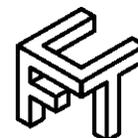




Universidad de Matanzas  
Facultad de Ciencias Técnicas



# MONITOREO DE LAS DIMENSIONES DEL CORDÓN DE SOLDADURA MEDIANTE PROCESAMIENTO DE IMÁGENES DIGITALES

Tesis Presentada como Requisito Parcial  
para la Obtención del Título de  
Máster en Ingeniería Asistida por Computadora

Autor: Ing. Darien Menéndez Molina

Tutores: Dr.C. Marcelino Rivas Santana

Dr.C Raúl Mario del Toro Matamoros

Matanzas, 2019

## **DECLARACIÓN DE AUTORIDAD Y NOTA LEGAL**

Yo, Darien Menéndez Molina, declaro que soy el único autor de la siguiente tesis, titulada *Monitoreo de las dimensiones del cordón de soldadura mediante procesamiento de imágenes digitales* y, en virtud de tal, cedo el derecho de copia de la misma a la Universidad de Matanzas, bajo la licencia *Creative Commons* de tipo *Reconocimiento No Comercial Sin Obra Derivada*, con lo cual se permite su copia y distribución por cualquier medio siempre que mantenga el reconocimiento de sus autores, no haga uso comercial de la obra y no realice ninguna modificación de ella.

Matanzas, 20 de febrero de 2019

## RESUMEN

Los procesos de soldadura automática son ampliamente usados en la industria de manufactura, especialmente en la obtención de recipientes a presión, donde toma un gran interés el control de los parámetros del cordón para garantizar la calidad del proceso. Debido a esto, los métodos de monitoreo juegan un papel importante, ya que éste debe realizarse de forma rápida y segura para garantizar la calidad y productividad del proceso. En el trabajo se muestra un sistema de monitoreo para el control de la calidad del cordón de la soldadura bajo fundente, basada en técnicas de procesamiento digital de imágenes. El método se basa en el uso de un haz de luz estructurada, el cual genera una imagen que es captada por una cámara digital. La imagen obtenida es procesada, eliminando el ruido mediante un filtro gaussiano. Posteriormente, se transforma la imagen al modelo matriz-saturación-luminosidad, se segmenta por el color del láser utilizado y se selecciona la región de interés. Finalmente, se aplica la transformada de Hough, con la correspondiente calibración, para calcular el ancho del cordón y la altura del refuerzo. Los parámetros a controlar se muestran a través de un visualizador gráfico que permite una rápida interpretación de los resultados. La propuesta fue validada en una empresa de fabricación de cilindros de gas. Se realiza el análisis económico de la instalación propuesta, demostrándose la factibilidad de la misma.

**Palabras claves:** Soldadura bajo fundente; Monitoreo; Procesamiento digital de imágenes.

## **ABSTRACT**

Submerged arc welding processes are widely used in manufacturing industry, especially in the production of pressure vessels, where the control of welded joint parameters is of great interest to guarantee the quality of the process. Because of this, monitoring methods play an important role, since it must be done quickly and safely to ensure the process quality and productivity. The work shows a monitoring system for the control of the quality of the welded joint, based on digital image processing techniques. The method is based on the use of a structured beam of light, which generates an image that is captured by a digital camera. The obtained image is processed, eliminating the noise by means of a Gaussian filter. Afterwards, the image is transformed to the hue-saturation-lightness model, it is segmented by the color of the used laser and the region of interest is selected. Finally, the Hough transform is applied, with the corresponding calibration, for computing the width of the weld bead and the height of the reinforcement. The parameters to be controlled are shown through a graphic display that allows a quick interpretation of the results. The proposal was validated in a liquefied petroleum gas vessels manufacturing company. The economic analysis of the proposed installation is carried out, demonstrating its feasibility.

**Keywords:** Submerged arc welding; Monitoring; Image digital processing

## **AGRADECIMIENTOS**

Quisiera agradecer primeramente a Dios por bendecirme tanto y darme la oportunidad de terminar estos estudios, a Él le debo todo.

Agradecer a mi familia quienes me apoyan siempre y bendicen tanto mi vida, les amo.

Agradecer a todos los profesores que han compartido su tiempo y conocimientos conmigo, su contribución ha sido muy importante para mi formación como profesional, le agradezco a todos, y en especial al Dr. Marcelino, por su ayuda y ánimo impartido durante toda la investigación.

Agradecer a mis amigos y todos los que me han dado su apoyo para poder llegar hasta aquí.

## TABLA DE CONTENIDO

Introducción .....	1
Capítulo 1. Monitoreo de soldadura por sistemas de inspección visual automatizados .....	6
1.1 Generalidades.....	6
1.2 Introducción a la inspección visual automatizada .....	6
1.2.1 Definición .....	7
1.2.2 Características principales .....	7
1.2.3 Relación con la Inteligencia Artificial .....	8
1.3 Componentes y elementos de un sistema de visión artificial. ....	10
1.3.1 Iluminación .....	10
1.3.2 Cámaras.....	12
1.3.3 Unidad de procesamiento.....	12
1.4 Ventajas y desventajas de los sistemas de visión artificial. ....	14
1.5 Defectos de la unión soldada. ....	15
1.6 Conclusiones parciales.....	16
Capítulo 2 Sistema de inspección visual propuesto para el monitoreo de las dimensiones del cordón de la soldadura ecuatorial del cilindro de 10 Kg.....	17
2.1 Generalidades.....	17
2.2 Sistema de monitoreo para el control de la calidad del cordón de la soldadura bajo fundente, basada en técnicas de procesamiento digital de imágenes.....	17
2.2. Algoritmo utilizado para la inspección visual automática.....	22
2.2.1 <i>Captura de imagen</i> .....	23
2.2.2 <i>Filtro Gaussiano</i> .....	23

2.2.3	<i>Conversión al espacio HSL (Matiz-Saturación-Luminosidad)</i> .....	25
2.2.4	<i>Segmentación por color</i> .....	28
2.2.5	<i>Extracción de la región de interés (ROI)</i> .....	29
2.2.6	<i>Adelgazamiento del haz láser</i> .....	31
2.2.7	<i>Transformada de Hough</i> .....	31
2.2.8	<i>Identificación de puntos de interés</i> .....	32
2.2.9	<i>Cálculo de las dimensiones del cordón</i> .....	35
2.3	Software (Tutorial).....	36
2.3.1	<i>Interfaz principal</i> .....	37
2.3.2	<i>Funcionalidad Ajustar</i> .....	38
2.3.3	<i>Funcionalidad Calibrar</i> .....	39
2.3.4	<i>Funcionalidad Inspeccionar</i> .....	39
2.3.5	<i>Funcionalidad Salir</i> .....	40
2.4	Conclusiones parciales.....	40
Capítulo 3 Validación del sistema de monitoreo propuesto. ....		41
3.1	Generalidades.....	41
3.2	Esquema de la instalación experimental .....	41
3.3	Análisis de costo. ....	43
3.4	Coste computacional.....	44
3.5	Caso de estudio. ....	45
3.5.1	<i>Formulación del problema</i> .....	45
3.5.2	<i>Etapa de preparación</i> .....	46
3.5.3	<i>Etapa de monitoreo</i> .....	47

3.6 Conclusiones parciales.....	49
Conclusiones.....	50
Recomendaciones.....	51
Referencias Bibliográficas.....	52

## INTRODUCCIÓN

La automatización en la industria es un fenómeno creciente y característico de las dos últimas revoluciones industriales. Los avances en esta rama están enfocados en aumentar la eficiencia y productividad de las fábricas. Las Smart Factories, Industria 4.0 o también llamadas Ciberindustrias, son conceptos aplicados a la moderna revolución industrial que cada día ganan más terreno, y abogan por una mayor automatización de sus procesos.

La inspección de la producción es otra de las áreas que precisan de automatización. Cuando se elabora un producto determinado al finalizar su cadena de fabricación o en alguna otra etapa previa, un operario debe inspeccionar cuidadosamente que el producto cumpla con los parámetros deseados. Un trabajador humano está propenso a fallas por cansancio, distracción, enfermedad, factores psicológicos, etc. Una máquina no come, no descansa, no se enferma, no se distrae, ni influyen ninguno de los factores antes mencionando, que si lo hacen en el humano. Por tanto, las maquinarias son más aptas para realizar arduos trabajos sin variar el ritmo, aspectos necesarios en las industrias actuales.

La inspección visual en una cadena de montaje es una tarea repetitiva que, si se logra dotar a una máquina con los procedimientos adecuados, logra realizar dicha tarea con mayor calidad que su homólogo humano. Al delegar la inspección a un sistema electrónico, es posible incrementar el ritmo de trabajo, por lo que también propicia el aumento de la productividad y beneficia a la industria.

No es que se esté de acuerdo con eliminar por completo el factor humano en las fábricas, sino más bien, relevarlo de tarea agotadoras y perjudiciales para la salud; y ubicarlo en

áreas más cómodas de trabajo, donde se aproveche más una de las cualidades que lo distingue del resto de los seres vivos, la inteligencia.

Desde hace años el perfeccionamiento empresarial es un proceso que han tomado un gran interés en Cuba. Mayores niveles de productividad con mejores niveles de calidad son los objetivos de este proceso nacional. Una de las industrias que está siendo evaluada y reestructurada es la de conformación de metales (CORFORMAT), actualmente encargada de la producción de cilindros de gas licuados.

La inspección a la calidad en el proceso de manufactura del cilindro de gas, es de vital importancia. Dada la presión a la que son sometidos los cilindros por el gas contenido, una falla puede convertir al cilindro en un elemento explosivo, y su distribución alcanza a todos los hogares del país. Entre los elementos más importantes a tener en cuenta durante la inspección se destaca la soldadura ecuatorial, sus parámetros son descrito en (COVENIN 2012). El tipo de soldadura que se emplea es de arco sumergido, y lo analizado por la inspección son las características del cordón de soldadura.

La inspección que en ella se lleva a cabo se realiza de forma manual, por un operario, el cual selecciona una muestra representativa de la totalidad de los cilindros confeccionados. Para inspeccionar los parámetros de calidad del cordón de soldadura se emplea un pie de rey, con el cual se mide el ancho y la altura del cordón. El mecanismo actual que se lleva a cabo es imposible de aplicar a la totalidad de los cilindros, porque atentaría contra el ritmo de producción que se requiere y difícilmente sería posible llevar a cabo por un operario humano. Además, en la manera que está concebido en la actualidad el proceso de inspección por selección, conlleva a que puedan escapar algunos botellones con defecto

que deberán ser identificados en posteriores etapas del proceso de producción, generando gastos de recursos en productos no calificados, de lo que deriva el **problema de la investigación**: El proceso de inspección que garantiza la calidad de la soldadura bajo fundente se realiza de forma manual por un operario en un ritmo no acorde a la producción, se realiza solamente a una muestra y no a la totalidad de los productos, dejando escapar cilindros defectuosos que deberán ser identificados en futuras etapas, lo que conlleva gasto en tiempo y recursos.

Siguiendo entonces la siguiente **hipótesis**: un sistema de monitoreo capaz de identificar en tiempo real anomalías en el proceso de soldadura, constituiría una vital herramienta para la inspección de la calidad de producción, pudiéndose emplear en la totalidad de los cilindros y no en una muestra de ellos. Permitiría además identificar los errores tempranamente, evitando que continúen cilindros defectuosos en posteriores etapas de manufactura, y por consiguiente un ahorro de materiales y tiempo en el proceso de producción.

Siendo el **objetivo general**:

- Alcanzar mayores niveles de calidad en la producción de cilindros de gas licuado con un mayor ahorro de recursos, mediante la identificación temprana de defectos en el producto.

Teniendo como objetivos específicos:

- Analizar el estado del conocimiento sobre las técnicas de inspección visual automatizada, su aplicación en los procesos de manufactura y sobre los parámetros de soldadura.
- Realizar una propuesta de dispositivo de monitoreo diseñado para su confección a un bajo costo y de fácil implantación.
- Validar los resultados obtenidos por el dispositivo de monitoreo propuesto.

El cumplimiento de los objetivos trazados conlleva a que se obtenga como resultado, un dispositivo de bajo costo capaz de ejecutar en tiempos de producción un algoritmo basado en técnicas de visión por computador para el monitoreo de parámetros a la soldadura bajo fundente, que permita realizar el proceso de inspección a la soldadura de manera automatizada a la totalidad de los productos.

Esta investigación tendrá un **valor económico**, pues con la automatización de la inspección a la soldadura se identificarán defectos en una etapa temprana del proceso de producción, permitiendo que puedan ser corregidos rápidamente y se aumente el ritmo de producción. Además, la temprana identificación de defectos permite el ahorro de materiales que de otra manera serían empleados inútilmente en cilindros defectuosos.

También posee un **carácter social**, pues la automatización de este proceso permitirá proveer de mejores condiciones de trabajo para el operario encargado de la inspección, haciéndola más sencilla y humana. Un aumento de la calidad del producto final, aseguraría una mejor protección al consumidor, los cuales se extienden a toda la nación.

Posee un **valor práctico**, pues el resultado final de la investigación, un dispositivo de bajo costo, podrá ser empleado por empresas que realicen una inspección a la soldadura de sus productos.

Los **métodos de investigación** utilizados dependen del objeto de investigación y de sus objetivos. En esta se utilizaron del tipo teórico los siguientes:

Análisis y síntesis: permitirá como método, analizar la situación problemática y buscar la información necesaria para establecer el problema y la hipótesis de la investigación.

Hipotético–deductivo: Permitirá, a partir de la hipótesis asumida, elaborar conclusiones partiendo del análisis del conjunto de datos y de principios más generales, los resultados de la investigación.

# **CAPÍTULO 1. MONITOREO DE SOLDADURA POR SISTEMAS DE INSPECCIÓN VISUAL AUTOMATIZADOS**

## **1.1 Generalidades**

En este capítulo se realiza un estudio del estado del arte referente a los sistemas de inspección visual automatizados, la relación existente con la disciplina de inteligencia artificial, los componentes que conforman un sistema de su tipo, ventajas y desventajas que poseen, así como la definición de los conceptos fundamentales para una mejor comprensión de la temática seleccionada.

