

Monitoreo de las dimensiones del cordón de soldadura mediante procesamiento de imágenes digitales

Monitoring welded joint dimensions through digital image processing

Daríen Menéndez Molina¹, Marcelino Rivas Santana².

¹Hospital Materno Provincial José R. López Tabranes, darienmm.mtz@infomed.sld.cu, ²Universidad de Matanzas, marcerivas2013@gmail.com.

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 clave: 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.

1. INTRODUCCIÓN

La automatización en la industria es una característica de las dos últimas revoluciones industriales. La inspección en la producción es una de estas áreas en las que se proponen gran número de trabajos para su automatización, y entre esta la inspección a procesos de soldadura. (Li, Wang, Li, De, & Tan, 2008), refleja la importancia de una inspección automatizada a procesos de soldadura, para mejorar la productividad y como parte indispensable en la confección de robots que automaticen esta tarea en la manufactura. Su trabajo propone un dispositivo capaz de detectar defectos mediante inspección visual de manera automática, a través del uso de una cámara, luz estructurada y un algoritmo de procesamiento de imágenes. A diferencia de otras propuestas anteriores, la inclusión de luz estructurada le confiere la posibilidad de inspeccionar el refuerzo de la soldadura.

También reafirma (Xu, Zhao, & Zou, 2010) las potencialidades que brinda este método, y le adiciona a su propuesta un panel de diodos LED para controlar la iluminación en la escena, debido a que el proceso de captura de imágenes es afectado por disturbios causados por la antorcha de soldar.

En los procesos de soldadura bajo fundente se conoce que existe una relación entre el cordón resultante y la calidad de la soldadura. Por eso la importancia de realizar una inspección al cordón es una de las vías para medir la calidad, sobre todo cuando el producto puede ser potencialmente peligro ante bajos niveles de calidad, como el caso de botellones de gas licuado.

Todavía existen lugares donde se realiza la inspección a la soldadura de forma manual. Se emplean herramientas como el pie de rey, para monitorear los parámetros de ancho y alto del cordón de soldadura y la inspección visual por un operario para la detección de defectos. Al realizarse este proceso de forma manual, se convierte en un obstáculo para el incremento de la producción, o se vuelve imposible de aplicar a la totalidad del producto. No siempre las empresas pueden construir o adquirir dispositivos para la inspección automatizada, los costos de estos pueden ser elevados. Por tanto, el objetivo del trabajo es diseñar un sistema de monitoreo de bajo costo para el control de la calidad del cordón de la soldadura bajo fundente.

2. METODOLOGÍA

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 modelo B. Un ordenador de placa reducida que, con los avances en la electrónica se ha hecho posible su construcción a bajos precios; lo que la convierte en componente ideal para emprender proyectos que no dispongan de grandes fondos (Maksimović, 2014); ejemplos lo constituyen (Leccese, 2014) (Agrawal, 2015) (Vujović, 2015).

La cámara seleccionada fue la denominada PI-CAMERA. Su selección se basó por su compacto formato, total compatibilidad con la Raspberry Pi sin necesidad de software controladores, fácil instalación, concebida para colocarse en la misma carcasa y de bajo costo. Aunque sus prestaciones no compiten con las cámaras tipo CCD (Charge Coupled Device), que según plantea (Zhang & Li, 2014) son las ideales para este tipo de proyecto, su relación características-precio la convierte en una opción válida para prototipos de bajo costo.

El dispositivo emisor de la luz estructurada para la confección del prototipo propuesto es: LFL 650nm MODELO: 70104011. El resto de los componentes adquiridos no son descritos con detalle ni de relevancia, pues sus características no son determinantes para la confección de la propuesta y su objetivo es asistir a los 3 dispositivos comentados anteriormente, los cuales son parte de los componentes básicos del sistema de visión artificial que plantea (Brosnan & Sun, 2004).

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 terminar con la extracción de la información referente a las dimensiones del cordón de soldadura. Las etapas propuestas se detallan a continuación.

