la aplicación de un filtro *Dilation* seguido de un *Erosion* para eliminar el ruido negro sobre las áreas blancas.

Las figuras 23 y 27 resalta la implementación de los filtros mencionados. Se aprecia una mejor definición de las áreas donde existe producto que no cumple las especificaciones de producción. A su vez, en las figuras 24 y 28 se nota una mejor definición de los contornos de ese producto. El problema principal es que también se resalta la sombra generada por el mismo producto contra otro producto o la banda transportadora. Por esta razón se ubicó mayor cantidad de lámparas de una forma que no resaltaran el brillo del producto. Por esta razón, en la Figura 29 se hace evidente esta implementación. Aunque no se eliminaron del todo las sombras, se mejoró en buena parte el intento de eliminarlas. Ahora bien, en la búsqueda de una mejor detección del producto fuera de especificaciones de producción se debe pagar con rendimiento y tiempo de ejecución. En este caso, el tiempo de ejecución incrementa debido a que se debe ejecutar mayor código en el programa. Esto puede reducir el rendimiento del mismo ya que se pasó de un porcentaje de ejecución de 9.96% a 15.95%. Incrementar en 6% la ejecución total del algoritmo no es significativo en este caso.

Respecto a los contornos obtenidos mostrados en las figuras 24 y 28, lograr definir de mejor forma los contornos permite encontrar las áreas de interés de una forma más sencilla. Si bien es cierto que se toma menor cantidad del porcentaje de ejecución, 0.80% en este caso, se debe a que al no definir de buena forma los contornos no se debe invertir tanto tiempo en ese análisis. Al tener una mejor máscara se tiene mayor información que procesar, siendo esta la desventaja principal de implementar una mayor cantidad de filtros a la máscara.

En el Cuadro 3 se aprecia una relación entre los métodos cuyo objetivo es suavizar la imagen en la etapa de pre-procesamiento de las imágenes. El objetivo principal es eliminar el ruido de la imagen que se desea procesar para eliminar píxeles que realicen gran contraste en las regiones de interés. Es importante resaltar que el filtro bilateral realmente consume más tiempo de ejecución que un desenfoque gaussiano. Según el perfil realizado, implementar el filtro bilateral es 10.44 veces más rápido que un desenfoque gaussiano, sin embargo, todo el procesamiento requerido implementando un filtro bilateral comparado con el desenfoque gaussiano es solamente 2.468 veces más lento. Realmente no implica un gran impacto en la plataforma donde se realizaron las pruebas, pero no se puede decir lo mismo respecto a la plataforma donde se desea implementar ya que en una Raspberry Pi B+ se debe aprovechar la menor cantidad de datos para procesar para que el tiempo de ejecución sea menor.

Se debe mencionar también que en el perfil creado se tomó en cuenta el despliegue de la imagen obtenida, su transformación al modo de color HSV, la máscara aplicada, los contornos obtenidos y la imagen resultante indicando el centro donde se ubica el producto fuera de especificaciones de producción. Esto requiere de una gran cantidad de procesamiento de información y no fue problema en la plataforma donde se hicieron las pruebas de rendimiento, sin embargo, en la plataforma donde se implementó el algoritmo no tuvo el mismo resultado. Por esta razón se volvió a realizar un perfil donde no se despliegan en pantalla las imágenes mencionadas anteriormente, teniendo como resultado un mejor tiempo de ejecución. En el Cuadro 4 se aprecia claramente lo mencionado. Si se analiza a profundidad el Cuadro 4 se obtienen datos interesantes. Primero, se logra apreciar la diferencia computacional y la presencia de una GPU dedicada al manejo de gráficos presentes en el modelo GE70 2PE que posee un procesador Intel Core i5-4210H con frecuencia de reloj de 2.9 GHz, memoria RAM de 8 GB y tamaño de palabra de 64 bits. Además, posee una GPU Nvidia GeForce GTX860M con 4 GB de memoria GDDR5 y frecuencia de reloj hasta 2.5 GHz. Si se compara con el poder computacional de la plataforma donde se implementó el algoritmo que consta de un procesador ARM1176JZFS (ARM11 con arquitectura ARMv6 en el núcleo) y una frecuencia de reloj de 700Mhz y con una GPU VideoCore 4 interna con frecuencia de reloj de 250 MHz capaz de reproducir imágenes 1080p. Sin duda es una gran diferencia de poder computacional entre ambos dispositivos y se hace evidente en el Cuadro 4. Los tiempos de ejecución presentan una gran diferencia y he allí la necesidad de poder implementar el algoritmo en una mejor plataforma Raspberry Pi. Tomando en cuenta los *benchmarks* hechos a las plataformas, se recomienda una Raspberry Pi 3 para mejorar el rendimiento del software alrededor de 275%

a la vez que se le agrega la capacidad de ser embebido. Se debe tomar en cuenta que la prueba consistió en realizar 100 ciclos del programa principal. Con base en esto, se pueden realizar cálculos donde se determinar que cada captura, procesamiento y accionamiento de las válvulas solenoides neumáticas se realiza en 0.5524 segundos. Si se realiza en la plataforma propuesta Raspberry Pi 3, el tiempo de ejecución sería suficiente para el funcionamiento del dispositivo.

