



IV Conferencia Internacional  
de Soldadura y Unión de Materiales



# IV ICONWELD

# MEMORIAS

6 al 8 de agosto de 2018  
Lima - Perú



**PUCP**



# MEMORIAS

## IV Conferencia Internacional de Soldadura y Unión de Materiales - ICONWELD 2018



**PUCP**



## MEMORIAS

IV Conferencia Internacional de Soldadura y Unión de Materiales - ICONWELD 2018

© Pontificia Universidad Católica del Perú, Unidad INGESOLD  
Av. Universitaria 1801, Lima 32, Perú  
Teléfono: 51 1 - 626 200 anexo 4880

<http://www.iconweldperu.com/>

Primera edición digital: febrero 2019

Derechos reservados. El contenido de los artículos presentes en esta memoria puede ser reproducido, siempre que se indique la referencia de autoría.

ISBN: **978-612-47965-0-0**

## **Comité organizador**

Ing. Raul Hurtado Espejo

Dr. Paul Lean Sifuentes

Ph.D. Francisco Rumiche Zapata

Dr. Carlos Fosca Pastor

Mg. Paulo Muñante Palacín

Mg. Ainsworth Noriega Ríos

Ing. Guillermo Gutierrez Rimayhuamán

Ing. Lourdes López Decena

Sra. Natalia Monzón Fajardo

Dr.(c) José Sakihama Uheara

Ph.D. Jorge Merzthal Toranzo

Ing. Pedro Coloma Vera

Srta. Ingrid Pino Jimenez

Lic. Patricia Harman Canales

## **Comité técnico**

Dr. Fernando Torres

Dr. Jorge Alencastre

Dr. Luis Chirinos

Dr. Luis Cotaquispe

Dr. Jorge Rodriguez

Dr. Julio Acosta

Dr. Quino Valverde

Dr. Juan José Jiménez de Cisneros

Dr. Victor Andrade

Dr. Rosendo Franco

Dr. Dante Elías

Dr. Julio Cuisano

Dr. Omar Troncoso

Ph.D.(c) Francisco Cuellar

Dr.(c) Herbert Yopez

## **Introducción**

El documento presenta los artículos expuestos en la IV Conferencia Internacional de Soldadura y Unión de Materiales - ICONWELD 2018, conferencia se realizó, en la ciudad de Lima, los días 6, 7 y 8 de agosto, con la finalidad de establecer un foro de intercambio de información y conocimiento en el campo de la soldadura y tecnologías de unión, cubriendo actividades en industrias, universidades y centros de investigación y desarrollo a nivel mundial.

Este evento fue organizado por la Pontificia Universidad Católica del Perú, auspiciado por Instituto Tecnológico de la Producción – ITP y la empresa SOLDEX S.A. y los auspicios internacionales de la Sociedad Americana de Soldadura AWS, el Instituto Internacional de Soldadura IIW y la Asociación Española de Soldadura y Tecnologías de Unión - CESOL.