## **1.2 Introducción a la inspección visual automatizada**

La inspección visual automatizada surge por la necesidad de asistir o sustituir a los operarios en las actividades de inspección dentro de las líneas de montaje. La creciente demanda de los niveles de producción cada vez más altos conlleva a jornadas laborales más agotadoras para los operarios o la incorporación de nuevos turnos de trabajos. Las máquinas son ideales para tales exigencias, pues no padecen de cansancio o fatiga al someterse a extensas sesiones de trabajo como si le ocurre los seres humanos, y siempre producen el resultado para lo cual fueron programadas.

La inspección visual automatizada se apoya en técnicas de visión artificial y procesamiento de imágenes digitales. La visión artificial es una disciplina de la ciencia de la computación, intenta simular el funcionamiento de la visión humana. La adquisición de imágenes por parte de los ojos le corresponden a una o varias cámaras, y su comprensión por parte del cerebro son simulados por algoritmos computacionales que se encargan de extraer la

información, analizarla y tomar decisiones. El procesamiento de imágenes se compone de un conjunto de técnicas (algoritmos computacionales) que se aplican sobre imágenes digitales con el objetivo de producir un cambio sobre ellas que mejore en algún aspecto la visualización o extracción de información contenida.

Esta técnica tiene como beneficios ante otras, que no entra en contacto con el objeto a inspeccionar. Cualidad importante para la industria alimenticia, semiconductores, manufactura a altas temperaturas o expuestas a corrientes eléctricas, donde se desea preservar las características del objeto o la salud de un operario. Si se incluye en etapas tempranas del proceso de producción, contribuye a un mejor aprovechamiento de los recursos, al eliminar de la cadena de producción los productos que han sido detectados con defectos. Por lo que se ahorra el continuar invirtiendo en un objeto defectuoso y puede pasar prontamente a una etapa de recuperación. De esta manera se contribuye a lograr una producción más limpia.

### **1.2.1 Definición**

La inspección visual automatizada puede ser definida como la actividad de revisar visualmente un objeto empleando una máquina sin la supervisión de un humano.

### **1.2.2 Características principales**

Atendiendo a los sistemas elaborados a lo largo de la automatización industrial, puede establecerse una clasificación de los sistemas basados en captura de imágenes según la manera de caracterizar los defectos a detectar en: sistemas de detección de anomalías y en

sistemas basados en medición. Si bien todos tienen como objetivo el control del producto bajo ciertos parámetros de calidad, no todos operan de igual forma. Los sistemas basados en detección de forma, textura, intensidad, color, pertenecerían al primer grupo (un ejemplo serían: (Wang et al., 2010) (Nashat et al., 2011a) (Hocenski et al., 2009) (Adamo et al., 2009a) (Chetverikov and Hanbury, 2002)), mientras que los basados en coordenadas y métricas de distancias en el segundo (un ejemplo lo constituyen: (Xu et al., 2010, Zhang and Li, 2014)).

### **1.2.3 Relación con la Inteligencia Artificial**

La cuidadosa selección de los métodos más eficientes para la inspección visual es una tarea de expertos. La rama de la inteligencia artificial si bien no ha logrado cambiar del todo esta realidad, tiene un espacio en esta área del conocimiento. Propicia en muchos casos, la búsqueda de parámetros óptimos para los algoritmos empleados, de manera que su utilización aumenta cada vez más ofreciendo soluciones que de otra manera sería difícil de obtener.

Con el objetivo de aprender a reconocer los defectos en los productos inspeccionados se emplean un grupo de algoritmos estándares de aprendizaje supervisado. (Mera et al., 2016) menciona y cita ejemplos de los algoritmos más empleados: árboles de decisiones, clasificadores estadísticos, redes neuronales y máquinas de soporte de vectores.

Existen un gran número de técnicas de inteligencia artificial aplicadas al proceso de inspección visual en la industria. Un ejemplo del empleo del método de recocido simulado, lo presenta (Hu, 2014), para la identificación de defectos en la industria textil, con un alto

índice de detección. Un modelo empleando algoritmos evolutivos es presentado por (Tong et al., 2016), específicamente emplea la variante CoDE para la búsqueda de parámetros óptimos a emplear con filtro de Gabor para la detección de defectos. Los resultados obtenidos mejoran los indicadores de efectividad y rendimientos que los algoritmos anteriores aplicados en su especialidad, como por ejemplo el propuesto por (Hu, 2014, Hu et al., 2015), que aplican otras técnicas de inteligencia artificial.

Los sistemas de expertos también se han empleado junto con métodos de inspección visual. Un ejemplo de ello lo es (Lin et al., 1995), cuya propuesta proporciona al operador una base de conocimientos para consulta en la inspección de la tela. Para mejorar la efectividad del sistema, los autores proponen una innovadora combinación con un sistema de diagnóstico basado en la teoría de conjuntos difusos.

Una aplicación de las Redes Neuronales al proceso de inspección automatizada lo constituye, (Trétout et al., 1995), donde se construye una red neuronal multicapa para la clasificación de defectos en imágenes de temperatura, tomadas de largas porciones externas de aviones. Las bajas tasas de errores obtenidas hacen de este método satisfactorio a emplearse en inspección. En (Shen et al., 2016) se emplea satisfactoriamente una red neuronal SOM para la clasificación de defectos en la integración 3D por TSV (Through-silicon via). Un nuevo paradigma llamado Deep Machine Learning es presentado por (Weimer et al., 2016) para determinar la mejor configuración de una red neuronal convolucional para la extracción de características automáticas en la inspección industrial, de manera que puede enfrentarse la detección de defectos con un menor dominio del problema.

La planificación de la inspección también presenta sus retos. En (Anagnostakis et al., 2016) se realiza una revisión bibliográfica exhaustiva de los sistemas de planificación de la inspección para máquinas de medición coordinadas (CMM). Se presenta una clasificación atendiendo a las tecnologías empleadas para asistir la planificación de las cuales cabe destacar la influencia de Sistemas Expertos, específicamente los basados en conocimientos (KB); las Redes Neuronales; los Algoritmos Genéticos y los sistemas basados en Lógica Fuzzy. Este trabajo refleja la necesidad de abordar de forma correcta la captura de conocimiento en el proceso de inspección, algo que todavía requiere de mayor revisión, así como propone futuros trabajos en el área.

Como plantea (Fan, 2009), quien además referencia un gran número de trabajos de IA, la Inteligencia Artificial ofrece un gran potencial no solo para los procesos de inspección sino para el diseño ingenieril manufacturado en general.

### **1.3 Componentes y elementos de un sistema de visión artificial.**

Un sistema de visión artificial generalmente se compone de cinco elementos básicos, como plantea (Brosnan and Sun, 2004). Iluminación, cámaras, tarjeta de captura de imagen, hardware de computadora y software.

#### **1.3.1 Iluminación**

Definiremos la iluminación como: el componente encargado de proveer las condiciones adecuadas de luz en la escena, para obtener una correcta captura de las imágenes del objeto a inspeccionar.

La iluminación que se emplea en el proceso de captura de las imágenes es otro de los aspectos que debe ser cuidadosamente atendido, su objetivo es asistir en una mejor captura de las imágenes a procesar. Una inadecuada iluminación puede introducir defectos en las imágenes adquiridas y por consiguiente un mal procesamiento y resultado final.

El tipo de iluminación depende del espectro donde se desee trabajar, puede variar desde rayos X, pasando por el espectro ultravioleta, luz visible, e infrarrojo. El espectro infrarrojo es útil para trabajar con imágenes de temperatura como en (Trétout et al., 1995), o para el diagnóstico de objetos que trabajan específicamente en este rango de frecuencia como los filtros IR-CUT en (Liu and Yu, 2014). El espectro visible para la inspección que podría hacer un humano, tiende a emplearse para detección de defectos en materiales, como micro-fisuras en metales, semiconductores, etc. En (Gonzalez and Woods, 2008) se pueden identificar más ejemplos incluso sobre otros espectros de trabajo.

El montaje de la iluminación puede llegar a ser un componente costoso en dependencia de sus características. El empleo de luminarias de bajo costo probablemente requerirán de ajustes para paliar cualquier inconveniente, como plantea (Adamo et al., 2009a). Una tendencia es el uso de luminaria LED (Di Leo et al., 2017), tecnología que abarata los costos de montaje y mantenimiento, aunque (Silva, 2015) señala su sensibilidad al brillo; sin embargo (Zhang and Li, 2014) posee un criterio diferente.

### **1.3.2 Cámaras**

Las cámaras son el componente indispensable en los sistemas de inspección visual, pues estos pretenden simular la visión humana. Su objetivo es capturar la escena real y enviar en forma de imagen digital los datos para su análisis por la unidad de procesamiento.

Existen muchos tipos de cámaras que operan en diferentes espectros de visión, pero las más empleadas por su solides según plantea (Zhang and Li, 2014), son las de tipo CCD (Charge Coupled Device) y las de tipo CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor). El mismo autor señala hacia las de tipo CCD como las predominantes para la visión por computador por sus características, pero las de tipo CMOS para inspección de las líneas de producción por su rapidez. Una descripción del funcionamiento interno de las cámaras CCD es presentado por (Gonzalez and Woods, 2008). En (Pribula et al., 2011) vemos como se recomienda el uso de iluminación LED junto con cámaras CMOS para evitar errores de medición.

La mayoría de los trabajos en esta rama señalan el empleo de una sola cámara, esto es debido al amplio trabajo sobre imágenes en dos dimensiones, aunque realmente la cantidad depende de las características de lo que se quiera inspeccionar y las condiciones en que debe hacerse.

### **1.3.3 Unidad de procesamiento**

Para la ejecución de los algoritmos seleccionados que procesarán las imágenes capturadas, se requiere de una unidad de procesamiento. Tradicionalmente y en la mayoría de los casos se emplean CPUs (ejemplo: (Nashat et al., 2011b) (Adamo et al., 2009b) (Zhang and Li,

2014)) mediante la utilización de estaciones de trabajos de una considerable potencia. A pesar del aumento de las capacidades de cálculo de los microprocesadores modernos, no siempre resultan suficiente para la ejecución de algoritmos complejos con gran rapidez; y bajo condiciones más exigentes no suplen la potencia requerida.

Algunas alternativas se inclinan por paralelizar los algoritmos, de modo que se aproveche mejor las capacidades que incluyen los micro-procesadores modernos de incluir varios núcleos en un solo integrado, o de emplear varios ordenadores distribuyendo la carga de trabajo, como en (Adamo et al., 2009b). La paralelización de algoritmos es una disciplina con gran auge en la actualidad, pues promete mejorar los tiempos de ejecución de los algoritmos. Si bien esta técnica adiciona un nivel mayor de complejidad de diseño en la confección del sistema de inspección, muchas veces no logra establecer mejoras significativas, puesto que el procesamiento digital de imágenes responde mayormente a un estilo arquitectónico de filtro y tuberías, y su ejecución es prácticamente secuencial, como se nota en (Sun, 2000) en el esquema de sus diferentes niveles.

Propuestas como (Hocenski et al., 2009) (Hajimowlana et al., 1997) (GholamHosseini and Hu, 2008), sugieren el empleo de FPGA para lograr tiempos de ejecución más reducidos en comparación con los microprocesadores. Las FPGA permiten ser programadas para ejecutar tareas complejas en pocos ciclos de reloj, lo que garantiza una velocidad de ejecución alta, como la que exigen un sistema de inspección visual en las cadenas de montajes. La forma en que están diseñadas las hace ideales para el procesamiento de imágenes y señales, aunque tienen sus límites en cuanto a los tipos de algoritmos que se pueden ejecutar sobre ellas. Una variante es emplearlas de conjunto con un microprocesador, como en (GholamHosseini and Hu, 2008).

Otra manera de abordar el problema del rendimiento de los algoritmos, lo constituye el uso de programación gráfica. En la última década el empleo de la GPU para realización de cálculos ha ganado en popularidad, pues se emplea las potencialidades que poseen estas unidades para ejecutar tareas en paralelo. Un estudio que aprovecha dichas ventajas lo presentan (Smistad et al., 2015), abordando la necesidad de obtener rápidos resultados con el aumento cada vez mayor de la calidad de las imágenes para diagnóstico.

Una variante de hardware prometedora para futuras configuraciones de sistemas de inspección visual de bajo costo, lo constituye la plataforma ARM. Si bien no posee un gran potencial de cálculo, si lo es en portabilidad y prestaciones para inspecciones automáticas sencillas. Además, en los últimos años se ha experimentado un incremento en su desarrollo debido a la popularidad de los dispositivos móviles y el fenómeno de la Internet de las Cosas. Actualmente se realizan muchos estudios con aceptables resultados empleando esta plataforma, específicamente sobre placas reducidas con la Raspberry Pi como máximo exponente por ser la más barata. Un ejemplo con constituyen (Huamantínco Cisneros et al., 2016) (Azaiez et al., 2016).

#### **1.4 Ventajas y desventajas de los sistemas de visión artificial.**

Los sistemas de medición basados en imágenes, tienen como ventaja que logran obtener las métricas necesarias sin contacto directo con el objetivo, condición necesaria cuando el objeto es de difícil acceso, ya sea por las condiciones del medio o por las características del objeto, un ejemplo de ello lo pueden constituir objetos de dimensiones microscópicas como en (Szydłowska et al., 2016). Además de la posibilidad de integrarse a un sistema

de control del proceso de manufactura que vaya clasificando los objetos según sus parámetros de calidad.

Los componentes necesarios para su confección son de fácil adquisición, principalmente una cámara, iluminación y una unidad de procesamiento. Con respecto a otros sistemas, como: pruebas de ultrasonido, pruebas radiográficas, mediante partículas magnéticas o con líquidos penetrantes, suele ser más económica de implementar. Por tales características estos sistemas tienen un amplio uso en la industria moderna.