El diseño propuesto para la estructura se basa en aspectos particulares que presenta la planta de producción. Debido a que es un prototipo, no es factible realizar inversión en nuevas bandas transportadoras que se adecúen al modelo propuesto. Tampoco es factible reubicar los elementos propios de la planta. Es por esto que el prototipo debe adecuarse al funcionamiento de la línea de producción, tomando en cuenta que debe poseer alta movilidad y debe adaptarse a las distintas bandas transportadoras instaladas. En las figuras 37-40 se logra apreciar el modelo propuesto.

En las imágenes se logran apreciar aspectos importantes del diseño que vale la pena mencionar. Se diseñó pensando en una estructura cuyos materiales sean utilizables sin ningún problema en la industria alimentaria. Por esta razón se propuso acero inoxidable y hoja de lata. Los costos varían considerablemente entre los materiales propuestos, por esta razón y debido a que es un prototipo se eligió la opción más económica que es la hoja de lata. Este material se utilizó en la parte superior para crear lo más cercano posible a un ambiente controlado, vital para capturar imágenes que contengan la misma cantidad de iluminación sin importar la hora o posición del prototipo. A su vez, el diseño contempla el espacio suficiente para colocar la circuitería y componentes necesarios para el funcionamiento del prototipo. Estos componentes son la cámara y la iluminación.

La estructura contempla un tablero de control en el cual se debe instalar la circuitería necesaria. En ella debe instalarse las fuentes de poder, tanto de 24 y 5 voltios para alimentar las electroválvulas neumáticas y la plataforma Raspberry Pi, respectivamente. Debido a que la plataforma Raspberry Pi no se ha fabricado para trabajar en un ambiente industrial se debe tomar en cuenta la protección en sus entradas y salidas. Por esta razón se propone el uso de optoacopladores o relés de estado sólido. Con esto se puede controlar componentes que requieran de un mayor voltaje al que puede ser suministrado por la plataforma o controlador. Además, son útiles para aislar el circuito de control y la carga. En muchos casos, especialmente cuando se trabaja con componentes que inducen ruido al sistema, se hace necesario aislar los circuitos ya que puede llegar a corromper la información del circuito de control. Esto se debe a que el circuito de control maneja señales digitales. Si bien es cierto que son bastante robustas, el ruido puede transformar un cero válido en un uno válido, alterando así la información. También se protege el circuito de control de sobrevoltaje o corto circuito en los actuadores.

Es importante mencionar que se ha planteado el diseño del prototipo, pero no se ha logrado implementar en una estructura funcional hasta el momento. Se tienen los planos de la estructura, las válvulas solenoides neumáticas que se desean con sus cotizaciones y la implementación del algoritmo de reconocimiento en una plataforma que no cumple con las especificaciones requeridas para un funcionamiento óptimo. A pesar de esto, la fase de diseño plantea resultados prometedores para continuar con el desarrollo del proyecto. En esta fase se pretendía desarrollar el algoritmo para comprobar su funcionamiento, de esta forma se puede proceder a una construcción de la estructura y se trabaja un proyecto de forma segura, así se logra dedicar mayor cantidad de tiempo en supervisar los detalles propios de la estructura, como la instalación del aire comprimido para las válvulas solenoides neumáticas, el diseño propio de un tablero de control, adquirir los componentes necesarios para su construcción y no estar corrigiendo detalles de programación mientras se corrigen detalles del diseño de la estructura.

Por las razones anteriores se pudo dedicar mayor cantidad de tiempo a analizar ciertos parámetros que se deben cumplir para obtener un correcto funcionamiento del sistema diseñado. En este caso se logró obtener información de la banda transportadora actual en cuanto a la velocidad con la que transporta el producto de un punto a otro y el tiempo que se tarda en transportarlo. Se toma en cuenta también las distintas velocidades que maneja la banda transportadora en sus extremos. De esta forma, los resultados mostrados en el Cuadro 6 pueden tomarse como el tiempo máximo de ejecución donde se debe realizar todo el procesamiento de imágenes para identificar el producto fuera de especificaciones de producción. De la misma manera, la Figura 41 muestra una gráfica del comportamiento a partir del modelo físico explicado en el anexo D. Este modelo concuerda con las medidas experimentales obtenidas en la planta del tiempo de caída de un punto A hasta un punto B. Esta medición es importante ya que nos indica el tiempo en el cual debe activarse la válvula solenoide neumática, el tiempo de apertura del mismo y el momento en el cual se debe enviar la señal de cierre de la válvula solenoide.

VIII. CONCLUSIONES

Se logró plantear el diseño para un prototipo que clasifica pellet fuera de especificaciones de producción utilizando visión de máquina para lograrlo.

El procesamiento de imágenes empleado mejora la calidad de la imagen capturada acorde a las necesidades del proyecto gracias a los distintos filtros que buscaban suavizar la imagen a la vez que se resaltan los bordes y la aplicación de filtros en la máscara obtenida identifica el producto que no cumple con las especificaciones de producción bajo un ambiente controlado.

La elección inicial de la plataforma se comporta de la manera esperada ya que sus especificaciones están por debajo de las requeridas, sin embargo, se logra realizar el procesamiento de imágenes de forma adecuada y enviar la señal a las válvulas solenoides neumáticas de forma correcta.

La plataforma seleccionada no logra procesar la información y enviar las señales requeridas a las válvulas solenoides neumáticas dentro del tiempo máximo de ejecución aceptado. Sin embargo, una plataforma con mayor capacidad de procesamiento de datos cumple con los tiempos críticos.