## Contenido

INTELLIGENT WELDING: INSTANTANEOUS MONITORING OF WELD DEFECTS DURING WELDING USING ACOUSTIC EMISSION AND NON-CONTACT ULTRASONICS.....	1
Alexandra Basantes-Defaz, Lu Zhang, Didem Ozevin, Donald Yuhas, and J. Ernesto Indacochea.	
SOLDADURA ROBOTIZADA POR EL PROCESO MAG .....	17
Marco Stipkovic Filho, Everaldo Vitor, Marco Antonio Stipkovic	
PREPROCESSING OF DATA OBTAINED IN THE GMAW WELDING PROCESS USING MACHINE LEARNING TECHNIQUES .....	31
Elina Mylen Montero Puñales, Sadek Crisóstomo Absi Alfaro, Fabian Eduardo Girón, Rogfel Thompsom Martínez	
EVALUACIÓN DEL POLÍMERO COMO INGREDIENTE EN EL FUDENTE PARA SOLDADURA POR ARCO SUMERGIDO .....	39
Pedro Henrique Ribeiro Menezes, Alexandre Queiroz Bracarense	
SOLDADURA DE BARRAS DE REFUERZO DE ACERO TIPO CA-50 MICROALEADO al V y Nb UTILIZADAS EN LA CONSTRUCCIÓN CIVIL .....	56
Angel Rafael Arce Chilque, Letícia Barbosa Silva, Wender Roger Ramos, Roney Eduardo Lino	
CORROSIÓN POR PICADO EN SOLDADURAS DE AISA (AL6XN®).....	65
J. M. Echarri, C.A. Gervasi, P.D. Bilmes, C.L. Llorente, P. F. Bonvicini, J.A Martínez	
CERTIFICACIÓN DE PERSONAL QUE REALIZA INSPECCIÓN EN COLOMBIA COMO INTEGRIDAD DE ACTIVOS.....	77
Beiker Martínez Rueda	
INFLUENCE OF THE PRE-HEATING TEMPERATURE IN THE WELDING OF WHITE CAST IRON.....	86
R. G. Favacho, M. V. S. C. Junior, P. D. C. Assunção, C. R. L. Loayza, E. M. Braga	
PREDICCIÓN Y MEDICIÓN DE FERRITA DELTA EN ACEROS INOXIDABLES HIPERDÚPLEX.....	94
Alberto Bejarano, Rolando Núñez	
CONSTRUCCIÓN DE MAPA DE MODOS DE TRANSFERENCIA EN PROCESO GMAW DE UN ELECTRODO DE ALUMINIO ER5183 PARA CONSTRUCCIONES NAVALES .	103
Juan Camilo García Vianal, Jorge Enrique Giraldo Barrada	

ESTUDIO ECONÓMICO DE REVESTIMIENTOS DE ACEROS INOXIDABLES AUSTENÍTICOS CON BASE DE COBALTO FABRICADOS A TRAVÉS DE CW-GMAW .....	113
Tarcio S. Cabral, Ademir Â. C. Filho, Diego J. A. Borges, Lino A. S. Rodrigues, Paola E. C. Baia, Cristhian R. L. Loayza, Eduardo M. Braga	
NUMERICAL SIMULATION OF THE CONDUCTION LIMITED LASER WELD POOL GEOMETRY BY VORTICITY-STREAM FUNCTION IMPLEMENTATION COUPLED WITH THE ROSENTHAL SOLUTION .....	123
Nicolás Olivares, Gabriel Olmos, Daniel Zunino, Wolfram Jahn, Mihir Sen, Jorge Ramos-Grez	
DYNAMIC DROP VOLUME FUNCTION AND DEEP LEARNING TECHNIQUE TO OBTAIN DROP AND MOLTEN VOLUME IN GMAW PROCESS .....	136
Rogfel Thompson Martínez, Sadek C. Absi Alfaro, and Alysson Martin Silva	
SOLDADURAS DE RANURA POR ARCO SUMERGIDO POSICIÓN HORIZONTAL PARA JUNTAS EN T .....	142
Cristhian Eduardo Aguirre Sosapanta	
UN MODELO MAGNETO-HIDRODINAMICO DEL BAÑO DE SOLDADURA Y SU APLICACIÓN.....	153
Angelo Giovanni Mario Catalano	
HERRAMIENTAS PARA ADQUISICIÓN DE DATOS Y MODELACIÓN DE LA GEOMETRÍA DEL CORDÓN EN PROCESOS DE SOLDADURA POR ARCO ELÉCTRICO.....	164
Guillermo Alvarez Bestard, Sadek C. Absi Alfaro	
ANÁLISIS DE LA PRESENCIA DE UNA FISURA EN UNA RUEDA DE ALTA VELOCIDAD PERTENECIENTE A UN CAMIÓN ELÉCTRICO PARA TRANSPORTE DE MINERAL .	176
Roberto Lazarte Gamero, Aníbal Rozas Gallegos, Víctor Agüero Zamora	
EFFECTO DE LOS PARÁMETROS DE SOLDADURA EN LOS CICLOS TÉRMICOS DE ACERO DE ALTA DUREZA .....	188
Charles H. M. de Vasconcelos, Cristhian R. L. Loayza, Paulo D. C. Assunção, Francisco J. Ferreira, Ademir Â. C. Filho, Cássio W. C. Tavares, Eduardo M. Braga	
LOW-DENSITY STEEL COATING MANUFACTURED VIA CW-GMAW .....	197
Cristhian R. L. Loayza, Alberto R. Correia, Paulo D. C. Assunção, Francisco J. Ferreira, Ademir Â. C. Filho, Danyella C. S. Cardoso, Eduardo M. Braga	
TRANSFORMACIONES DE FASE EN LA ZAC DE UNA UNIÓN SOLDADA DE ACERO 304L-ALEACIÓN 600 .....	205
L. Zamora Rangel, J. A. Aguilar Torres, A. R. Sandoval Jiménez, L. Díaz Pérez, C. R., Arganis Juárez, J. C. Zenteno Suárez.	