Captura de imagen y pre-procesamiento

La unidad de procesamiento es conectada a la cámara mediante la interfaz Csi. Las imágenes son capturadas mediante instrucciones a la PICAMERA, y en formato RGB a diferencia de (Xu et al., 2010) que realizan sus propuestas para la medición de soldaduras empleando la escala de gris. Un ejemplo de captura es mostrado en la Figura 1.

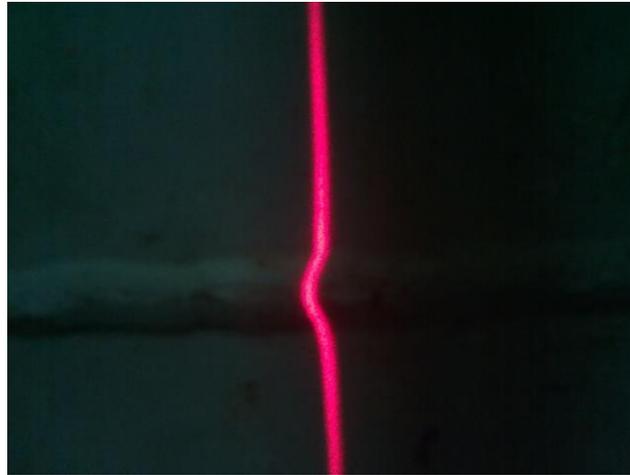


Figura 1. Imagen inicial capturada por el dispositivo.

Se aplica a la imagen capturada un filtro gaussiano. Este procedimiento elimina posibles ruidos no deseados y aleatorios en la imagen, procedentes del proceso de captura y debido a repentinas perturbaciones. Este pre-procesamiento permite obtener mejores resultados en la siguiente etapa.

Segmentación y selección

Se procede a transformar la imagen resultante en el modelo de colores HSL (del inglés: Hue, Saturation, Lightness o Matiz, Saturación, Luminosidad). Este modelo de colores responde a una transformación no lineal del espacio de color RGB, y es más adecuado para la identificación de colores en imágenes. Las propuestas sobre inspección a soldadura comentados anteriormente no emplean esta técnica, realizan su procesamiento solo 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.

Posteriormente 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 de 650 nm correspondiente al láser proyectado, transformando al espacio HSL sus valores ($H = 220$, $S = 0$, $L = 80$). La Figura 2 muestra el resultado de la segmentación basada en el color rojo.

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.

La región seleccionada representa todo el haz láser que incide sobre la imagen. 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 píxeles en la imagen) para la detección de líneas en la etapa siguiente. Durante esta etapa del algoritmo se extrae y almacena

información referente al laser proyectado en la imagen, que será empleada posteriormente en una etapa de corrección.

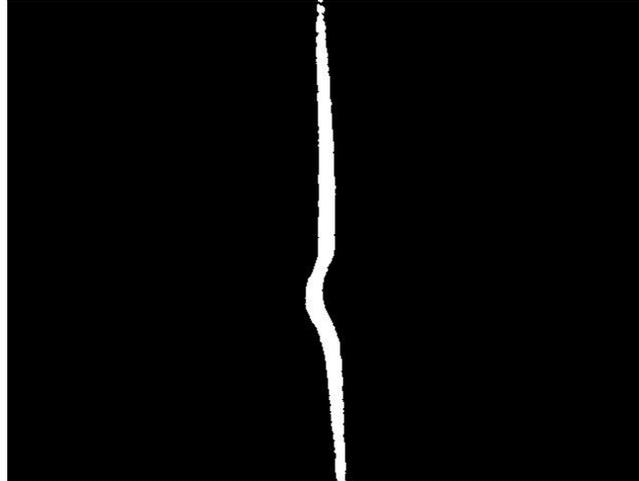


Figura 2. Resultado de la segmentación.

Extracción de información

Hasta la etapa anterior, la imagen capturada se ha ido transformando al punto que se tiene una imagen donde se identifica en blanco una línea que representa el haz láser, pero en el centro distorsionada, ver Figura 3. 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 la transformada de Hough.



Figura 3. Imagen de la región de interés con adelgazamiento.

La transformada de Hough permite identificar patrones dentro de la imagen. El patrón buscado son los segmentos de líneas que proyecta la luz estructurada y dividido por el cordón. La Figura 4 muestra como son identificados estos segmentos una vez obtenida las coordenadas por la transformada de Hough.