IX. RECOMENDACIONES

Se recomienda utilizar una plataforma con mejores especificaciones y, de ser posible, con una GPU integrada para poder ser utilizada específicamente para analizar las imágenes capturadas, aumentando así el rendimiento del proyecto y aumentando la capacidad de analizar mayor cantidad de información de tal forma que pueda acoplarse a futuras expansiones en la planta de producción.

Se recomienda la instalación de al menos otra cámara con el fin de analizar el producto desde varios puntos de vista, de esta forma se puede eliminar las sombras generadas por el producto y la iluminación utilizando otro algoritmo de comparación. Esto va de la mano de la iluminación del prototipo, se debe considerar la posibilidad de calibrar la misma para obtener mejor resultados al momento de procesar las imágenes.

Debido a las propias limitaciones del prototipo y su adaptación a las necesidades actuales de la planta se analiza de forma ortodoxa el producto por lo que se recomienda modificar la banda de transporte por una de mayor capacidad, es decir una banda más ancha, para que el producto se distribuya de forma correcta y se evite la tenencia de capas de producto que dificultan la clasificación individual.

X. BIBLIOGRAFÍA

- Alcalá, José Ramón; G. Navarro. 2008. *Una introducción a la imagen digital y su tratamiento*. Cuenca: Mideciant. 302 págs.
- Brandt, Thomas. 1999. *Vertigo. Its multisensory syndromes*. 2ª ed. Berlín: Springer-Verlag GmbH & Co. 503 págs.
- Bigshot. *Image Sensor*. <http://www.bigshotcamera.com/learn/image-sensor/index> [19/09/2016]
- Calleja López, José Antonio; J. Durante Molina y J. Trabadelá. 2014. *Fotografía digital*. Madrid: Ministerio de Educación, cultura y Deporte. 267 págs.
- De Juan, Carmen, *et al.* 2014. *Temas de salud*. Manual para la preparación del Certificado Superior de Español de la Salud de la Cámara de Comercio de Madrid. Madrid: Cambridge-Edinumen. 212 págs.
- Departamento de Análisis Económico y Estándares de Supervisión. 2012. *Análisis de sectores económicos*. Sector de Alimentos y Bebidas. Superintendencia de Bancos. Guatemala. 23 págs.
- Gite, Vivek. *Linux add a swap file*. <http://www.cyberciti.biz/faq/linux-add-a-swap-file-howto/> [22/09/2016]
- Griffin, Michael. 1998. «50. Vibraciones». *Enciclopedia de salud y seguridad en el trabajo*. Organización Internacional del Trabajo. Págs. 50.1-50.17
- Langford, Michael. 1988. *La fotografía paso a paso*. Un curso completo. 7ª reimp. Madrid: Herman Blume. 224 págs.
- Martín, Pedro; J. Oliva, C. Manjavacas. 2010. *Montaje y mantenimiento de equipos*. Madrid: Paraninfo S. A. 365 págs.
- Millán Teja, Salvador. 1998. *Automatización neumática y electroneumática*. Barcelona: Marcombo, S. A. 252 págs.
- Muñoz, Antonio. 2012. *Principios de color y holopintura*. Alicante: Editorial Club Universitario. 420 págs.

Organización Internacional del Trabajo. 1998. *La evolución tecnológica y el empleo en las industrias de productos alimenticios y bebidas*. Programa de Actividades Sectoriales. Ginebra: Organización Internacional del Trabajo. 155 págs.

Pklab. *Install OpenCV 3.1 Python/C++ on Raspbian Jessie*.
<http://www.pklab.net/?&id=392&lang=EN&t=Install-OpenCV-3.1-Python/C++-on-Raspbian-Jessie>
[21/09/2016]

Ramírez, César. 2005. *Seguridad industrial*. Un enfoque integral. 2ª ed. México: Limusa. 508 págs.

Raspberry Pi. *Jessie is here*. <https://www.raspberrypi.org/blog/raspbian-jessie-is-here/> [18/09/2016]

Rosebrock, Adrian. *How to install OpenCV 3 on Raspbian Jessie*.
<http://www.pyimagesearch.com/2015/10/26/how-to-install-opencv-3-on-raspbian-jessie/>
[19/09/2016]

Rossi, Leonardo, *et al.* 2006. *Pixel detectors: From fundamentals to applications*. Berlín: Springer-Verlag Berlin and Heidelberg GmbH & Co. 304 págs.

Santamaria, Marcè. 2005. *Industria Alimentaria*. Tecnologías emergentes. Cataluña: Ediciones UPC. 210 págs.

ShawnHymel. *Single Board Computer Benchmarks*. <https://learn.sparkfun.com/tutorials/single-board-computer-benchmarks> [26/09/2016]

Sierra Puparelli, Vicente. 1992. *La fotografía en el aula*. Madrid: Akal, S. A. 203 págs.

Silva Otero, Aristides; M. Mata de Grossi. 2005. *La llamada Revolución Industrial*. Caracas: Universidad Católica Andrés Bello. 413 págs.