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA PARA LA MEDICIÓN DE HIDRÓGENO  
DIFUSIBLE EN ACEROS MARTENSÍTICOS, FERRÍTICOS Y BAINÍTICOS ..... 213

Alberto Bejarano, Patricio Méndez

RESIDUAL STRESS IN MACHINED DUPLEX STAINLESS STEEL WELDS DEVELOPED  
THROUGH AUTOMATIC PROCESS ..... 222

Carolina Payares-Asprino, Patricia Muñoz-Escalona, Ana Sanchez

DETERMINACIÓN DE LA CONSTANTE ACÚSTICO ELÁSTICA ATRAVÉS DE  
BIRREFRINGENCIA DE ACERO DE ALTA DUREZA ARMOX 500T PARA ANÁLISIS DE  
TENSIONES RESIDUALES ..... 231

Cristhian R. L. Loayza, Ednelson S. Costa, Sammy N. Pompeu, Lino A. S. Rodrigues,  
Tarcio S. Cabral, Charles H. Vasconcelos, Eduardo M. Braga

# HERRAMIENTAS PARA ADQUISICIÓN DE DATOS Y MODELACIÓN DE LA GEOMETRÍA DEL CORDÓN EN PROCESOS DE SOLDADURA POR ARCO ELÉCTRICO

Guillermo Alvarez Bestard<sup>1,a</sup>, Sadek C. Absi Alfaro<sup>2,b</sup>

<sup>1</sup>Grupo de Ingeniería Electrónica, Facultad de Gama,

Universidad de Brasilia, Gama, DF, Brasil, CEP 72444-240

<sup>2</sup> Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica, Facultad de Tecnología,

Universidad de Brasilia, Brasilia, DF, Brasil, CEP 70910-900

<sup>a</sup>guillermo@unb.br, <sup>b</sup>sadek@unb.br

## Resumen

La soldadura por arco eléctrico es ampliamente usada en la industria, pero su automatización está limitada por las condiciones ambientales adversas existentes en la periferia del arco, lo que dificulta la medición de las dimensiones del cordón de soldadura para cerrar el lazo de control. En estas condiciones no es posible utilizar sistemas de medición convencionales. En este trabajo se describen un conjunto de algoritmos y herramientas hardware-software desarrolladas para obtener los datos que permiten medir y estimar la geometría del cordón de soldadura en este tipo de proceso. Para ello, se desarrolla un sistema de adquisición de datos y control a lazo abierto, un escáner laser y un algoritmo para medir la penetración utilizando imágenes macrográficas de cortes longitudinales del cordón de soldadura. La mayoría de estas herramientas se caracterizan por su bajo costo, permitiendo su empleo en trabajos de investigación y actividades docentes. Se muestran algunas mediciones realizadas y su aplicación en la obtención de modelos dinámicos de la geometría del cordón, utilizando fusión de sensores, en un proceso GMAW convencional con fuente de tensión constante.