Estos sistemas tienen como desventaja, que la selección de los algoritmos para el procesamiento de las imágenes del objeto a medir, se hacen basados en la experiencia de un experto en procesamiento digital de imágenes, y el ajuste de sus parámetros muchas veces se obtienen tras múltiples ensayos. Esto es debido a que tales algoritmos son sensibles a condiciones ambientales, digase iluminación, calidad de las imágenes capturadas, ruido imagenológico. Algunos estudios intentan realizar propuestas para abordar tal problema (Di Leo et al., 2017). Con respecto a otras técnicas de inspección mencionadas anteriormente tiene como desventaja que, por la naturaleza de este tipo de prueba, solamente se realiza en la superficie visible de la soldadura.

### **1.5 Defectos de la unión soldada.**

Al realizar una soldadura entre dos piezas metálicas pueden aparecer diversos tipos de defectos, los cuales pueden ser detectados mediante una cuidadosa inspección a la unión soldada. Un cordón defectuoso puede ser producido por errores de manipulación de la antorcha durante el proceso de soldadura. Los parámetros de ancho y alto definen la

geometría del cordón de soldadura, su análisis brinda una apreciación de la calidad con que se realizó dicho proceso. La aparición de poros, grietas o fisuras, valles, socavaduras, concavidades, mordeduras, exceso de penetración, inclusiones de escoria, son defectos producidos por errores de manipulación, falta de limpieza, mala calidad de las herramientas o de las propiedades del fundente. La temprana detección de tales defectos es de gran importancia, pues aseguran la calidad del producto y disminuyen la probabilidad de futuros accidente.

## **1.6 Conclusiones parciales**

1. El incremento de sistemas de inspección visual y monitoreo automatizados en la industria moderna en una tendencia, se ha realizado un gran número de trabajos en esta área con buenos resultados. Las técnicas de procesamiento de imágenes digitales, visión por ordenador y de inteligencia artificial son la base para la construcción de tales sistemas.
2. La selección de los componentes que conforman cada una de las partes de un sistema de inspección visual es de vital importancia. Existen una gran variedad de estos componentes y su elección deberá estar en correcta correspondencia con los requerimientos del proyecto.

## **CAPÍTULO 2 SISTEMA DE INSPECCIÓN VISUAL PROPUESTO PARA EL MONITOREO DE LAS DIMENSIONES DEL CORDÓN DE LA SOLDADURA ECUATORIAL DEL CILINDRO DE 10 KG.**

### **2.1 Generalidades.**

En este capítulo se realiza una descripción de los componentes empleados para la confección del sistema de monitoreo para el control de la calidad del cordón de soldadura bajo fundente. Se describen paso a paso las etapas propuestas del algoritmo capaz de realizar la inspección visual automática, y sus fundamentos matemáticos. Se presentan funcionalidades del software que se ejecuta dentro del dispositivo de monitoreo.

### **2.2 Sistema de monitoreo para el control de la calidad del cordón de la soldadura bajo fundente, basada en técnicas de procesamiento digital de imágenes.**

El sistema diseñado deberá poseer las siguientes características: capacidad de medir las pequeñas variaciones del cordón de soldadura de acuerdo con los estándares de la empresa; rápido procesamiento, puesto que no puede afectar la producción, y bajo costo de fabricación e implantación.

La configuración de hardware del sistema fue seleccionada atendiendo al requerimiento de diseñar un sistema de bajo costo de fabricación e implantación. Teniendo en cuenta tales características se seleccionó como unidad de procesamiento la Raspberry Pi 2. Un ordenador de placa reducida que, con los avances en la electrónica se ha hecho posible su construcción a bajos precios. Actualmente ha sido empleado en una gran cantidad de proyectos, y posee un gran soporte por la comunidad en cuanto a software. La Raspberry Pi ha ganado gran popularidad en la comunidad DIY (siglas de "Do It Yourself", "Hágalo

Usted Mismo") por las potencialidades que brinda a precios muy bajos; lo que la convierte en componente ideal para emprender proyectos que no dispongan de grandes fondos (Maksimović, 2014), un ejemplo lo constituyen (Leccese, 2014) (Agrawal, 2015) (Vujović, 2015).



*Figura 2.1: Ordenador de Placa Reducida Raspberry Pi 2 B*

Específicamente se seleccionó el modelo Raspberry Pi 2 B (ver Figura 2.1), debido a que posee mejoras y mayor capacidad de procesamiento que su antecesor, con esto se evita los inconvenientes planteados por (Silva, 2015), quien realiza un estudio de factibilidad de la Raspberry Pi para aplicaciones industriales. Un ejemplo satisfactorio de su uso lo aporta (Azaiez et al., 2016). Las características del modelo empleado se detallan en la Tabla 2.1.

*Tabla 2.1: Características de la Raspberry Pi 2 B*

<b>CPU</b>	Broadcom BCM2836, 900 MHz quad-core ARM Cortex A7
<b>GPU</b>	Broadcom VideoCore IV,,54 OpenGL ES 2.0
<b>Memoria</b>	1 GB

<b>Consumo</b>	800 mA, (4.0 W)
<b>Alimentación</b>	5 V vía Micro USB o GPIO header
<b>Dimensiones</b>	85.60mm × 53.98mm64 (3.370 × 2.125 inch)
<b>Conectividad de Red</b>	10/100 Ethernet (RJ-45) via hub USB
<b>Periféricos Bajo Nivel</b>	17 x GPIO y un bus HAT ID
<b>Costo</b>	\$35

La cámara seleccionada fue la denominada PI-CAMERA (ver Figura 2.2). Su selección se basó por su compacto formato, total compatibilidad con la Raspberry Pi sin necesidad de software controladores, fácil instalación, concebida para instalarse en la misma carcasa y un bajo costo de sólo \$19,95. Algunas de sus características se muestran en la Tabla 2.2.

*Tabla 2.2: Características de la PI-CAMERA*

<b>Resolución Nativa</b>	2592 x 1944 (5MP)
<b>Formato Video</b>	1080p30, 720p60
<b>Interfaz</b>	Csi
<b>Peso</b>	3g
<b>Tamaño óptico</b>	1/4"
<b>Otras</b>	1,4 µm X 1,4 µm píxeles con tecnología OmniBSI de alto rendimiento (alta sensibilidad, baja diafonía, ruido bajo)  Funciones de control de imagen automáticas  Control automático de exposición (AEC)

	<p>Balance de blancos automático (AWB)</p> <p>Filtro de banda automático (ABF)</p> <p>Calibración del nivel de negro automático (ABLCL)</p> <p>Controles programables para la velocidad de fotogramas, AEC / AGC 16 zonas / posición / control de peso, espejo y lado, recorte, ventanas, y el panorama</p>
--	---



*Figura 2.2: Cámara denominada PI-CAMERA, compatible con Raspberry Pi*

Las condiciones de iluminación actuales en la fábrica no son las más adecuadas para el empleo de cámaras. El uso de luminarias convencionales o de tipo LED, por su bajo consumo, excelente iluminación y resistencia, no son ideales en este caso, por tratarse de superficies metálicas que reflejan fácilmente la luz incidente. Por tanto, cualquier intento de mejorar la iluminación mediante el empleo de lámparas, propiciará el aumento de efectos no deseados durante el proceso de captura de imágenes; para evitar tal situación, se hace uso de luz estructurada.

La luz estructurada se conforma con la impresión de un patrón usando luz láser. El patrón seleccionado es una línea, la cual se distorsiona cuando se encuentra con el cordón de soldadura. Esta distorsión es empleada para determinar las dimensiones del cordón, que son de importancia a la hora de determinar la calidad de la soldadura. El empleo de la luz estructurada, elimina los efectos negativos de puedan producir las diversas condiciones de iluminación ambiental.

El dispositivo emisor de la luz estructurada para la confección del prototipo propuesto es: LFL 650nm MODELO: 70104011 (Láser de Línea), ver Figura 2.3.



*Figura 2.3: Láser de línea, modelo 70104011*

Este dispositivo, aunque no posee una gran calidad de proyección, es de muy bajo costo \$13,29 y su tamaño compacto le permite ser instalado con mucha facilidad. Los voltajes operativos para el dispositivo de 3-12V lo hacen ideal para su inclusión en sencillos circuitos de control.

## 2.2. Algoritmo utilizado para la inspección visual automática

El algoritmo diseñado hace uso de técnicas de procesamiento digital de imágenes y de visión por computador. Se emplea, como corresponde a la mayoría de este tipo de algoritmos, un diseño arquitectónico basado en Filtro y Tuberías. Se establecen diferentes etapas, por las cuales se va procesando la imagen capturada, hasta que termina con la extracción de la información de interés. El algoritmo empleado se presenta en el diagrama de bloques de la Figura 2.4.

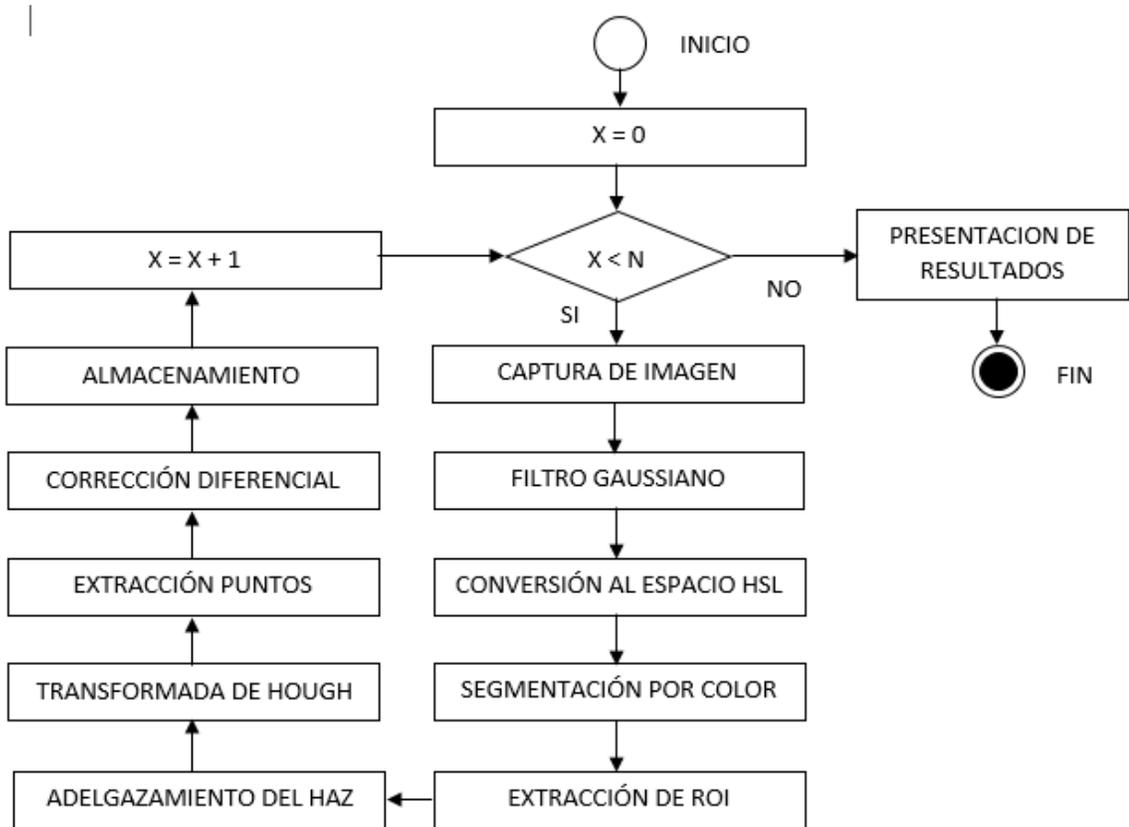
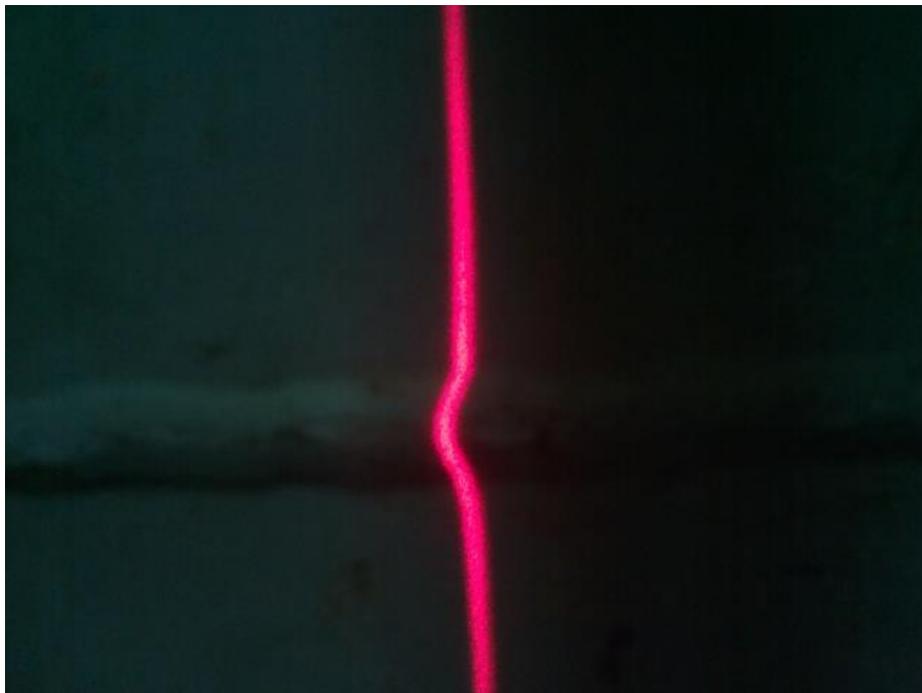


Figura 2.4: Diagrama de bloques del algoritmo de inspección

### ***2.2.1 Captura de imagen***

La unidad de procesamiento es conectada a la cámara mediante su interfaz Csi. Las imágenes son capturadas mediante instrucciones a la PICAMERA, y en formato RGB a diferencia de (Li et al., 2008) y (Xu et al., 2010) que realizan sus propuestas para la medición de soldaduras empleando la escala de gris. Un ejemplo de captura se muestra en la Figura 2.5.