Stanton, Christopher. *A comprehensive Raspberry Pi 3 benchmark*.
<https://www.element14.com/community/community/raspberry-pi/blog/2016/02/29/the-most-comprehensive-raspberry-pi-comparison-benchmark-ever> [27/09/2016]

Yadav, Abhishak; P. Yadav. 2009. *Digital image processing*. Nueva Delhi: University Science Press. 231 págs.

XI. ANEXOS

A. COMPARACIÓN ENTRE DISTINTAS PLATAFORMAS

A continuación, se detallan especificaciones técnicas de la plataforma seleccionada y se realiza una comparación con otras plataformas. Además, se adjuntan cuadros comparativos de distintos *benchmarks* realizados a los mismos gracias a la empresa Sparkfun.

Cuadro 8. CPU y GPU de las plataformas

Dispositivo	Procesador	Arquitectura	Velocidad de CPU	Núcleos	GPU
Raspberry Pi 2	Broadcom BCM2836	ARM Cortex-A7	900 MHz	4	Broadcom
BeagleBone Black Rev C	TI Sitara AM335x	ARM Cortex-A8	1 GHz	1	PowerVR SGX530
Intel Edison	Intel Atom Z34XX	Silvermont x86	500 MHz	2	None
pcDuino3	Allwinner A20	ARM Cortex-A7	1 GHz	2	Mali-400MP2
Acadia	Freescale i.MX6	ARM Cortex-A9	1.2 GHz	4	Vivante GC2000

Cuadro 9. Especificaciones de RAM de las plataformas

Dispositivo	Tamaño de RAM	Tipo de RAM	Memoria interna	Ranura Flash
Raspberry Pi 2	1 GB	LPDDR2	N/A	microSD
BeagleBone Black Rev C	512 MB	DDR3	4 GB	microSD
Intel Edison	1 GB	LPDDR3	4 GB	N/A
pcDuino3	1 GB	DDR3	4 GB	microSD
Acadia	1 GB	DDR3	N/A	microSD

Cuadro 10. Puertos, conectividad y precio de las plataformas

Dispositivo	USB	SATA	Salida de Audio	HDMI	Ethernet	WiFi	Bluetooth	GPIO	Precio
Raspberry Pi 2	Yes	No	Yes	Yes	Yes	No	No	17	\$39.95
BeagleBone Black Rev C	Yes	No	No	Yes	Yes	No	No	66	\$54.95
Intel Edison	Yes	No	No	No	No	Yes	Yes	40	\$49.95
pcDuino3	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	No	22	\$59.95
Acadia	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	No	No	22	\$119.95