**Palabras clave:** adquisición de datos, geometría del cordón de soldadura, procesamiento de imágenes, soldadura por arco eléctrico.

## Abstract

Electric arc welding is widely used in industrial processes, but its automation is limited by the adverse environmental conditions in the periphery of the arc, which makes it difficult to measure the dimensions of the weld bead to close the control loop. Under these conditions, it is not possible to use conventional measuring systems. In this work, we describe a set of algorithms and hardware-software tools developed to obtain the data that allows to measure and estimate the geometry of the weld bead in this type of process. A data acquisition and open loop control system, a laser scanner and an algorithm to measure penetration using macrographic images of longitudinal cuts of the weld bead are developed. Most of these tools are characterized by their low cost, allowing their use in research and academic activities. The measurements are used to obtaining dynamic models of the weld bead geometry, using sensor fusion, in a conventional GMAW process with a constant voltage power source.

**Key words:** data acquisition, electric arc welding, image processing, weld bead geometry.

## 1. Introducción

En los procesos de soldadura por arco eléctrico, la geometría del cordón es un indicador frecuentemente usado para evaluar su calidad [1]. Las dificultades existentes para medir los parámetros geométricos del cordón de soldadura, en las condiciones extremas creadas por el arco eléctrico, obligan a emplear métodos no convencionales de medición [2–5] o a obtener estas mediciones después de concluido el proceso.

Controlar el proceso en lazo cerrado puede garantizar una calidad satisfactoria y constante en la mayor parte de las piezas producidas. Un caso especial es el control de la penetración del cordón de soldadura, porque esta no puede ser medida directamente durante el proceso (on-line) y debido a esto no es posible cerrar el lazo de control. Para obtener una medición precisa es necesario utilizar, después de concluido el proceso, métodos invasivos que dañan la pieza soldada.

De forma general, los procesos de soldadura por arco tienen un comportamiento no lineal, variante en el tiempo e estocástico, con múltiples entradas y salidas, interrelacionadas entre sí y con varias perturbaciones medibles y no medibles, lo cual incrementa su complejidad y dificulta su modelación y control [6].

Sin embargo, según muestra el estudio bibliográfico realizado en [7], la mayor parte de estas mediciones se llevan a cabo utilizando imágenes de macrografías en cortes transversales al cordón de soldadura. Este método es simple pero no ofrece suficiente información para evaluar la penetración en toda la longitud del cordón y capturar la dinámica del proceso. Consecuentemente, solo el 15% de los trabajos analizados obtiene modelos dinámicos del proceso, lo que dificulta aplicar métodos de control avanzados y ajustar correctamente los controladores.

Una solución para cerrar el lazo de control, es estimar el valor de la penetración mediante un modelo del proceso cuyas entradas sean las mediciones de otras variables medibles on-line y su salida realmente al controlador con el valor estimado de la penetración, según se muestra en [6–8]. Pero, para obtener un buen desempeño del controlador, el modelo debe ser capaz de reproducir la dinámica del proceso y no solo su respuesta estática. Para desarrollar el modelo es necesario obtener mediciones de la penetración y del resto de las variables involucradas, en todo el cordón de piezas soldadas en condiciones de operación similares a las usadas en la línea de producción. En todos los casos, es imprescindible contar con un sistema de adquisición de datos que permita obtener estas mediciones y validar los estimadores.

En este trabajo se describen un conjunto de algoritmos y herramientas hardware-software desarrolladas para obtener los datos que permiten medir y estimar la geometría del cordón de soldadura. Para ello se desarrolla un sistema de adquisición de datos y control a lazo abierto, algoritmos de procesamiento de imágenes y de estimación de la penetración del cordón, optimizados para su uso en sistemas empotrados. Uno de estos algoritmos permite medir la penetración a partir de imágenes macrográficas de cortes longitudinales del cordón de soldadura. Los datos obtenidos son utilizados para entrenar los estimadores de la penetración y el ancho del cordón de soldadura. Se muestran algunas mediciones realizadas y su aplicación en la obtención de modelos dinámicos de la geometría del cordón en un proceso GMAW (del inglés Gas Metal Arc Welding) convencional con fuente de tensión constante. La mayoría de estas herramientas se caracterizan por su bajo costo, permitiendo su empleo en trabajos de investigación y actividades docentes.