*Figura 2.5: Imagen capturada por la cámara del dispositivo*

### ***2.2.2 Filtro Gaussiano***

Este procedimiento elimina posibles ruidos no deseados y aleatorios en la imagen, procedentes del proceso de captura y debido a repentinas perturbaciones. La presencia de ruido en la imagen en muchas ocasiones perjudica la detección de patrones, por lo que se

aplica a la imagen capturada un filtro gaussiano con el objetivo de eliminarlo. La operación queda definida matemáticamente por la ecuación 2.1, que representa una operación de convolución en el espacio de las frecuencias (Acharya and Ray, 2005).

$$g(i, j) = \sum_{m=0}^M \sum_{n=0}^N f(i, j) h(i - m, j - n) \quad (2.1)$$

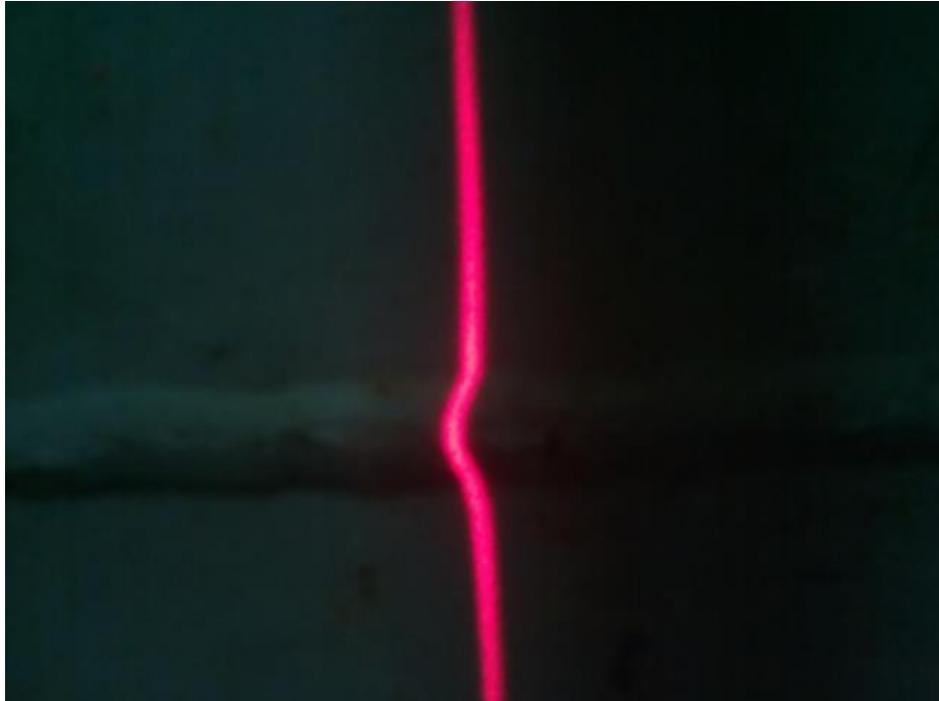
*donde:*

*g -> imagen de salida*

*f -> imagen de entrada*

*h -> núcleo de convolución que responde a una distribución gaussiana de dimensiones 5 x 5.*

La Figura 2.6 muestra el resultado de aplicar el filtro a la imagen capturada inicialmente.



*Figura 2.6: Imagen resultante del filtro gaussiano*

### 2.2.3 Conversión al espacio HSL (Matiz-Saturación-Luminosidad)

Se procede a transformar la imagen en el modelo de colores HSL (del inglés: Hue, Saturation, Lightness – Matiz, Saturación, Luminosidad). Este modelo de colores responde a una transformación no lineal del espacio de color RGB, y es más adecuado e intuitivo para la identificación de colores en imágenes, como plantea (Gonzalez and Woods, 2008). Las propuestas sobre inspección a soldadura comentados anteriormente no emplean esta técnica, realizan su procesamiento sólo a escala de gris. Este método al trabajar con colores y no con valores de intensidad, mejora la robustez del algoritmo, pues hace menos sensible el dispositivo a cambios de iluminación en la escena. La transformación de la imagen está definida por las ecuaciones 2.2-2.4 (OpenCV, 2018).

Para:

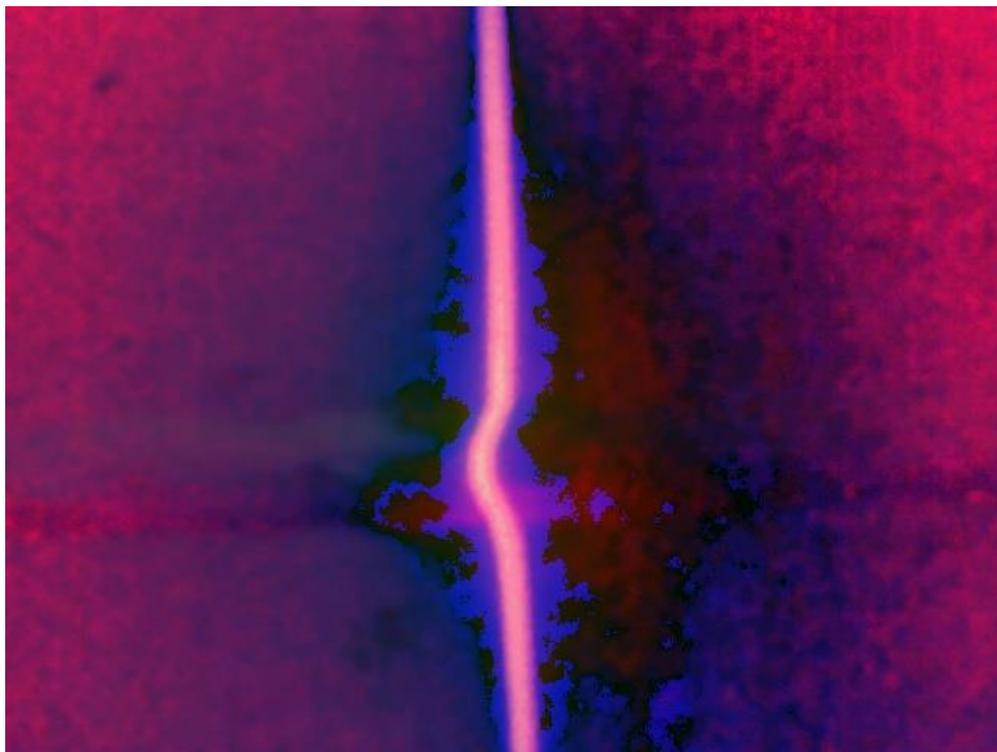
$r, g, b \rightarrow$  valores de rojo, verde y azul de un pixel  
 $M = \text{MAX}(r, g, b)$        $m = \text{MIN}(r, g, b)$

$$\text{Matiz: } H = \begin{cases} 0, & \text{si } M = m \\ \left(60 \times \frac{g-b}{M-m} + 360\right) \text{ mod } 360, & \text{si } M = r \\ 60 \times \frac{b-r}{M-m} + 120, & \text{si } M = g \\ 60 \times \frac{r-g}{M-m} + 240, & \text{si } M = b \end{cases} \quad (2.2)$$

$$\text{Saturación: } S = \begin{cases} 0, & \text{si } M = m \\ \frac{M-m}{M+m}, & \text{si } L < 0.5 \\ \frac{M-m}{2-(M+m)}, & \text{si } L \geq 0.5 \end{cases} \quad (2.3)$$

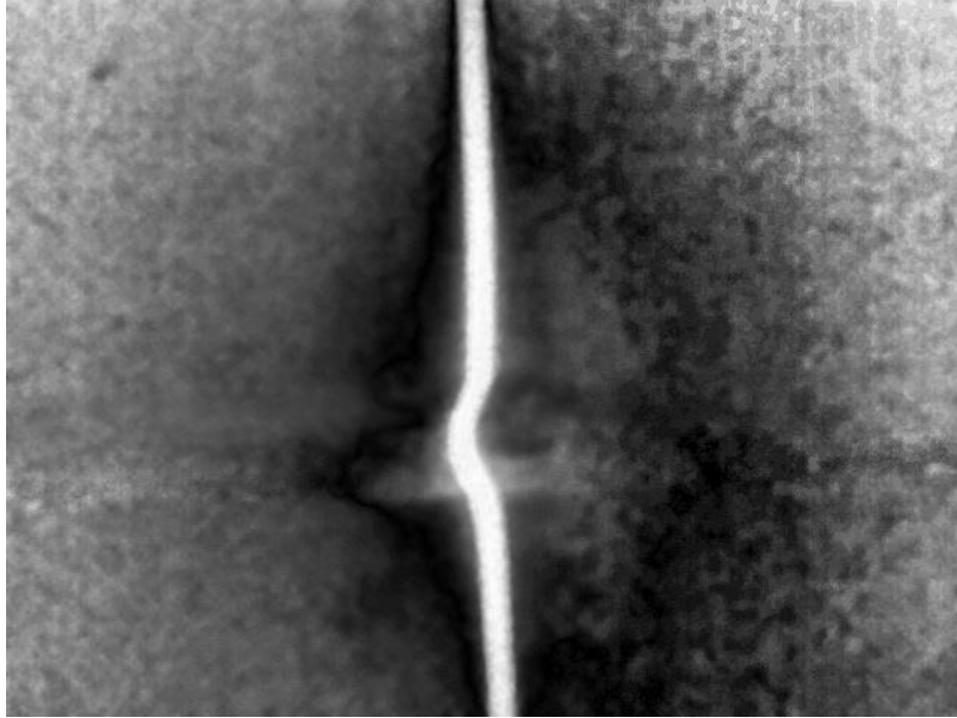
$$\text{Luminosidad: } L = \frac{1}{2}(M + m) \quad (2.4)$$

Los valores para  $H$ ,  $S$ ,  $L$  son normalizados al formato de representación de imágenes de 8 bit, valores entre 0 y 255. Una representación de la transformación de la imagen al espacio HSL, puede verse en la Figura 2.7, pero las Figuras 2.8-2.10 muestran la información contenida en cada una de las dimensiones del espacio HSL, que por separado permiten hacer posteriormente un mejor análisis y selección del objeto de interés, de ahí la importancia del empleo de esta técnica.

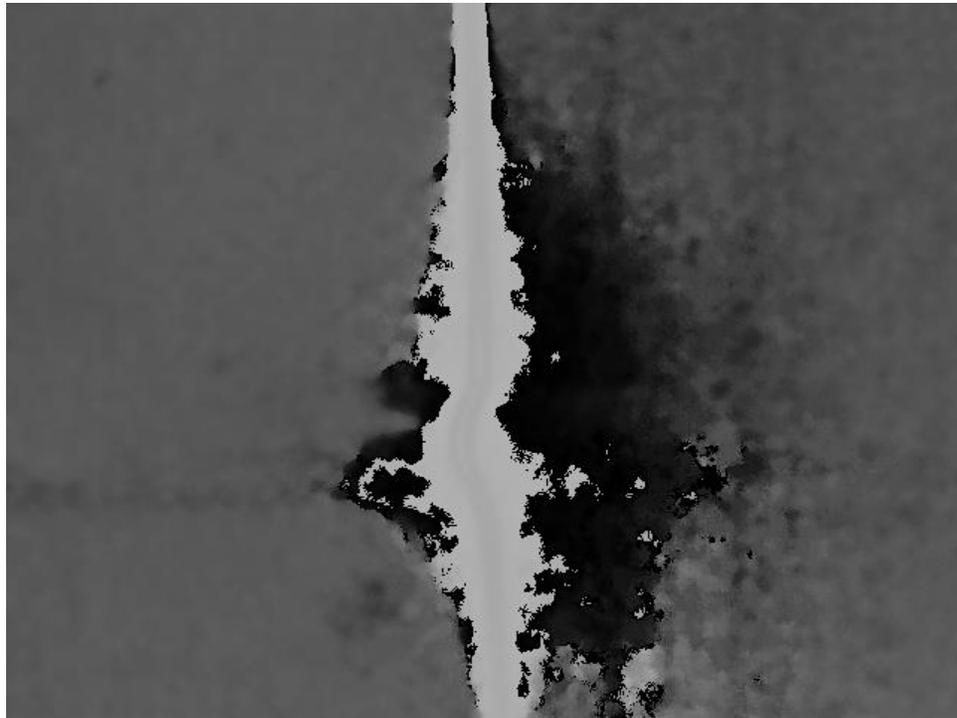


*Figura 2.7: Imagen transformada al espacio HSL*

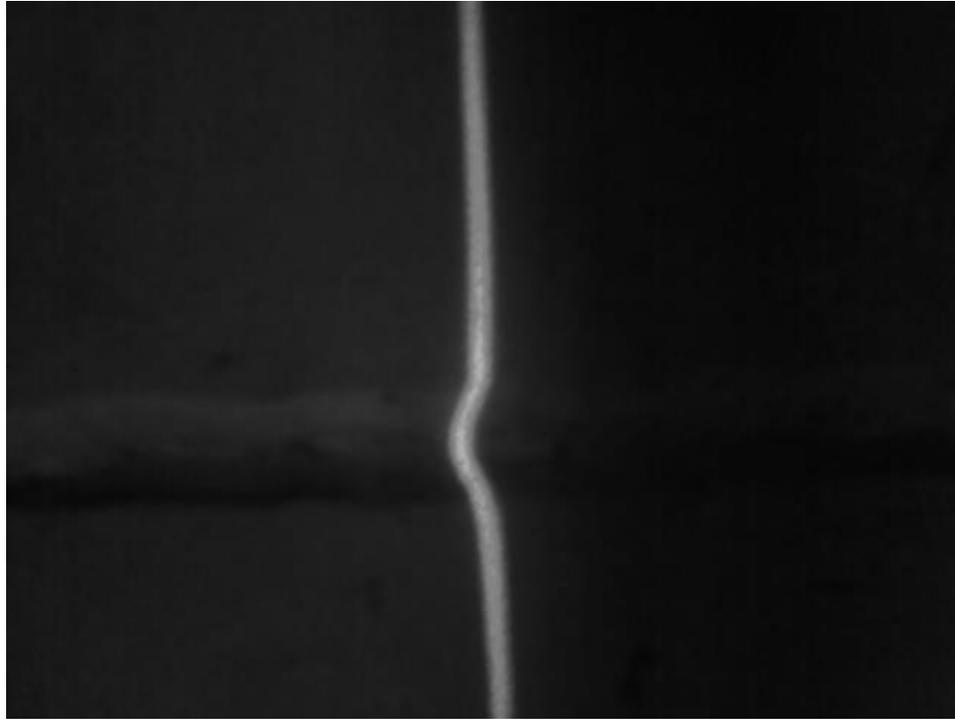
Como se puede apreciar en las Figuras 2.8 y 2.10 es fácilmente identificable el láser proyectado.