Figura 61. Procesos con un solo núcleo del CPU

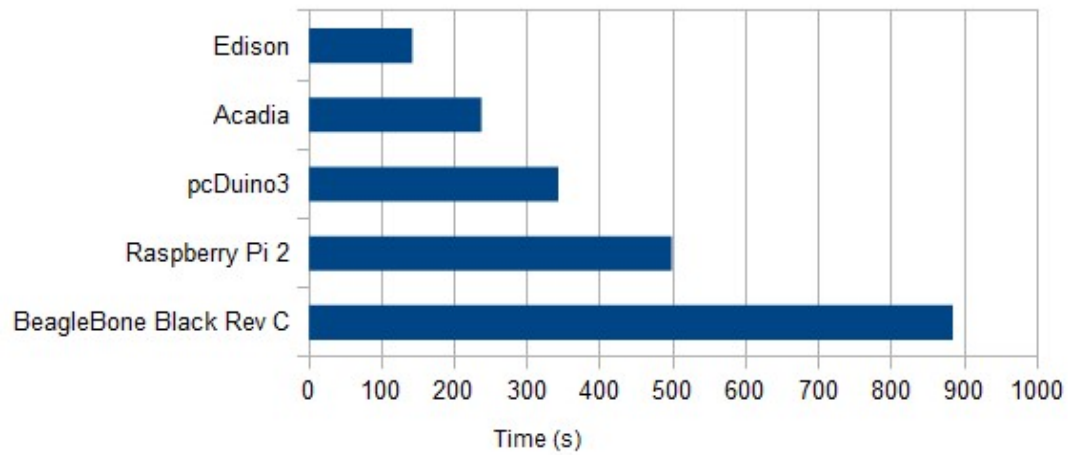


Figura 62. Procesos multinúcleo del CPU

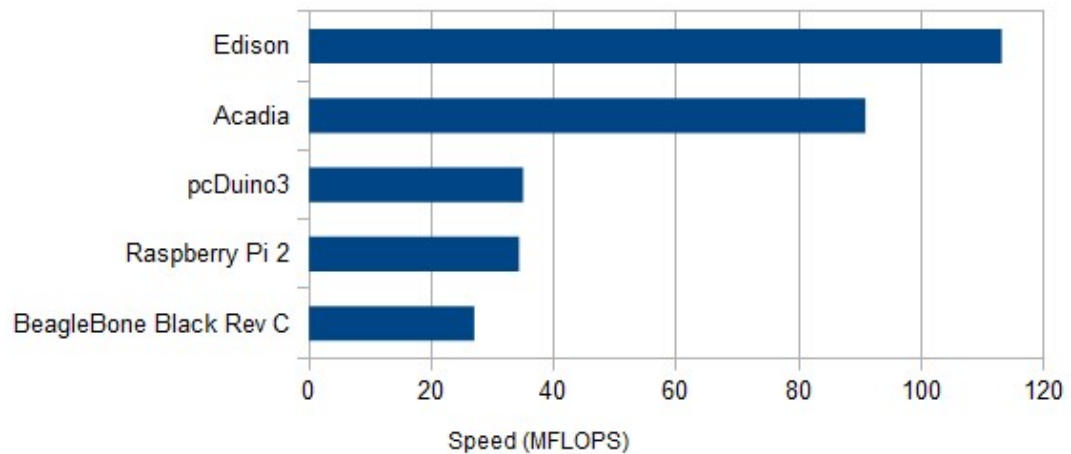


Figura 63. Velocidad de memoria RAM

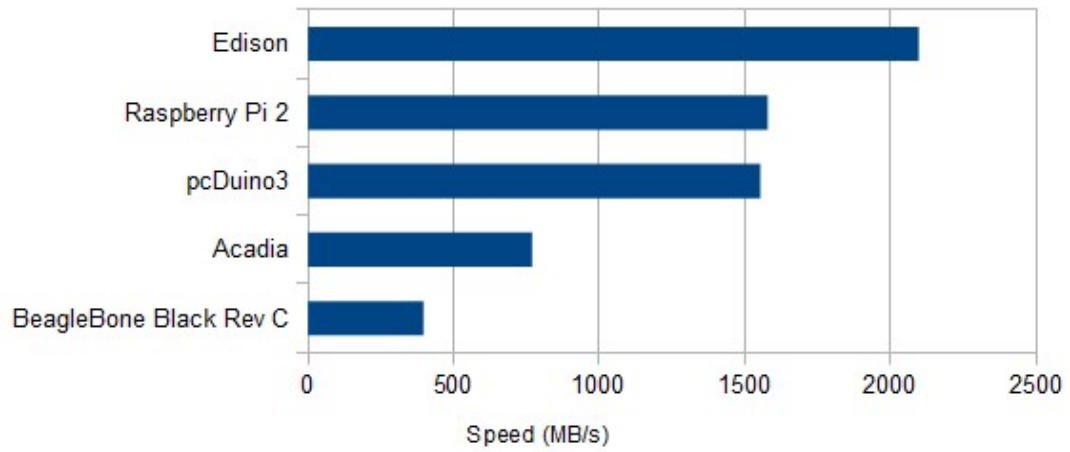


Figura 64. Lectura/escritura de memoria Flash

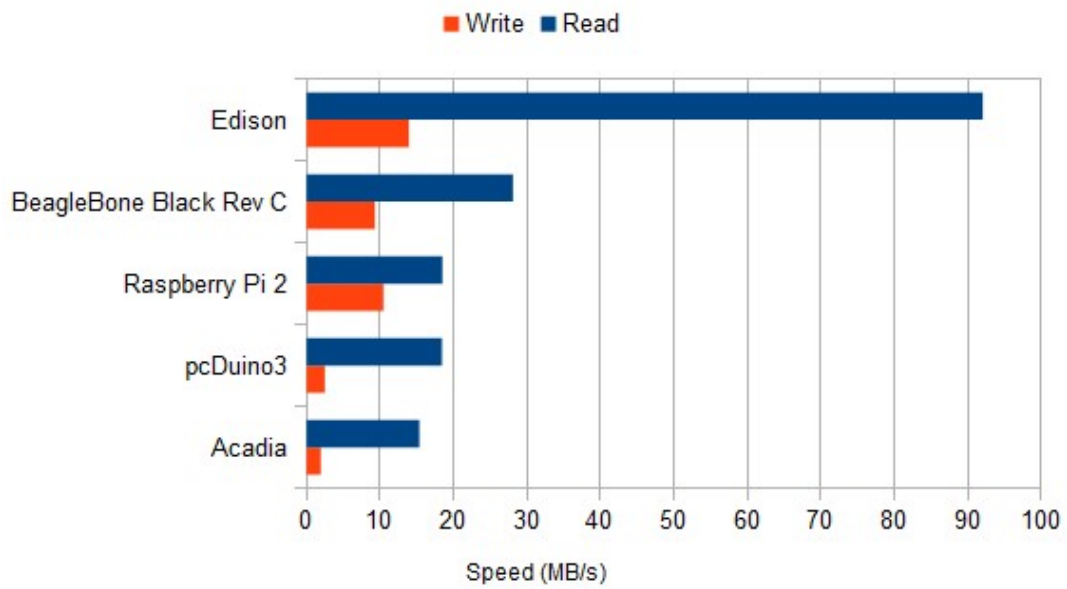


Figura 65. Gráficos 2D

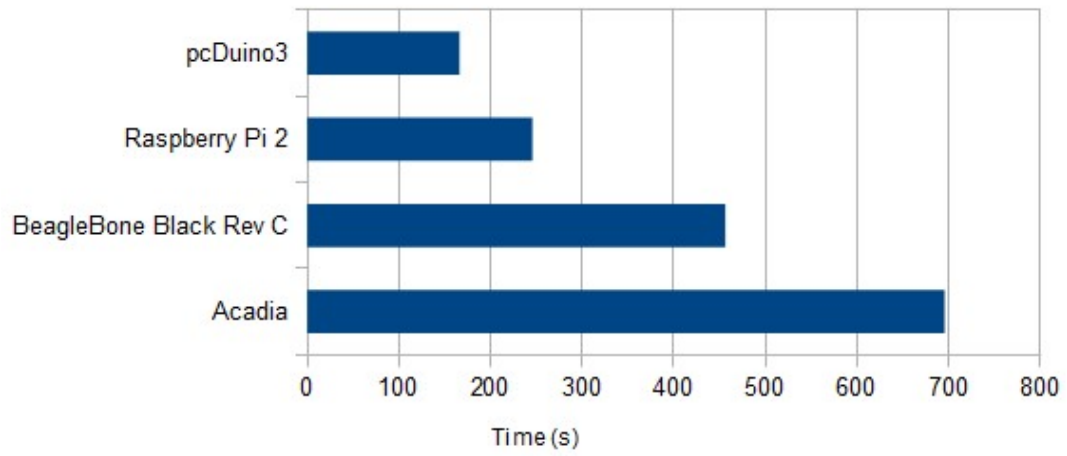
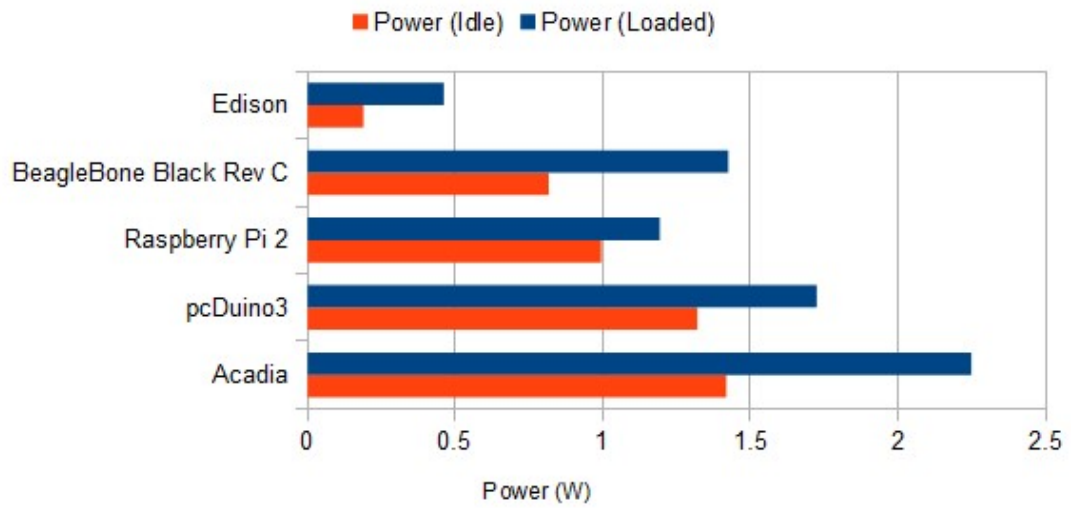


Figura 66. Consumo de potencia



B. COMPARACIÓN ENTRE PLATAFORMAS RASPBERRY PI Y SUS DISTINTOS MODELOS

A continuación, se dan los resultados obtenidos a partir de aplicar distintos *benchmarks* a las distintas plataformas Raspberry Pi en cada uno de sus modelos más populares.

Cuadro 11. Comparación utilizando Sysbench con un thread.

sysbench con 1 thread - Raspberry Pi 3 Modelo B		sysbench con 1 thread - Raspberry Pi 2 Modelo B		sysbench con 1 thread - Raspberry Pi 1 Modelo B+	
Tiempo total 477.0617 s		Tiempo total 768.6476 s		Tiempo total 1318.933 s	
Por solicitud	Estadística (ms)	Por solicitud	Estadística (ms)	Por solicitud	Estadística (ms)
Mínimo	47.69	Mínimo	76.42	Mínimo	131.59