El trabajo se llevó a cabo con los recursos disponibles en el Grupo de Automatización y Control (GRACO) y el Programa de Pos-graduación en Sistemas Mecatrónicos (PPMEC) de la Universidad de Brasilia, con el auxilio de la Coordenação de Aperfeiçoamento de

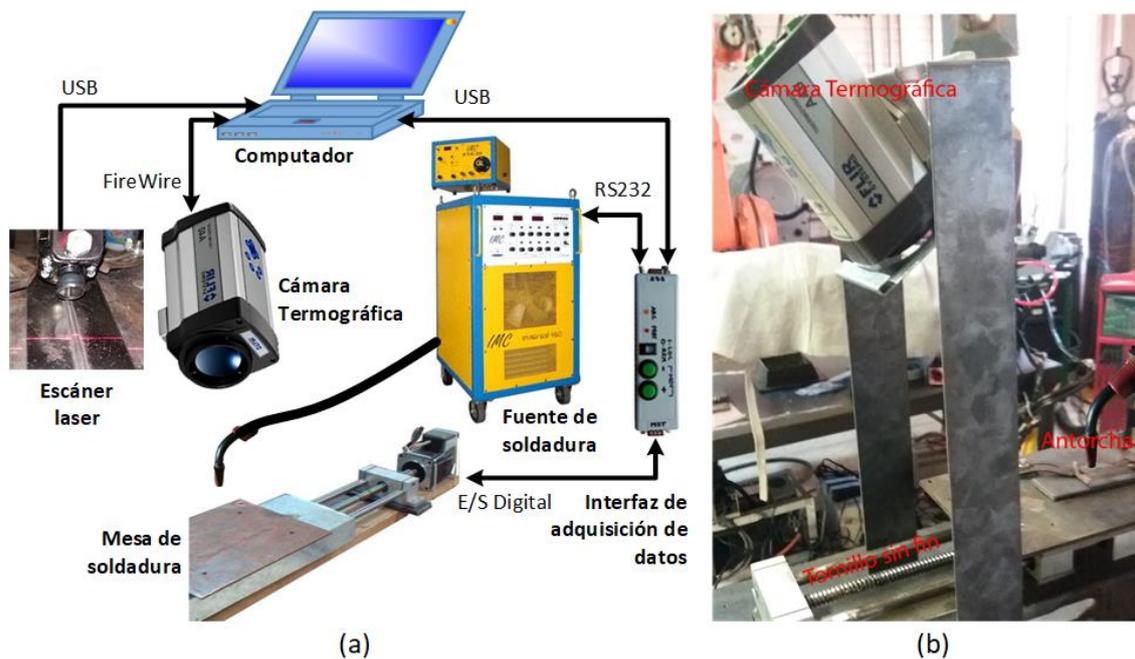
Pessoal de Nível Superior (CAPES) y del Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) de Brasil.

A continuación, se describen los principales algoritmos y equipamientos desarrollados para adquirir los datos del proceso de soldadura.

## 2. Sistema de adquisición de datos y control en lazo abierto

En este trabajo se desarrolló un sistema de adquisición de datos que permite medir y almacenar durante el proceso, en un computador, los valores de las variables de arco (tensión eléctrica e intensidad de corriente eléctrica) y los valores registrados por una cámara termográfica (o infrarroja) enfocada hacia el pozo de fusión. También es posible controlar a lazo abierto la velocidad y la tensión de soldadura, la velocidad del alambre, los parámetros de configuración de la fuente de soldadura, la abertura y cierre del arco eléctrico. Un escáner láser permite, después de concluido el proceso, realizar un perfil tridimensional de la parte externa del cordón y un algoritmo de procesamiento de imágenes obtiene el perfil de la penetración del cordón.