*Figura 2.8: Información del componente H (matiz), del espacio HSL*



*Figura 2.9: Información del componente S (saturación), del espacio HSL*



*Figura 2.10: Información del componente L (luminosidad), del espacio HSL*

#### **2.2.4 Segmentación por color**

Se aplica la técnica de segmentación a la imagen transformada en el espacio HSL. Esta técnica permite separar en la imagen, el objeto que se desea analizar del resto de la escena. La segmentación se realiza atendiendo a los parámetros del color rojo (650nm) correspondiente al láser proyectado, transformando al espacio HSL sus valores ( $H = 220$ ,  $S = 0$ ,  $L = 80$ ). El resto de los valores de la imagen son desechados al sustituirlo por el color negro como se representa en la ecuación 2.5. La Figura 2.11 muestra el resultado de aplicar una segmentación a la imagen anterior.

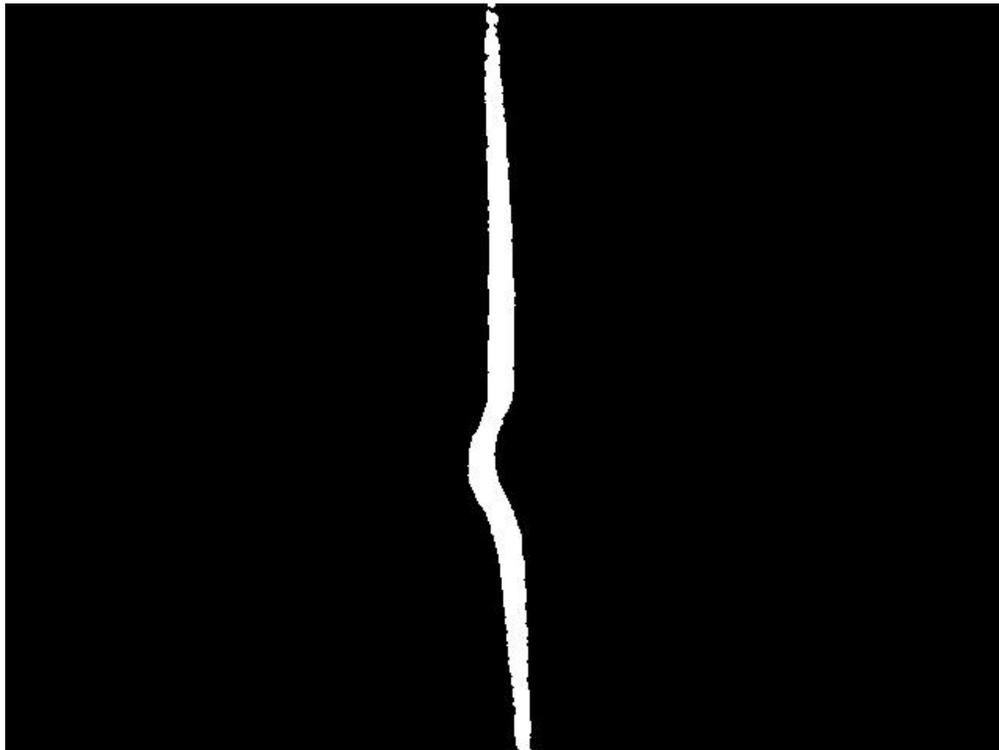
$$g(i, j) = \begin{cases} 0 & \text{si } f(i, j) < [220, 0, 80] \\ 1 & \text{si } f(i, j) \geq [220, 0, 80] \end{cases} \quad (2.5)$$

*donde:*

$g(i, j)$  -> imagen de salida

$f(i, j)$  -> imagen de entrada

$[H, S, L]$  -> vector que representa un valor en el espacio HSL



*Figura 2.11: Imagen segmentada*

### **2.2.5 Extracción de la región de interés (ROI)**

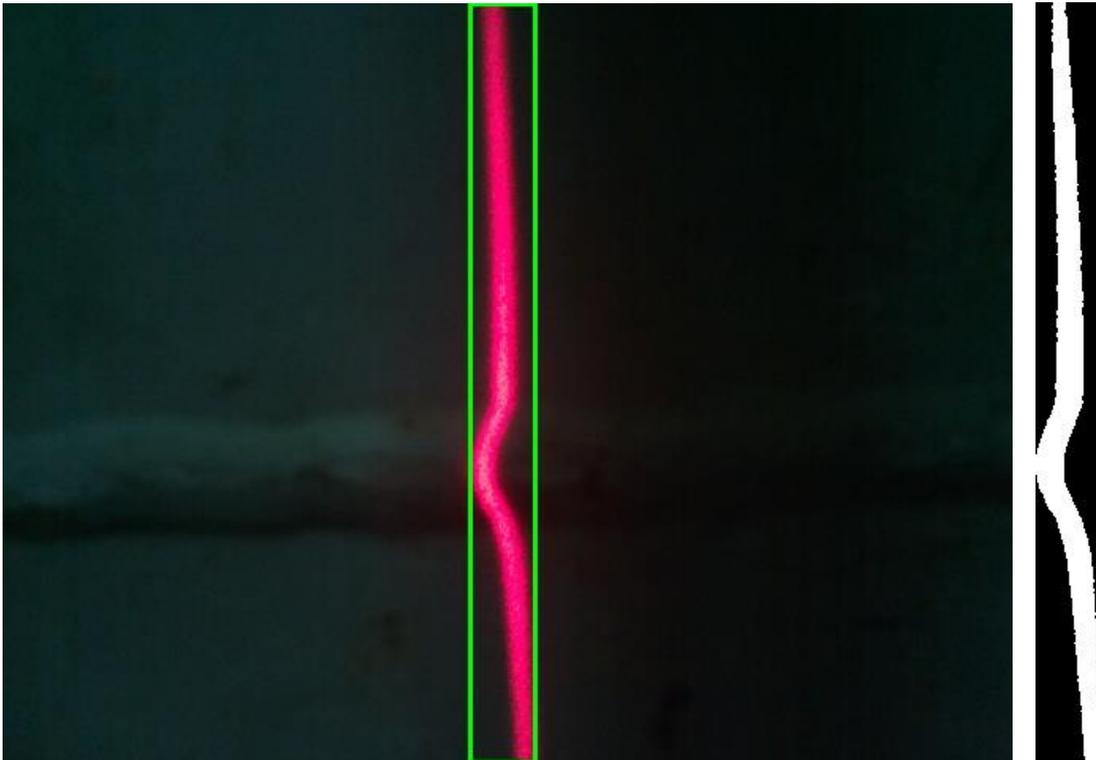
Se selecciona de la imagen segmentada la región de interés (ROI). Esta región enmarca a la imagen solamente en el área donde hay diferencia entre los valores de píxeles. De esta manera se evita hacer procesamiento innecesario y aumenta la rapidez del algoritmo. La

imagen seleccionada es un subconjunto de la imagen segmentada, tal y como representa la ecuación 2.6.

$$g(m,n) = f(i,j) \quad \text{para } m = i, n = j, \quad i, j \in Q \quad (2.6)$$

$$m, n \in P \quad \text{donde } P \leq Q$$

La Figura 2.12 a) muestra el área de interés seleccionada y su correspondencia con la totalidad de la imagen. La Figura 2.12 b) muestra la sección extraída de la imagen segmentada en el paso anterior.



*Figura 2.12: a) Región de interés. b) Sección de imagen extraída.*

### 2.2.6 Adelgazamiento del haz láser

La región seleccionada representa todo el haz laser que incide sobre la imagen, ver Figura 13 a). A pesar que el láser proyecta una luz intensa y concentrada su ancho todavía no es adecuado para detectar los puntos de interés. Se necesita hacer adelgazar con el ancho mínimo posible, se propone a 3 pixeles en la imagen para la detección de líneas en la etapa siguiente. El efecto de adelgazar el haz se obtiene al extraer los pixeles centrales en el haz y desechar el resto, la Figura 13 b) muestra el resultado final.



Figura 2.13: a) Sección del haz láser extraído. b) Sección del haz láser adelgazado.

### 2.2.7 Transformada de Hough

Hasta el paso anterior, se tiene una imagen donde se identifica en blanco una línea que representa el haz láser, pero en el centro distorsionada. Esta distorsión es producida por incidir el haz láser en el codón de soldadura, dividiendo la línea en dos segmentos. A fin de identificar estos dos segmentos de líneas se aplica a la imagen una transformada de Hough, similar a como plantea (Li et al., 2008). De esta manera se pretende entonces detectar rectas de la forma  $y = mx + n$  o más bien de la forma  $\rho = x * \cos \theta + y \sin \theta$  en coordenadas polares, espacio empleado por el algoritmo.

En la Figura 2.14 a) se muestra como quedarían proyectadas las líneas detectadas sobre la imagen final y en la Figura 2.14 b) como estarían identificadas sobre la región de interés.

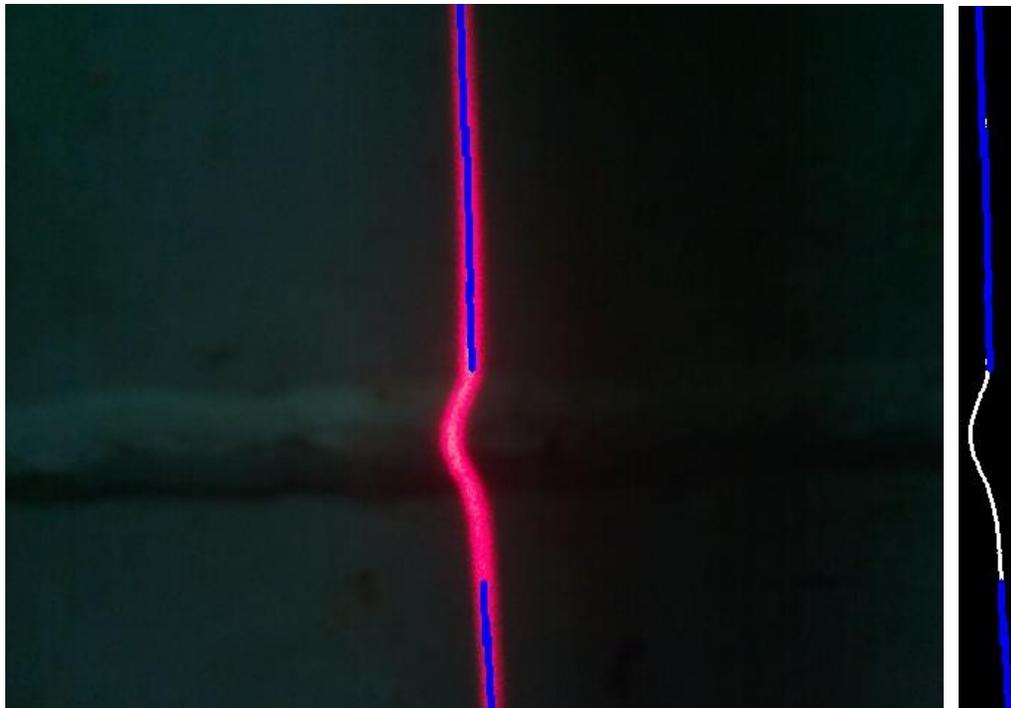


Figura 2.14: a) Detección sobre la imagen. b) Detección sobre la ROI.