Promedio	47.7	Promedio	76.86	Promedio	131.89
Máximo	49.91	Máximo	82.15	Máximo	300.23
Diferencia entre mínimo y máximo		Diferencia entre mínimo y máximo		Diferencia entre mínimo y máximo	
2.22 ms		5.73 ms		168.64 ms	

Cuadro 12. Comparación usando Sysbench con 4 threads

sysbench con 4 threads - Raspberry Pi 3 Modelo B		sysbench con 4 threads - Raspberry Pi 2 Modelo B		sysbench con 4 threads - Raspberry Pi 1 Modelo B+	
Tiempo total 119.4716 s		Tiempo total 191.8972 s		Tiempo total 1321.493 s	
Por solicitud	Estadística (ms)	Por solicitud	Estadística (ms)	Por solicitud	Estadística (ms)
Mínimo	47.69	Mínimo	76.38	Mínimo	412.94
Promedio	47.78	Promedio	76.74	Promedio	528.54
Máximo	59.04	Máximo	101.45	Máximo	573
Diferencia entre mínimo y máximo		Diferencia entre mínimo y máximo		Diferencia entre mínimo y máximo	
11.35 s		25.07 ms		160.06 ms	

Cuadro 13. Comparación usando MemTester para memoria RAM

Raspberry Pi	Tiempo
1 Model B+	76 minutos 23.29 segundos
2 Model B	23 minutos 39.07 segundos
3 Model B	8 minutos 37.078 segundos

C. PSEUDOCÓDIGO DEL ALGORITMO

ALGORITMO: opticalSorter

ENTRADAS: selector, video

SALIDAS: actuador[]