El sistema consta de seis componentes fundamentales: fuente de soldadura, mesa de soldadura, interfaz de adquisición de datos y control de posición de la pieza, cámara termográfica, escáner láser tridimensional y un computador donde corre el programa de adquisición y procesamiento de las mediciones obtenidas. En el diagrama en bloques de la Figura 1a se pueden apreciar las conexiones entre estos componentes y a continuación se describe cada uno de ellos.



**Figura 1. Sistema de adquisición de datos: a) Principales componentes e interconexiones; b) Mesa de soldadura**

La *fuentes de soldadura* por arco eléctrico utilizada es un modelo Inversal 450, desarrollada por la empresa brasilera IMC-Soldagem [9]. Es una fuente multiproceso, controlada por microcontrolador y que emplea IGBT para generar el arco de soldadura. Posee un protocolo de comunicación serie (RS232) que permite el control del proceso de forma remota.

La *mesa de soldadura*, mostrada en la Figura 1b, está formada por una plataforma móvil que es accionada por un eje lineal de 5mm de avance por revolución y un motor de paso de 1.8 grados por paso. El motor hace girar el eje lineal para mover la plataforma, donde está fija la pieza a ser soldada, manteniendo inmóvil la antorcha de soldadura. El circuito controlador del motor de paso, permite utilizar técnicas de micropaso a una velocidad lineal máxima de 15 mm/s, con una carga máxima de 15 Kg [5]. A este sistema, desarrollado por estudiantes de GRACO, se le adicionó una estructura para fijar la cámara termográfica y el escáner.

La *interfaz de adquisición de datos* es un desarrollo propio, basado en un microcontrolador PIC18F2550, que sincroniza el movimiento de la pieza a soldar con los parámetros de funcionamiento enviados a la fuente de soldadura y obtiene las mediciones del proceso en tiempo real. Para ello, se conecta a la fuente de soldadura, a un computador y al circuito de control del motor de paso de la mesa, a través de un puerto RS232, USB y señales digitales respectivamente, según se muestra en la Figura 1a.

Antes de comenzar a soldar, el microcontrolador recibe, desde el computador, la secuencia de valores que debe enviar a la fuente de soldadura en cada posición de la pieza. El usuario define previamente esta secuencia que incluye el punto de inicio y fin de la soldadura, la velocidad de movimiento de la pieza y el período de muestreo o la distancia entre muestreos según el modo de trabajo seleccionado.

Una vez iniciado el proceso de soldadura, la interfaz tiene un funcionamiento autónomo e independiente del computador, pero sigue recibiendo comandos de este y enviando las mediciones obtenidas en cada posición. Esto permite al programa de adquisición de datos, que se ejecuta en el computador, obtener una imagen de la cámara termográfica en cada muestreo realizado por la interfaz, manteniendo la sincronía entre todas las mediciones y trabajando en tiempo real, independientemente del reloj o las prioridades del sistema operativo.

En la Figura 2 se puede apreciar la sencillez y pequeño tamaño del prototipo de la interfaz. Se muestran los controles para mover la mesa de soldadura de forma manual (Mov + y -), un selector de operación manual o remota, un indicador de movimiento y de arco abierto, y un buzzer que indica el inicio y fin de la secuencia de soldadura o la ocurrencia de un error.



**Figura 2. Prototipo de la interfaz de adquisición de datos y control en lazo abierto:  
a) Placa electrónica; b) Vista externa**

Para el desarrollo de la interfaz fue necesario un estudio detallado del protocolo de comunicación con la fuente de alimentación. Se utilizó una máquina de estados para controlar el funcionamiento de la fuente de soldadura, reduciendo al mínimo el tiempo de comunicación para garantizar un período de muestreo aceptable. También se creó un protocolo de comunicación entre la interfaz y el computador, que permite un gobierno total de la fuente y la mesa de soldadura, así como del funcionamiento de la interfaz y de la secuencia de operación del proceso.