### 2.2.8 Identificación de puntos de interés

Para realizar las mediciones con éxito, se requieren de al menos tres puntos de interés. El primer punto y más sencillo de determinar es el punto más alto en el reforzamiento de la soldadura, que coincide con el máximo punto de la desviación laser. Este punto nos permitirá determinar la altura del cordón. Sus coordenadas dentro de la imagen, quedan determinadas por la ecuación 2.7.

$$(x_h, y_h) = MAX(x, f(x)) \quad (2.7)$$

Para:

$x \in N$ ;  $f$ : función que representa el haz laser

MAX: función que determina el máximo; si para

$$(x, y) \in S, \quad \text{para todo par } (a, b) \in S, \text{ entonces } y \geq b$$

Los otros puntos de interés están determinados por los segmentos encontrados en la transformada de Hough. Como se muestra en la Figura 2.14, los segmentos se extraen en la zona no deformada del láser, y se seleccionan de estos, los puntos detectados más cercanos a la desviación, quedando definidos de la siguiente manera:

$$(x_1, y_1) \text{ y } (x_2, y_2) \text{ puntos extremos del segmento } S1$$

$$(x_3, y_3) \text{ y } (x_4, y_4) \text{ puntos extremos del segmento } S2$$

$$(x_a, y_a) = \text{MAX}((x_1, y_1), (x_2, y_2)) \text{ punto máximo del segmento } S1$$

$$(x_b, y_b) = \text{MIN}((x_3, y_3), (x_4, y_4)) \text{ punto mínimo del segmento } S2$$

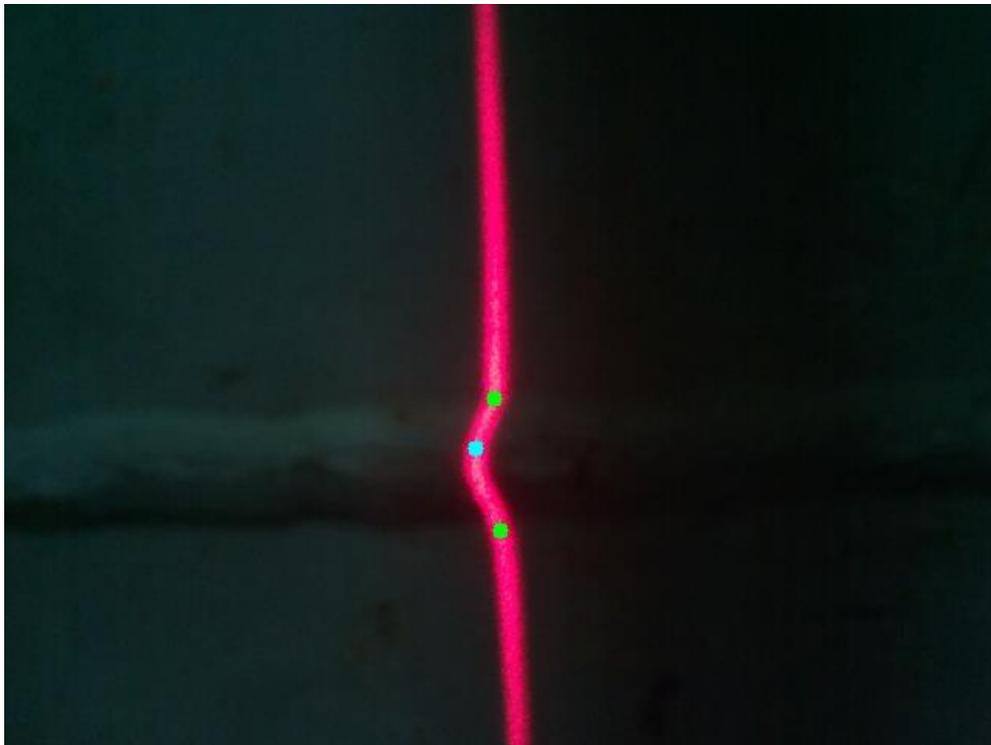
Con estos tres puntos es suficiente para calcular el ancho y la altura del cordón de soldadura. Es posible que los puntos determinados por la transformada de Hough no sean lo suficientemente exactos como se quiere, debido a que la determinación de los segmentos puede verse obstruida por pequeñas variaciones en el adelgazamiento del haz láser realizado con anterioridad. La luz proyectada por el dispositivo láser no siempre tiene la calidad deseada cuando el dispositivo es de bajo costo, además de pequeñas variaciones en la superficie del cilindro, como abolladuras, o de coloración producida en la zona afectada por el calor, pueden crear pequeñas distorsiones del haz que serán captadas por la cámara. En la Figura 2.14, puede verse como el segmento inferior no llega a completarse correctamente.

Con el objetivo de erradicar este inconveniente, se introduce una corrección basada en variaciones de la pendiente en cada punto asociado al haz láser. Partiendo de los puntos ya

encontrados que definen el ancho y hacia el punto que define la altura, se realiza un análisis del comportamiento de la pendiente en cada punto. Alrededor de los puntos de la distorsión se experimentará un cambio repentino de la pendiente similar a un punto de inflexión. La pendiente de una curva es asociada con la derivada, en este caso será empleada la derivada en forma numérica que se calcula mediante la ecuación 2.8.

$$f' \approx \frac{f(x_0 + h) - f(x_0 - h)}{2h} \quad (2.8)$$

Esta fórmula se aplicó asignando un valor para  $h = 3$ . Con esta corrección se evitan los cálculos de dimensiones con puntos erróneos y se logra una mayor exactitud del resultado. La Figura 2.15 muestra una correcta identificación de puntos de interés realizada por el algoritmo.



*Figura 2.15: Identificación de puntos de interés.*

### 2.2.9 Cálculo de las dimensiones del cordón

Se determina el ancho del cordón (A). Este ancho corresponde con la distorsión sufrida por el haz láser al incidir sobre el cordón, y corresponde con la distancia euclidiana que separa los dos puntos identificados anteriormente sobre la imagen, su cálculo está dado por la ecuación 2.9.

$$A = \sqrt{(x_a - x_b)^2 + (y_a - y_b)^2} \quad (2.9)$$

Se determina la altura del cordón (H). El punto mayor de la distorsión sufrida por el haz láser, se identifica como la altura máxima alcanzada por el cordón. Una vez obtenida las coordenadas de este punto, la altura del cordón de soldadura corresponde con la altura de dicho punto a la recta formada entre los puntos  $(x_a, y_a)$  y  $(x_b, y_b)$  identificados en el cálculo anterior. La ecuación 2.10 fue empleada para determinar la altura.

$$H = \frac{|m * x_h - y_h + n|}{\sqrt{m^2 + 1}} \quad (2.10)$$

*Para:*

$(x_h, y_h)$  punto máximo detectado en la curvatura

$m = \frac{\Delta y}{\Delta x}$  pendiente de la recta formada por  $(x_a, y_a)$  y  $(x_b, y_b)$

$n = y_a - m * x_a$  intercepto de la recta con el eje y

Una vez calculado mediante las ecuaciones anteriores, los parámetros de ancho y alto del cordón, es necesario multiplicarlos por un factor de escala; debido a que estos cálculos se realizan sobre la imagen capturada y las dimensiones son en píxeles. La presentación final de los resultados debe ser en milímetros por lo que se emplea un factor de escala previamente calculado en la etapa de calibración. Este factor tiene que ver con la distancia a la que se encuentra la cámara y la resolución de la imagen capturada.

La calibración se realiza posicionando el sistema de monitoreo atendiendo a los parámetros de distancia y condiciones ambientales adecuadas. Una vez fijado el sistema se realizan una serie de mediciones sobre una soldadura patrón de la cual ya se conocen sus parámetros. El factor de escala estará dado por el cociente de la división entre el valor real y los calculados. Se determinan dos factores de escala, uno para el ancho, por situarse en el eje de las  $y$  y otro para el alto por situarse en el eje de las  $x$ . Luego sólo resta multiplicar estos factores por el resultado obtenido en las ecuaciones anteriores para el alto y el ancho. Este procedimiento es representado por las ecuaciones 2.11 y 2.12.

$$A_{mm} = A_{px} * F_a \quad (2.11)$$

$$H_{mm} = H_{px} * F_h \quad (2.12)$$

### **2.3 Software (Tutorial).**

Para la implementación del algoritmo se hizo uso del lenguaje de programación Python versión 3, por la amplia disponibilidad de librerías para proyectos científicos de que dispone y su amplia distribución en cualquier plataforma incluyendo Linux, base del sistema Raspbian empleado por la Raspberry Pi. Aunque las implementaciones finales tienen como objetivo el lenguaje C++, Python por sus potencialidades ha sido empleado durante la etapa de prueba del algoritmo.

Las técnicas de procesamiento digital de imágenes se implementaron haciendo uso de la librería OpenCV versión 3.2. Esta librería es de uso común en proyectos de visión artificial, es patrocinada por Intel, de código abierto e implementada con gran eficiencia. Para solventar la capacidad reducida de procesamiento de la Raspberry al ejecutar

procedimientos de costo computacional al procesar las imágenes, precisamente se emplea la característica de que dispone la librería OpenCV, de que sus implementaciones son aceleradas mediante OpenCL, hacen uso de juegos de instrucciones nativos de la CPU y sus núcleos; por lo que su ejecución se realiza en tiempos adecuados hasta en los procesadores más modestos como el de la Raspberry.

### ***2.3.1 Interfaz principal***

La ventana principal de la aplicación está diseñada con la mínima cantidad de componentes, pues su dispositivo de visualización objetivo son pantallas para sistemas de placas reducidas de 5 pulgadas o superior, ver Figura 2.16. Al tener como objetivo final pantallas de pequeño tamaño, limita el exceso de componentes que pueden dificultar su operatividad. Al simplificar el proceso se puede incluir fácilmente en la misma línea de producción sin que conlleve a retrasos. La ventana principal cuenta con cuatro funcionalidades representadas por botones:

1. Ajuste: Muestra el contenido de la cámara del dispositivo mientras se acerca o aleja manualmente para obtener una posición adecuada para la inspección visual de la soldadura.
2. Calibración: Ejecuta un proceso de calibración sobre una soldadura patrón a fin de ajustar el dispositivo para futuras mediciones.
3. Monitoreo: Ejecuta un conjunto de mediciones sobre una soldadura mostrando en forma gráfica si sus parámetros se corresponden con los permitidos por sus normas de calidad.

4. Salir: Finaliza la ejecución de la aplicación.



*Figura 2.16: Ventana principal de la aplicación.*

### **2.3.2 Funcionalidad Ajustar**

El botón **Ajustar** ubicado primero en la ventana principal de la aplicación, al presionarse muestra una nueva ventana con el contenido capturado por la cámara instalada en el dispositivo de monitoreo. Durante este momento se podrá rectificar la correcta posición del dispositivo sobre la soldadura, a fin de que se obtenga un plano de la cámara adecuado y justo sobre el cordón de soldadura prototipo. Esta funcionalidad es indispensable durante la etapa de instalación o reajuste del dispositivo. La funcionalidad termina cuando es centrado el dispositivo y cerrada la ventana de ajuste por el operario.

### **2.3.3 Funcionalidad Calibrar**

El botón **Calibrar** ubicado segundo en la ventana principal de la aplicación, al presionarse ejecuta un proceso de calibración sobre una soldadura patrón. Este proceso consiste en ejecutar un conjunto de mediciones sobre una soldadura patrón. El proceso combina el resultado de cada una de las mediciones y es comparada con el valor real de la soldadura patrón, la cual es conocida a priori y configurada en el software. De esta manera se calibran las mediciones obtenidas empleando la cámara durante este proceso, con los valores reales de la soldadura. Los parámetros obtenidos por este proceso serán empleados en las posteriores mediciones.

El proceso de calibración ocurre sin la intervención del usuario. La ejecución se inicia mostrando la ventana de calibración con una imagen capturada por la cámara y termina cuando se muestra la información de calibración terminada. En este momento el operario solo tendrá que cerrar la ventana mostrada.

### **2.3.4 Funcionalidad Inspeccionar**

El botón **Inspeccionar** ubicado tercero en la ventana principal de la aplicación, al presionarse ejecuta el proceso de monitoreo a los parámetros del cordón de soldadura insertado frente a la cámara del dispositivo de monitoreo. Durante este proceso se ejecutan 20 mediciones a lo largo del cordón, y se verifica que esté sobre los límites permitidos según el estándar de calidad requerido por la industria. La cantidad de mediciones que se llevan a cabo durante este proceso son configuradas en el software vía archivo de configuración, así también como los límites permitidos en los parámetros de soldadura. Al

finalizar el proceso de inspección la información es mostrada en gráficas. En este momento el operario solo tendrá que cerrar la ventana mostrada.

### ***2.3.5 Funcionalidad Salir***

El botón Salir ubicado cuarto en la ventana principal de la aplicación, al presionarse finaliza con la ejecución de la aplicación. Esta opción es incluida para facilitar el acceso a dicha funcionalidad en pantallas táctiles pequeñas, como las seleccionadas para integrar con el dispositivo de monitoreo que ejecuta el software. Se recomienda ejecutar solamente esta opción cuando se haya concluido todo el proceso de inspección de los productos.

## **2.4 Conclusiones parciales**

1. La selección de dispositivos de fácil adquisición y bajos costos son una elección válida para la confección del sistema de inspección propuesto.
2. Una correcta elección de técnicas de procesamiento de imágenes digitales y visión por ordenador se pueden utilizar para conformar un algoritmo capaz de extraer y monitorear parámetros de la soldadura, como lo haría un operario con una herramienta de medición.
3. Un software con una sencilla interfaz de usuario, puede ser correctamente operado por usuarios de baja experiencia o poca capacitación, en la misma línea de producción y realizar la actividad de monitoreo de forma menos trabajosa.