VARIABLES: src, mask, mask1, centros, x, y, index, maximosX, maximosY, tiempoTimer, milisActuales, milisPrevios, contadorThreads

INICIO

INICIAR video

MIENTRAS verdadero

 OBTENER $src = frame$

 FILTRAR src

 DEFINIR mask

 DEFINIR mask1

 OBTENER centros de objetos

 DEFINIR x = coordenada x de objeto

 DEFINIR y = coordenada y de objeto

 SI largo x == largo y ENTONCES

 DEFINIR index = valor máximo

 PARA i DESDE 0 HASTA largo index

 CONCATENAR maximosX

 CONCATENAR maximosY

 DEFINIR tiempoTimer = tiempo[maximosX, maximosY]

 FIN SI

 OBTENER milisActuales

 PARA i DESDE 0 HASTA largo maximosX

 SI milisActuales-milisPrevios >1 ENTONCES

 DEFINIR milisPrevios = milisActuales

```

INCREMENTAR contadorThreads en 1
ASIGNAR nombre
INICIALIZAR timer

FIN SI

DESPLEGAR mask l
DESPLEGAR src
SI tecla == esc ENTONCES
    FIN MIENTRAS
CERRAR ventanas
TERMINAR video

```

D. ECUACIONES DEL MODELO FÍSICO DEL PRODUCTO EN CAÍDA LIBRE

$$F = mg - \frac{1}{2}\rho Av$$

$$m \frac{d^2x(t)}{dt^2} = mg - \frac{1}{2}\rho A \frac{dx(t)}{dt}$$

$$m \frac{d^2x(t)}{dt^2} + \frac{1}{2}\rho A \frac{dx(t)}{dt} - mg = 0$$

Donde m es la masa del producto, ρ es la densidad del aire, A es el área superficial del producto en contacto con la fuerza de arrastre y g es la gravedad. Para resolver la ecuación diferencial se utilizó el software computacional MATLAB y se obtuvo la ecuación para $x(t)$.

$$\begin{aligned}
 x(t) = & \frac{2262031992038633766912}{1594874748039471875}t \\
 & + \frac{20863562621840039541098155618160288464896}{101745018477358755895559321156640625} e^{-\frac{63794989921578875t}{9223372036854775808}} \\
 & - \frac{20863562621840039541098155618160288464896}{101745018477358755895559321156640625}
 \end{aligned}$$

E. PROPUESTA DE PROTOTIPO CON COMPONENTES INDUSTRIALES

A pesar de haber realizado una propuesta de un prototipo y determinar que el funcionamiento del mismo es adecuado con el inconveniente de que la plataforma en la cual se implementó el algoritmo no posee el rendimiento adecuado para procesar la gran cantidad de información capturada por la cámara, se realiza una propuesta del prototipo donde se incluye componentes industriales para ajustarse adecuadamente al ambiente de trabajo y las condiciones que presenta una planta de producción. A continuación, se presentan los componentes y la vez una breve explicación para resaltar la importancia de ellos.

1. **Cámara.** La cámara se seleccionó en base a la velocidad de transmisión de datos, la resolución de la captura y la capacidad de soportar ambientes industriales. La compañía *FLIR Systems* es famosa por diseñar, fabricar y distribuir tecnología para mejorar la percepción e innovar en las tareas del diario vivir que involucren actividades donde se utilizan sistemas térmicos, sistemas de luz visible, mediciones, etc. Poseen un amplio catálogo de cámaras que se utilizan en la industria y recientemente adquirieron una pequeña empresa que se encarga del desarrollo de cámaras digitales para ser implementadas en visión de máquina denominada Point Grey.

La familia de cámaras *Grasshoper3* presenta características compatibles con los fines del prototipo debido a que existen modelos capaces de alcanzar hasta 90 capturas por segundo con una resolución de 2048x2048 debido a que su interfaz de conexión es USB 3.0. Se debe tomar en cuenta que en este prototipo se utiliza una sola cámara, sin embargo, es recomendable utilizar una mayor cantidad de cámaras. Los sistemas de clasificación óptica comúnmente utilizan arreglos de cámaras para garantizar la inspección individual de cada producto que pasa por el lente de la misma. Es importante entonces seleccionar una plataforma con interfaz USB 3.0 para poder comunicarse con la cámara. Cabe mencionar que Point Gray proporciona el *software* necesario para manipular la cámara y los accesorios que se necesitan para el correcto funcionamiento de la misma. A pesar de eso, la cámara puede ser utilizada por otro *software* como MATLAB u OpenCV.

Cabe mencionar que el lente de esta cámara debe comprarse por separado y se fabrica según las especificaciones del usuario. Esto quiere decir que los lentes son intercambiables y debe considerarse esto al momento de querer colocar una mayor cantidad de cámaras. Si ese es el caso, la cámara *Grasshoper3* tiene integrado un disparador con el cual se le envía una señal para indicar el momento en que debe realizar una captura.

Figura 67. Cámara *Grasshoper3*

2. **Plataforma.** En cuanto a la plataforma se optó por recomendar una plataforma de Automatización basada en PC. La automatización basada en PC básicamente es la inclusión de una computadora adaptada a un ambiente industrial. Esto quiere decir que se realiza un diseño especial que cumpla las características de cualquier industria como la capacidad de ejecutar instrucciones sin interrupción por largos períodos de tiempo, ser resistentes contra el polvo e incluso contra el agua. Generalmente poseen un disco duro de estado sólido ya que deben ser capaces de tolerar impactos y vibraciones constantes.