Figura 4. Identificación de segmentos.

Para realizar la medición de las dimensiones de alto y ancho del cordón 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. La identificación de este punto queda determinada por (1), donde f representa el haz láser, MAX función para determinar el máximo y S conjunto perteneciente a los naturales donde está acotada f .

$$(x_h, y_h) = \text{MAX}(x, f(x)); \forall x \in S \quad (1)$$

Los otros puntos de interés están determinados por los segmentos encontrados. Como se muestra en la Figura 4, los segmentos se extraen en la zona no deformada del láser, y se seleccionan de estos, los puntos detectados más cercanos a la desviación.

Con 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 identificación 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 de los materiales, 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.

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 definida por (2).

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

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 representación de los puntos identificados después de esta etapa puede verse en la Figura 5.

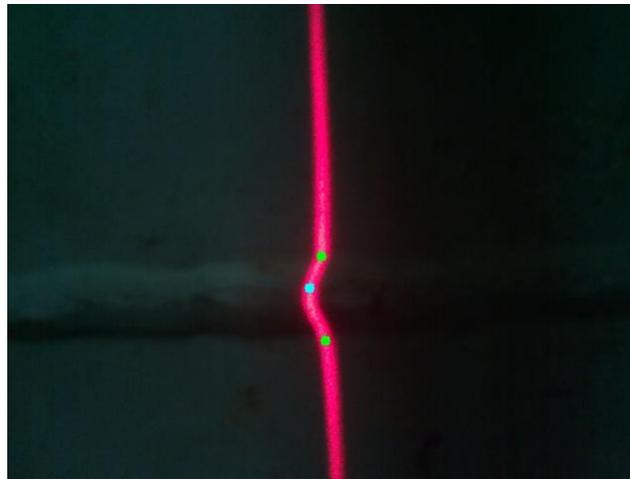


Figura 5. Identificación de puntos de interés.

Cálculo de las dimensiones

Una vez identificado los tres puntos de interés sobre la escena, se determina el ancho por la distancia euclidiana que separa los dos puntos donde comienza la distorsión y la altura por la distancia entre el punto máximo de la distorsión y la recta proyectada por la luz estructurada. Una vez calculada las distancias es necesario multiplicarlas por un factor de escala, según el espacio que representa cada pixel

en la escena real. Los factores empleados fueron de 0.0833 para el ancho y de 0.0655 para el alto. Obtenidos los valores de ancho y alto, se repite el proceso a lo largo de toda la soldadura. El algoritmo empleado queda representado en el diagrama de bloques de la Figura 6.