## **CAPÍTULO 3 VALIDACIÓN DEL SISTEMA DE MONITOREO PROPUESTO.**

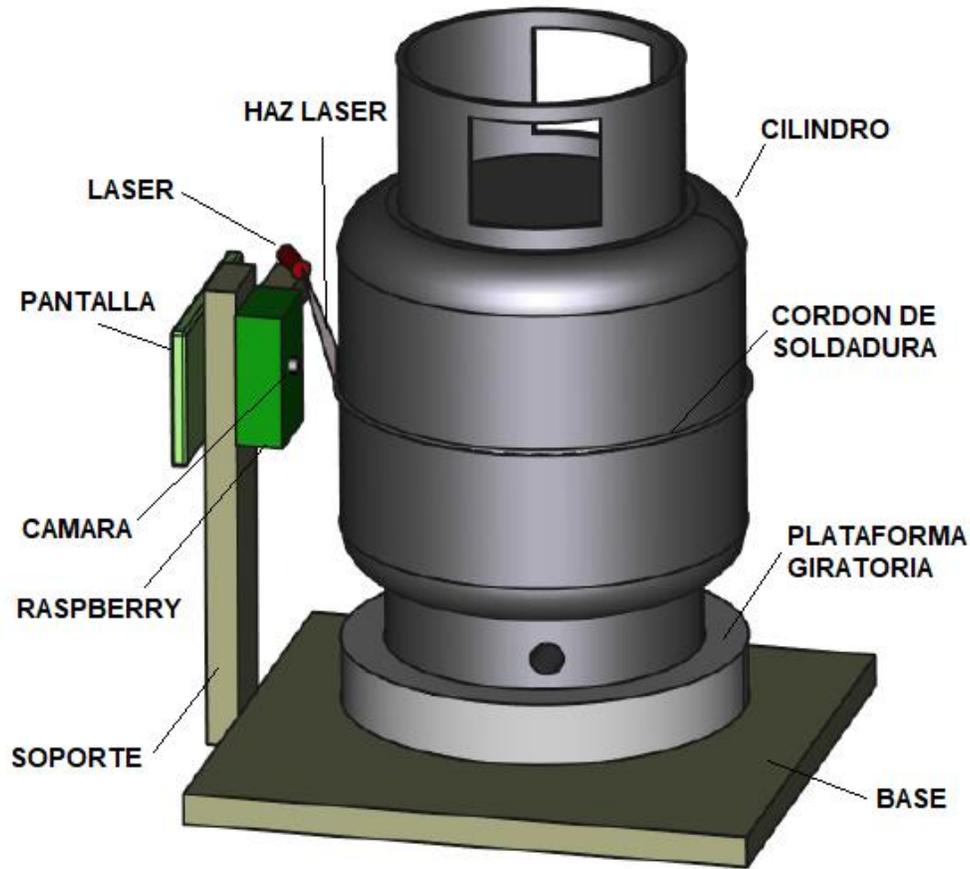
### **3.1 Generalidades**

El objetivo fundamental de este capítulo es presentar el esquema de instalación del dispositivo de monitoreo, su costo y mostrar los resultados obtenidos. Validar la precisión de los parámetros calculados por el dispositivo y los tiempos de ejecución requeridos por el sistema para llegar a dichos resultados.

### **3.2 Esquema de la instalación experimental**

Para la puesta a prueba del dispositivo propuesto se conformó en madera una estructura temporal capaz de sostener el cilindro y los componentes del sistema de inspección automatizado. La estructura y la disposición de cada uno de los componentes queda representada por la Figura 3.1.

Es importante señalar que esta estructura es de carácter temporal y solamente para la base de prueba, pues el diseño del dispositivo de monitoreo ha tenido en cuenta la simplicidad y tamaño reducido para su futura integración en las máquinas de soldaduras empleadas por la empresa o en cualquier dispositivo con capacidades de rotación del cilindro ubicado inmediatamente después del proceso de soldadura.



*Figura 3.1: Esquema de la instalación experimental*

El ángulo entre la cámara y la luz estructurada emitida por el dispositivo láser es de  $60^\circ$  a diferencia del propuesto por (Xu et al., 2010), pues un mayor ángulo produce una mayor desviación del láser al entrar en contacto con la soldadura y por consiguiente una mejor identificación de la curva y mayor precisión en el monitoreo de la altura. La distancia empleada entre la cámara y la superficie de soldadura es de 9 cm, a esta distancia con la cámara seleccionada se obtiene una captura con adecuado enfoque y detalles de la escena.

En la plataforma giratoria se instaló un motor de paso, capaz de girar el cilindro a 3 rpm, lo que permite al dispositivo de monitoreo según la velocidad de ejecución del algoritmo

propuesto (ver sección 3.4) realizar un total de 20 mediciones a lo largo de la soldadura ecuatorial del cilindro.

### 3.3 Análisis de costo.

El análisis del costo del sistema de inspección automatizada se obtiene por la suma de cada uno de sus componentes empleados en la confección del prototipo. No se tiene en cuenta el costo del software desarrollado ni la plataforma de montaje.

*Tabla 3.1: Costo del sistema de monitoreo*

<b>Componente</b>	<b>Descripción</b>	<b>Costo</b>
Unidad de Procesamiento	Raspberry Pi 2 B, incluye carcasa y alimentación):	€ 49,3
	Pantalla táctil Raspberry Pi 7” capacitiva	€ 74,50
Iluminación	Laser de Línea LFL 650nm MODELO: 70104011	€ 13,35
	Fuente de alimentación para el láser de línea (5V)	€ 5
Cámara	PI-CAMERA	€ 19,95
<b>Total</b>		€ 162,10

Si realizamos una comparación con un sistema de bajo costo, como el propuesto por (Adamo et al., 2009a), que incluye circuito controlador de motor, dos motores de paso, sistema de transportación, sistema de iluminación, dos cámaras CMOS 1.3 Mpixels, un

ordenador como unidad de procesamiento y software basado en Matlab, el costo total llega a 10.000 euros. Aunque este último proyecto incluye varios componentes adicionales, se puede notar una gran diferencia en cuanto al costo. Esa diferencia es propiciada por la selección de componentes de bajo costo realizada durante el presente trabajo.

### 3.4 Coste computacional.

En la Tabla 3.2 se muestra el coste computacional logrado en cada una de las etapas del algoritmo propuesto. Los sistemas que emplean técnicas de visión por ordenador, requieren de una adecuada potencia de cálculo en la unidad de procesamiento. Los algoritmos en esta área están limitados por la capacidad de cálculo adquirida en el proyecto, y muchas veces deben ser simplificados o de lo contrario adquirir mejor equipamiento lo que eleva los costos. Algunas propuestas como (Smistad et al., 2015) (Malmir and Shalchian, 2019) se inclinan por el uso de procesadores gráficos o de arreglos de compuertas programables. La unidad de procesamiento seleccionada (Raspberry Pi 2) es de bajo costo y posee prestaciones de cálculo reducidas. Para remediar dicho inconveniente se optó por implementar gran parte de las etapas del algoritmo haciendo uso de la biblioteca OpenCV, compilada y optimizada para Raspberry Pi. Esta biblioteca hace uso de funciones nativas del procesador por lo que acelera en gran medida el rendimiento, lográndose ejecutar todo el algoritmo en un tiempo por debajo del segundo y con posibilidades de seguir mejorando su rendimiento en futuras implementaciones.

*Tabla 3.2: Coste de las etapas del algoritmo propuesto.*

<b>Etapa</b>	<b>Tiempo (ms)</b>
--------------	--------------------

Captura de imagen	149
Filtro gaussiano	77
Conversión al espacio HSL	39
Segmentación por color	14
Extracción de ROI	5
Adelgazamiento del haz	609
Transformada Hough	20
Extracción de puntos de interés	0
Corrección diferencial	2
Cálculo de dimensiones	0
<b>Total</b>	<b>915</b>

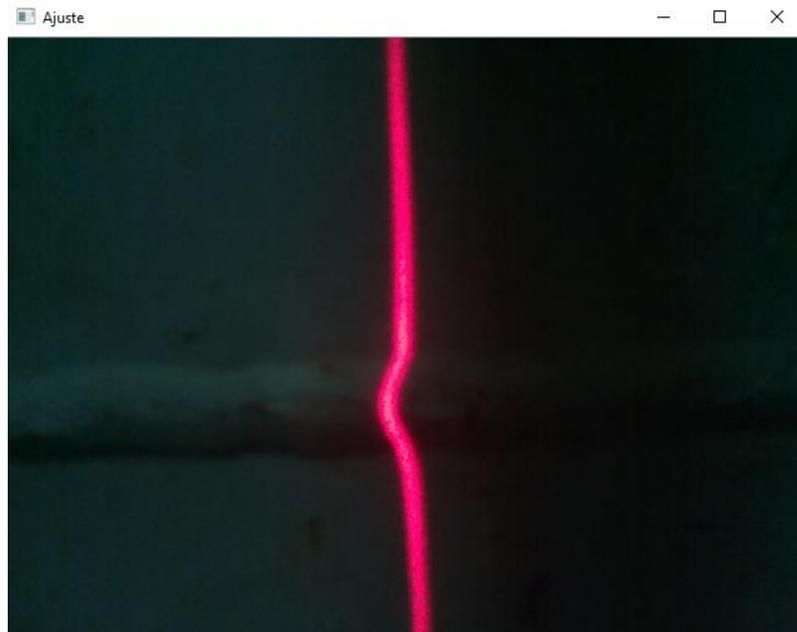
### 3.5 Caso de estudio.

#### 3.5.1 *Formulación del problema*

Se desea realizar el monitoreo a los parámetros de soldadura de un cilindro de 10Kg recién soldado por un operario. Las etapas de ajuste y calibración se mostrarán en el ejemplo a continuación, pero en un entorno real solamente serán realizadas por el ingeniero a cargo del dispositivo de monitoreo.

### 3.5.2 Etapa de preparación

Se sitúa el cilindro patrón sobre la plataforma giratoria donde operará el dispositivo de monitoreo. Se selecciona la opción *Ajuste* de la pantalla principal, se muestra la ventana de ajuste en la Figura 3.2, y se procede a centrar el dispositivo de monitoreo sobre el cordón de soldadura. Una vez confirmada la correcta posición se cierra la ventana.

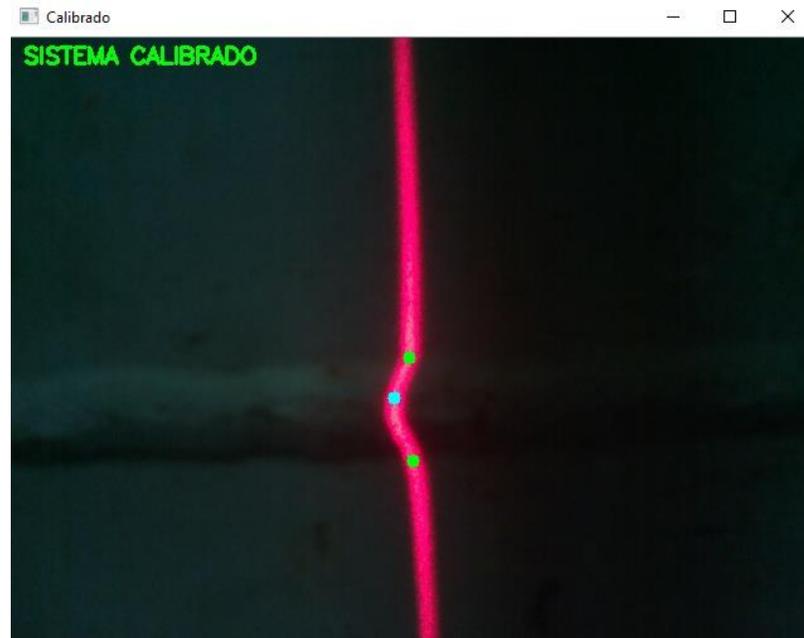


*Figura 3.2: Ventana de ajuste*

El proceso de calibración requiere previamente de la correcta entrada de los datos de alto y ancho del cordón de soldadura patrón. Se introducen en la configuración del software para la fábrica (ver Figura 3.3). Se selecciona la opción *Calibración* de la pantalla principal. A continuación, se muestra la ventana de calibrado en la Figura 3.4, el proceso es culminado mostrando los puntos detectados.

```
class VisualInspect:
    def __init__(self):
        self.standard_width = 7.8
        self.standard_height = 0.75
```

*Figura 3.3: Configuración de la soldadura patrón*



*Figura 3.4: Ventana de calibrado*

### **3.5.3 Etapa de monitoreo**

Se inicia el proceso de rotación de la plataforma giratoria que contiene el cilindro y se selecciona la opción *Inspeccionar* de la pantalla principal. En pocos segundos se muestran por pantalla el resultado del proceso de inspección.

Al ejecutar esta función, se muestra una ventana de monitoreo, donde se observa un video con el desplazamiento del dispositivo sobre el cordón de soldadura. Al culminar el total de mediciones predeterminada sobre la soldadura a inspeccionar, se muestra la información

en forma de gráficas para su fácil comprensión por parte del operario (ver Figura 3.5 y Figura 3.6).

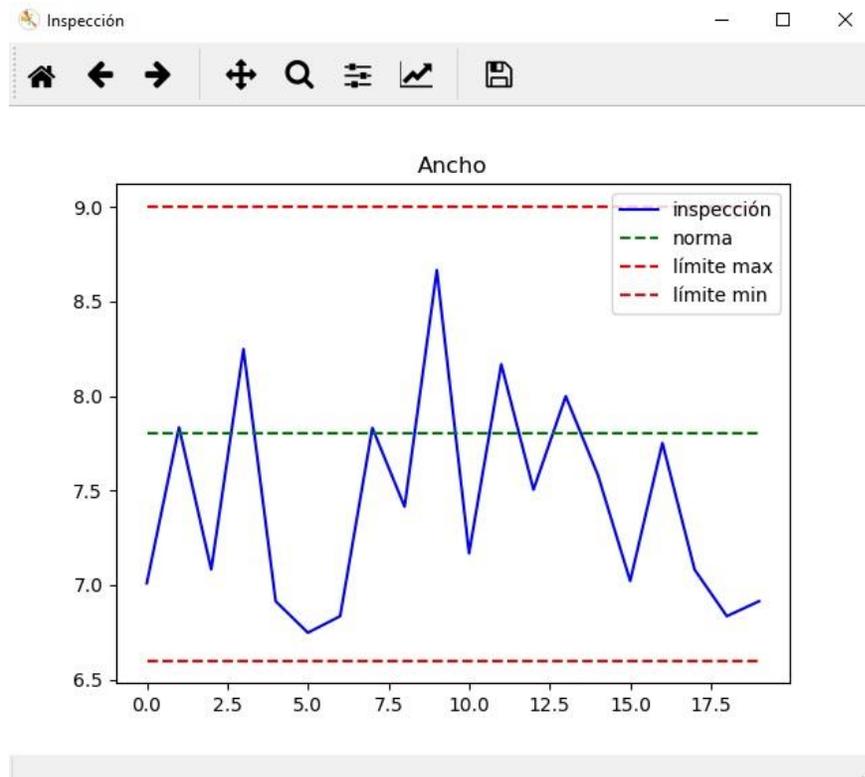


Figura 3.5: Ventana de inspección con información sobre el ancho

En las figuras 3.4 y 3.5 se muestra el resultado de 20 mediciones a los parámetros de ancho y alto del cordón durante el proceso de inspección. Como se evidencia por los resultados mostrados gráficamente durante la inspección al cordón de soldadura, que los valores obtenidos del proceso se encuentran entre los límites máximo y mínimo permitidos, y cerca de lo establecido por la norma (COVENIN, 2012).