Existen varios fabricantes de este tipo de computadoras, sin embargo, se optó por recomendar equipos de la marca *Siemens*. *Siemens* es conocido a nivel mundial en sistemas de automatización. Es sin duda un gigante de la industria y en cada planta de producción seguramente existirá algún equipo *Siemens*. Gracias a esto se obtiene confiabilidad y respaldo, aspectos necesarios en cualquier industria.

El modelo seleccionado para cumplir esta función es el equipo SIMATIC IPC627D. Posee alto rendimiento dentro de un cajón compacto capaz de montarse en pared o empotrado con la ayuda de accesorios proveídos por *Siemens*. Este equipo posee un potente procesador Intel Xeon E3-1268L v3 con frecuencia de reloj de 2.3 GHz, cuatro núcleos y ocho subprocesos. Además, posee integrado un procesador gráfico que beneficiaría al análisis de las capturas hechas por la cámara.

Esta plataforma posee cuatro interfaces USB 3.0, ideales para establecer conexión entre la cámara y la plataforma. Además de esto, tiene la capacidad de comunicarse con un controlador lógico programable a través de PROFIBUS o PROFINET con el fin de intercambiar señales necesarias para el control de las válvulas solenoides neumáticas. Esto quiere decir que la plataforma se encargará únicamente de realizar el procesamiento de imágenes y delegará la tarea de activar las válvulas solenoides neumáticas.

Se debe resaltar que posee puertos de expansión PCI Express con los cuales se pueden agregar tarjetas de interfaces USB 3.0 y lograr obtener un arreglo de cámaras con el fin de optimizar la detección de imagen. Otro aspecto importante es que se puede adquirir con sistema operativo preinstalado, Windows 7 de 32 o 64 bits, o sin el mismo para que el usuario pueda realizar una instalación del sistema operativo deseado.

Figura 68. Equipo SIMATIC BOX PC IPC627D



3. **Controlador lógico programable.** Existen distintos modelos de controladores lógicos programables (PLC por sus siglas en inglés). *Siemens* presenta una gran variedad para poder ajustar los mismos a las necesidades de los proyectos. En este caso no se requiere un PLC capaz de poder comunicarse con la plataforma seleccionada, ya sea a través de PROFINET o PROFIBUS y la gran mayoría de PLCs tienen esa capacidad. *Siemens* apuesta por sistemas modulares, por esta razón es común adquirir módulos de expansión para poder tener una mayor cantidad de entradas digitales, salidas digitales, entradas analógicas o salidas analógicas, aparte de las que pueda traer disponible el PLC.

Para este prototipo no se requiere de una gran cantidad de entradas y salidas, ya sea digitales o analógicas, pues básicamente se estarán manejando nueve válvulas solenoides neumáticas que requieren únicamente una señal para cambiar el estado de apagado a encendido y viceversa.

Por esta razón se optó por un PLC bastante básico de la familia S7-1200 cuyo modelo es 6ES7214-1AF40-0X0B. Este PLC puede alimentarse con 100/240 V AC o con 24 V DC si se adquiere el conector especial suministrado por *Siemens*.

Figura 69. Controlador Lógico Programable S7-1200 6ES7214-1AF40-0XB0



4. **Módulo de salidas digitales.** El módulo recomendado se ajusta directamente al PLC seleccionado anteriormente por medio de su puerto de conexión. A pesar de que posee diez salidas digitales, si se da el caso de aumentar la cantidad de válvulas solenoides neumáticas se hace necesario expandir los puertos. Además, puede que se utilicen los puertos de salida del PLC para otras aplicaciones como indicadores en el tablero, luces de emergencia o advertencia, etc. El módulo de expansión propuesto agrega otras ocho salidas digitales, suficientes para cubrir alguna posible expansión. Si en dado caso no es suficiente, el PLC seleccionado posee modelos de expansión de hasta dieciséis salidas digitales.

Este módulo posee salidas de transistor y por ende la corriente que suministra es baja comparada con la necesaria para activar el solenoide de la válvula neumática por lo que se recomienda utilizar relés de estado sólido para activar las válvulas solenoides neumáticas.

Figura 70. Módulo de salidas digitales 6ES7222-1BH32-0XB0



5. **Fuentes de poder.** Se requiere de una fuente de poder adecuada para alimentar al PLC, el módulo de salidas digitales y las válvulas solenoides neumáticas, pensando también en la posibilidad de un incremento de las mismas en un futuro. Cabe mencionar que el voltaje nominal de los dispositivos mencionados anteriormente es de 24 V por lo que la fuente de poder debe proveer ese voltaje. En el caso de la cámara, su voltaje nominal es de 5 V por lo que se alimentará con una fuente distinta. Es necesario contemplar una fuente de poder independiente para la cámara ya que no se recomienda que sea energizada por el voltaje que provee la interfaz USB 3.0 pues se requiere que la cámara mantenga su rendimiento todo el tiempo. Además, si existe un incremento en la cantidad de cámaras, la interfaz USB 3.0 no será capaz de suplir la corriente necesaria para las cámaras.

Figura 71. Fuente de poder SITOP 6EP1337-3BA00



Figura 72. Fuente de poder LOGO!Power 6EP1311-1SH13