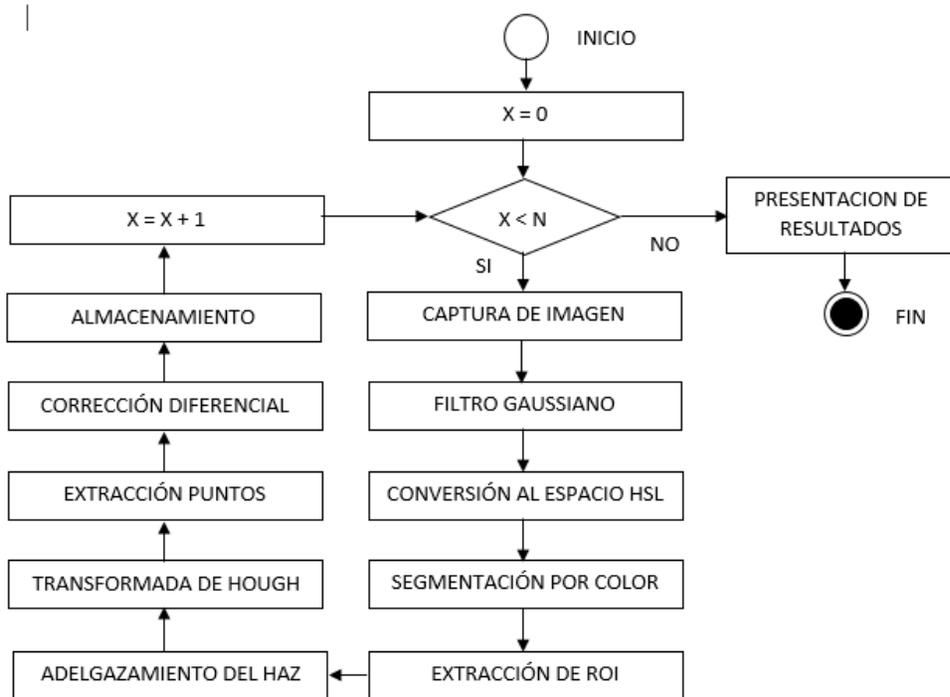


Figura 6. Diagrama de bloques del algoritmo propuesto.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El método puesto ha sido probado en la inspección a la soldadura longitudinal del proceso de confección del cilindro de gas licuado de 10 kg. El software diseñado muestra el resultado de la inspección realizada durante 20 mediciones, ver Figura 7 y 8. Los parámetros para ancho y alto del cordón de soldadura corresponden con los permitidos por la norma de fabricación. Los límites de tolerancia son tenidos en cuenta para evaluar la calidad de la soldadura en el cilindro.

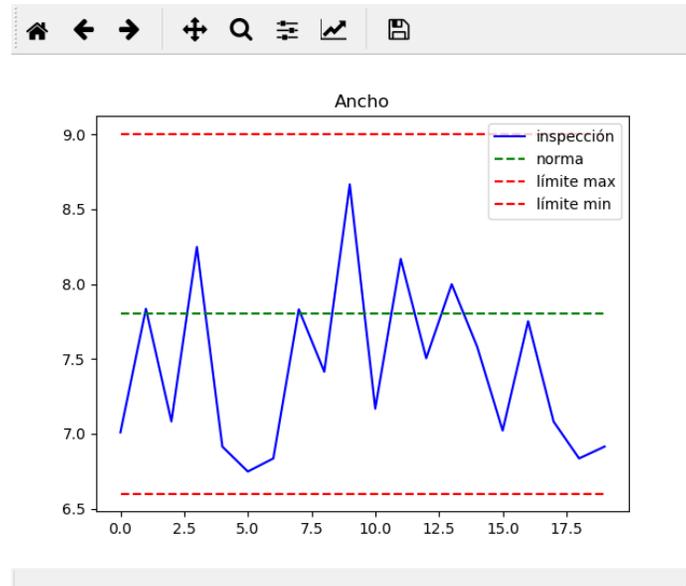


Figura 7. Resultado para el ancho del cordón en la inspección automática.

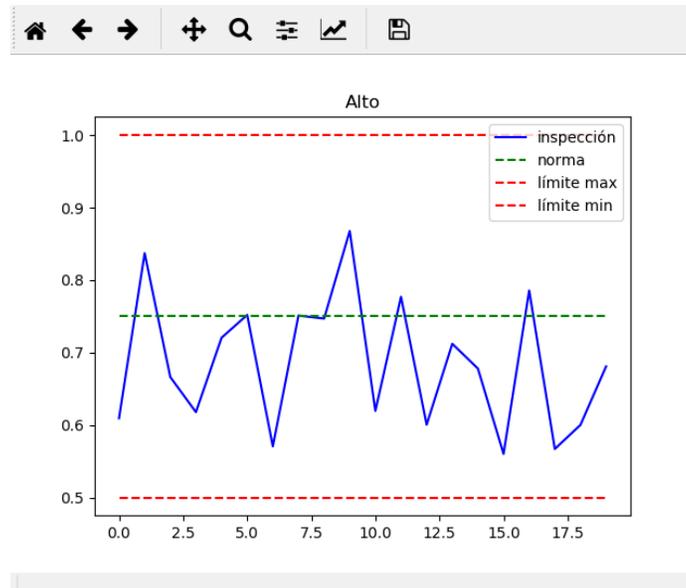


Figura 8. Resultado para la altura del cordón en la inspección automática.

Análisis de costo.

El análisis del costo del dispositivo propuesto es calculado por la suma del costo de cada uno de sus componentes electrónicos. La Tabla 1 muestra un desglose del costo de cada componente. No se incluyen los costos de la estructura metálica de soporte de cilindro ni de un motor eléctrico para su rotación durante la inspección a la soldadura longitudinal.