Se cierran las ventanas con la información presentada en gráficos y se detiene la plataforma giratoria para retirar el cilindro y pasarlo a la etapa de reciclado si no cumple con los

parámetros de calidad especificados. En este punto el sistema está listo para realizar otra medición con otro cilindro.

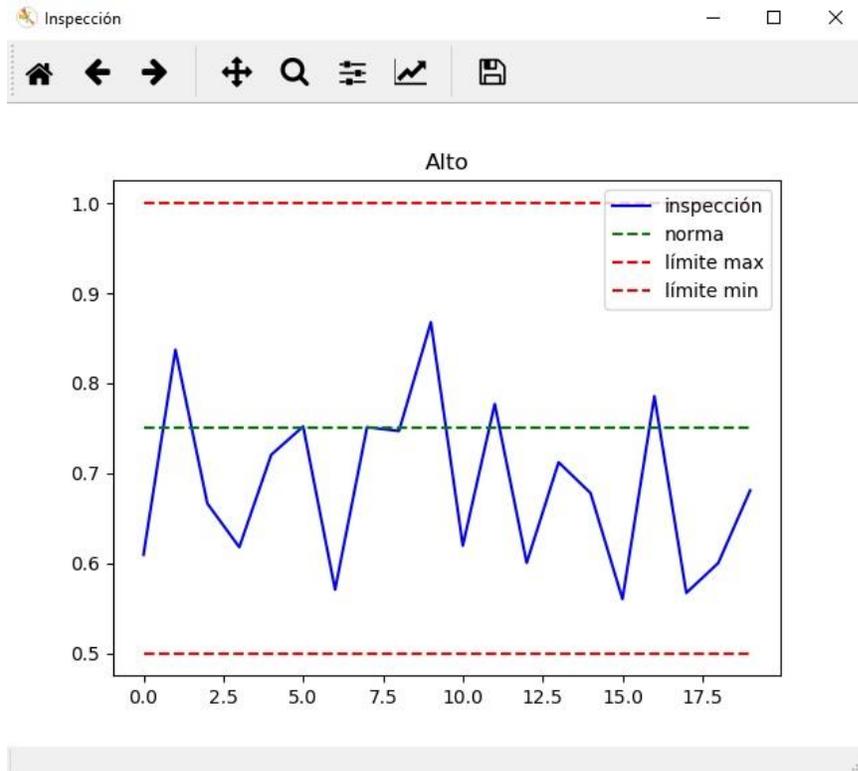


Figura 3.6: Ventana de inspección con información sobre el alto

### 3.6 Conclusiones parciales

1. Se demuestra la factibilidad de construcción de un sistema de inspección visual automatizado, de fácil operatividad para ser insertado en una línea de producción, empleando componentes de bajo costo y fácil adquisición, que pueda simplificar el trabajo de los operarios y a una mayor velocidad de lo que estos lo pueden realizar.

## **CONCLUSIONES**

Tras los resultados obtenidos con el presente trabajo, se puede arribar a las siguientes conclusiones:

1. La inspección visual automatizada es de gran importancia para la industria moderna, existe una tendencia creciente en su adopción principalmente dentro de la etapa de revisión de la calidad de los productos en una línea de montaje.
2. Empleando técnicas de procesamiento de imágenes digitales, visión por ordenador y de inteligencia artificial es posible la confección de un algoritmo para inspección de parámetros en la soldadura bajo fundente, a una velocidad mayor a la que un operario pudiera realizarlo y la posibilidad de ser ejecutado en la totalidad de la producción de cilindro, aumentando los niveles de calidad en la producción junto al ahorro de recursos al detectar tempranamente los defectos.
3. Se demuestra la factibilidad de confeccionar un dispositivo de su tipo a precios muy bajos, empleando componentes de bajos costos y fácil adquisición, y pueden ser implementado por cualquier empresa productora.

## RECOMENDACIONES

Basadas en las conclusiones obtenidas y para la extensión futura del presente trabajo, se realizan las siguientes recomendaciones:

1. Extender las funcionalidades del sistema de inspección visual a otros parámetros importantes de la soldadura bajo fundente, tales como: desalineación del cordón de soldadura, desplazamiento de la placa, socavado, presencia de grietas, escorias y demás posibles defectos que se introducen en el proceso de soldadura.
2. Incluir sistemas basados en inteligencia artificial para su detección y clasificación a partir de los perfiles de soldaduras que serán almacenados por el dispositivo.
3. Diseñar un mecanismo de clasificación de cilindros basado en lógica difusa que tenga en cuenta los parámetros y defectos detectados en la etapa de monitoreo y brinde una alerta a los operarios de cual cilindro debe ser aceptado, re-inspeccionado manualmente o retirado de la línea de producción.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACHARYA, T. & RAY, A. K. 2005. *Image processing: principles and applications*, John Wiley & Sons.
- ADAMO, F., ATTIVISSIMO, F., DI NISIO, A. & SAVINO, M. 2009a. A low-cost inspection system for online defects assessment in satin glass. *Measurement*, 42, 1304–1311.
- ADAMO, F., ATTIVISSIMO, F., DI NISIO, A. & SAVINO, M. 2009b. A low-cost inspection system for online defects assessment in satin glass. *Measurement*, 42, 1304-1311.
- AGRAWAL, N. S., SMITA 2015. Smart drip irrigation system using raspberry pi and arduino. *In: COMPUTING, C. A. I. (ed.) International Conference on. IEEE.*
- ANAGNOSTAKIS, D., RITCHIE, J., LIM, T., SIVANATHAN, A., DEWAR, R., SUNG, R., BOSCHÉ, F. & CAROZZA, L. 2016. Knowledge Capture in CMM Inspection Planning: Barriers and Challenges. *Procedia CIRP*, 52, 216-221.
- AZAIEZ, S., BOC, M., CUDENNEC, L., SIMOES, M. D. S., HAUPERT, J., KCHIR, S., KLINGE, X., LABIDI, W., NAHHAL, K., PFROMMER, J., SCHLEIPEN, M., SCHULZ, C. & TORTECH, T. 2016. Towards Flexibility in Future Industrial Manufacturing: A Global Framework for Self-organization of Production Cells. *Procedia Computer Science*, 83, 1268-1273.
- BROSNAN, T. & SUN, D.-W. 2004. Improving quality inspection of food products by computer vision—a review. *Journal of Food Engineering*, 61, 3-16.
- COVENIN, N. 2012. Instrucción técnica de soldadura ecuatorial # 2.
- CHETVERIKOV, D. & HANBURY, A. 2002. Finding defects in texture using regularity and local orientation. *Pattern Recognition*, 35, 2165-2180.
- DI LEO, G., LIGUORI, C., PIETROSANTO, A. & SOMMELLA, P. 2017. A vision system for the online quality monitoring of industrial manufacturing. *Optics and Lasers in Engineering*, 89, 162-168.
- FAN, J. 2009. 14 - Applications of artificial intelligence in fabric and garment engineering. *Engineering Apparel Fabrics and Garments*. Woodhead Publishing.
- GHOLAMHOSSEINI, H. & HU, S. 2008. A High Speed Vision System for Robots Using FPGA Technology. *15th International conference on Mechatronics and Machine Vision in Practice*. Auckland, New-Zealand.
- GONZALEZ, R. C. & WOODS, R. E. 2008. *Digital Image Processing*, New Jersey, Pearson Education Inc.

- HAJIMOWLANA, S. H., JULLIEN, G. A., MUSCEDERE, R. & ROBERTS, J. W. 1997. Efficient Pre-processing Algorithms for an FPGA based In-Camera Video-Stream Processing System for Industry Inspection. *IEEE CCECE*, 835-838.
- HOCENSKI, Z., ALEKSI, I. & MIJAKOVIC, R. 2009. Ceramic Tiles Failure Detection Based on FPGA Image Processing. *IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*. Seoul, Korea.
- HU, G. H. 2014. Optimal ring Gabor filter design for texture defect detection using a simulated annealing algorithm. *2014 International Conference on Information Science, Electronics and Electrical Engineering (ISEEE)*, 2, 860-864.
- HU, G. H., WANG, Q. H. & ZHANG, G. H. 2015. Unsupervised defect detection in textiles based on Fourier analysis and wavelet shrinkage. *Appl. Opt.*, 54, 2963-2980.
- HUAMANTINCO CISNEROS, M. A., REVOLLO SARMIENTO, N. V., DELRIEUX, C. A., PICCOLO, M. C. & PERILLO, G. M. E. 2016. Beach carrying capacity assessment through image processing tools for coastal management. *Ocean & Coastal Management*, 130, 138-147.
- LECCESE, F. C., MARCO; TRINCA, DANIELE 2014. A smart city application: A fully controlled street lighting isle based on Raspberry-Pi card, a ZigBee sensor network and WiMAX. *Sensors*, 14, 24408-24424.
- LI, Y., WANG, Q. L., LI, Y. F., DE, X. & TAN, M. On-line Visual Measurement and Inspection of Weld Bead Using Structured Light. 2008 IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, 12-15 May 2008 2008. 2038-2043.
- LIN, J.-J., LIN, C.-H. & TSAI, I.-S. 1995. Applying Expert System and Fuzzy Logic to an Intelligent Diagnosis System for Fabric Inspection. *Textile Research Journal*, 65, 697-709.
- LIU, Y. & YU, F. 2014. Automatic inspection system of surface defects on optical IR-CUT filter based on machine vision. *Optics and Lasers in Engineering*, 55, 243-257.
- MAKSIMOVIĆ, M., ET AL. 2014. Raspberry Pi as Internet of things hardware: performances and constraints. 3, 8.
- MALMIR, S. & SHALCHIAN, M. 2019. Design and FPGA implementation of dual-stage lane detection, based on Hough transform and localized stripe features. *Microprocessors and Microsystems*, 64, 12-22.
- MERA, C., OROZCO-ALZATE, M., BRANCH, J. & MERY, D. 2016. Automatic visual inspection: An approach with multi-instance learning. *Computers in Industry*, 83, 46-54.

- NASHAT, S., ABDULLAH, A., ARAMVITH, S. & ABDULLAH, M. Z. 2011a. Support vector machine approach to real-time inspection of biscuits on moving conveyor belt. *Computers and Electronics in Agriculture*, 75, 147–158.
- NASHAT, S., ABDULLAH, A., ARAMVITH, S. & ABDULLAH, M. Z. 2011b. Support vector machine approach to real-time inspection of biscuits on moving conveyor belt. *Computers and Electronics in Agriculture*, 75, 147-158.
- OPENCV. 2018. *Open Source Computer Vision* [Online]. Available: [https://docs.opencv.org/3.4.5/de/d25/imgproc\\_color\\_conversions.html#color\\_convert\\_rgb\\_hls](https://docs.opencv.org/3.4.5/de/d25/imgproc_color_conversions.html#color_convert_rgb_hls) 2019].
- PRIBULA, O., JANOSEK, M. & FISCHER, J. 2011. Optical Position Sensor Based on Digital Image Processing: Magnetic Field Mapping Improvement. *RADIOENGINEERING*, 20, 55-60.
- SHEN, J., CHEN, P., SUB, L., SHI, T., TANG, Z. & LIAO, G. 2016. X-ray inspection of TSV defects with self-organizing map network and Otsu algorithm. *Microelectronics Reliability*, 67, 129–134.
- SILVA, D. 2015. *Estudio de viabilidad de un sistema basado en Raspberry Pi para aplicaciones de Inspección Industrial por Visión Artificial*. Máster en Ingeniería de Automatización e Informática Industrial, Universidad de Oviedo.
- SMISTAD, E., FALCH, T. L., BOZORGI, M., ELSTER, A. C. & LINDSETH, F. 2015. Medical image segmentation on GPUs – A comprehensive review. *Medical Image Analysis*, 20, 1-18.
- SUN, D. 2000. Inspecting pizza topping percentage and distribution by a computer vision method. *Journal of Food Engineering*, 55, 245–249.
- SZYDŁOWSKIA, M., POWAŁKAA, B., MATUSZAKB, M. & KOCHMANSKI, P. 2016. Machine vision micro-milling tool wear inspection by image reconstruction and light reflectance. *Precision Engineering*.
- TONG, L., WONG, W. K. & KWONG, C. K. 2016. Differential evolution-based optimal Gabor filter model for fabric inspection. *Neurocomputing*, 1386–1401.
- TRÉTOU, H., DAVID, D., MARIN, J. Y., DESSENDRE, M., COUET, M. & AVENAS-PAYAN, I. 1995. An Evaluation of Artificial Neural Networks Applied to Infrared Thermography Inspection of Composite Aerospace Structures. In: THOMPSON, D. O. & CHIMENTI, D. E. (eds.) *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*. Boston, MA: Springer US.
- VUJOVIĆ, V. M., MIRJANA 2015. Raspberry Pi as a Sensor Web node for home automation. *Computers & Electrical Engineering*, 44, 153-171.

- WANG, Y., CUI, Y. & HUANG, G. Q. 2010. Study on Fruit Quality Inspection Based on Its Surface Color in Produce Logistics. *International Conference on Manufacturing Automation*. IEEE Computer Society.
- WEIMER, D., SCHOLZ-REITER, B. & SHPITALNI, M. 2016. Design of deep convolutional neural network architectures for automated feature extraction in industrial inspection. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*.
- XU, M., ZHAO, M. & ZOU, Y. 2010. On-Line Visual Inspection System for Backside Weld of Tailored Blanks Laser Welding. *IEEE*, 525-529.
- ZHANG, H. & LI, D. 2014. Applications of computer vision techniques to cotton foreign matter inspection: A review. *Computers and Electronics in Agriculture*, 109, 59–70.