Las propuestas de proyectos de bajo costo en sistemas de inspección visual automatizada, quedan en el orden de los miles de euros, como en (Adamo, Attivissimo, Di Nisio, & Savino, 2009), mientras que el

propuesto por este trabajo quedaría en el orden de los cientos. Lo que representa una gran diferencia de costo en cuanto a sistemas de su tipo.

Tabla 1. Costo del sistema de monitoreo

Componentes	Descripción	Costo
Unidad de Procesamiento	Raspberry Pi 2 B, + carcasa + fuente	49.3 €
	Pantalla táctil Raspberry Pi 7" capacitiva	74,50 €
Iluminación	Laser de Línea LFL modelo: 70104011	13.35 €
	Fuente de alimentación para láser (5V)	5 €
Cámara	PI-CAMERA	19.95 €
Total		162.10 €

Análisis de costo computacional

Los sistemas que emplean técnicas de visión por computadora, 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, Falch, Bozorgi, Elster, & Lindseth, 2015) (Malmir & 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 no posee grandes prestaciones de cálculo. 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. En la Tabla 2 se muestra el coste computacional en cada una de las etapas del algoritmo propuesto.

Tabla 1. Costo del sistema de monitoreo

Etapas	Tiempo (ms)
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
Total	915

4. CONCLUSIONES

1. El presente trabajo muestra la factibilidad del sistema de monitoreo propuesto, y cómo es posible su implementación incluyendo componentes de bajo costo y de fácil adquisición.
2. La conversión de las imágenes capturadas al espacio de colores para su segmentación y no en escala de gris como se presentan en otras propuestas, permite obtener resultados óptimos bajo

una mayor variedad de iluminación ambiental, sin tener que invertir en un sistema de iluminación artificial.

3. El empleo de luz estructurada simplifica el sistema propuesto, pues permite el monitoreo de las dimensiones del cordón de soldadura con relativa sencillez y sin la adición de una segunda cámara para captar el relieve.
4. El prototipo presentado demuestra que es posible haciendo una selección adecuada de la tecnología y del algoritmo, obtener tiempos de respuestas menores de 1 segundo, con bajas prestaciones de cómputo.

5. CONFLICTO DE INTERESES

El presente trabajo ha sido financiado, parcialmente, por el proyecto empresarial *Optimización y automatización de los procesos de fabricación de recipientes a presión*, contratado con la UEB Fábrica Noel Fernández de la Empresa de Envases y Recipientes Metálicos.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adamo, F., Attivissimo, F., Di Nisio, A., & Savino, M. (2009). A low-cost inspection system for online defects assessment in satin glass. *Measurement*, 42(9), 1304-1311.
- Agrawal, N. S., Smita. (2015). *Smart drip irrigation system using raspberry pi and arduino*. Paper presented at the International Conference on. IEEE.
- Brosnan, T., & Sun, D.-W. (2004). Improving quality inspection of food products by computer vision—a review. *Journal of Food Engineering*, 61, 3-16.
- 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(12), 24408-24424.
- Li, Y., Wang, Q. L., Li, Y. F., De, X., & Tan, M. (2008, 12-15 May 2008). *On-line Visual Measurement and Inspection of Weld Bead Using Structured Light*. Paper presented at the 2008 IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference.
- 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.
- 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), 1-18.
- Vujović, V. M., Mirjana. (2015). Raspberry Pi as a Sensor Web node for home automation. *Computers & Electrical Engineering*, 44, 153-171.
- 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.

SOBRE LOS AUTORES

Darien Menéndez Molina, es Ingeniero en Ciencias Informáticas y trabaja como informático del Hospital Materno Provincial. Es Profesor Asistente a tiempo parcial de la carrera de Ingeniería Informática, en la Universidad de Matanzas.

Marcelino Rivas Santana es ingeniero mecánico y doctor en ciencias técnicas. Es investigador del Centro de Estudio de Fabricación Avanzada y Sostenible, de la Universidad de Matanzas. Investiga en temas relacionados con fabricación inteligente.