La interfaz envía al circuito de control del motor de paso la señal de dirección y un pulso por cada paso, mediante dos señales digitales. También verifica la ocurrencia de algún error mediante una señal enviada por este circuito. El tratamiento de estas señales se

hace mediante interrupciones de un temporizador, ajustadas al tiempo de paso definido por el usuario.

Para el muestreo, existen dos modos de trabajo. Uno de ellos se basa en un tiempo predefinido por el usuario (período de muestreo) y que es controlado por la interrupción de un temporizador en un rango de 5 a 500 ms. En este modo, cada interrupción envía al computador un conjunto de mediciones. Tiene la desventaja de que, al variar la velocidad de movimiento, manteniendo fijo el período de muestreo, la distancia entre muestreos variará. El otro modo se basa en comparar el incremento de posición desde el último muestreo con un valor también preestablecido por el usuario. Una vez que este incremento es igual al valor prefijado, se envía un nuevo juego de mediciones al computador. Esto se repite en intervalos iguales de posición, permitiendo al usuario obtener las mediciones cada cierta distancia de avance de la pieza, independientemente de la velocidad de movimiento.

La *cámara termográfica* A40 de FLIR-Systems [10], emplea un sensor de tecnología FPA (del inglés Focal plane array uncooled microbolometer). Cuenta con un rango espectral entre 7.5 y 13  $\mu\text{m}$ , un rango de temperaturas entre  $-40^{\circ}\text{C}$  y  $2000^{\circ}\text{C}$ , una frecuencia de muestreo de hasta 120 Hz (120 imágenes por segundo) y una resolución de 16 bits en modo monocromático. Una matriz numérica, con los valores de la emisión termográfica en cada pixel de la imagen, se envía a través de un puerto de comunicación FireWire.

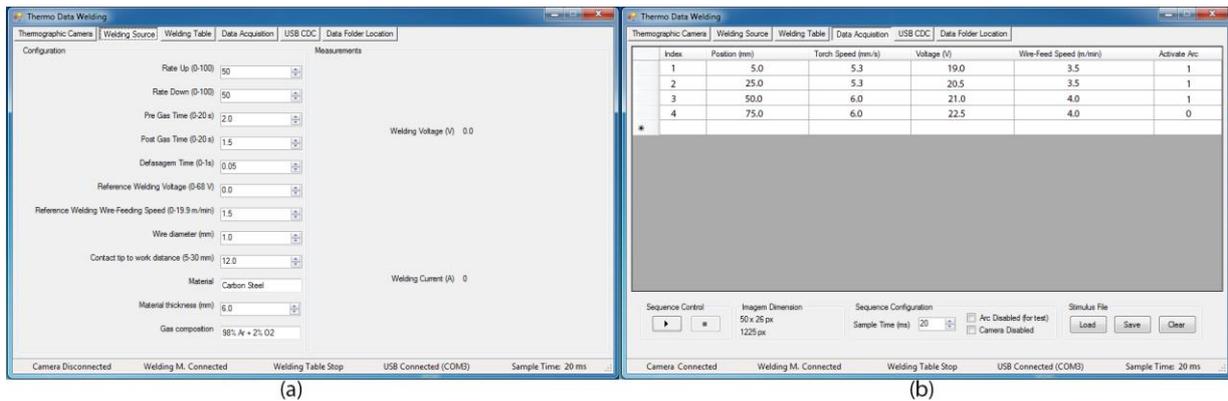
Un *programa para la adquisición de datos* y el diseño de la secuencia de operación, denominado ThermoDataWelding (TDW), fue desarrollado en Visual Basic 2012 empleando las librerías suministradas por el fabricante de la cámara termográfica. Este se utiliza para recolectar y almacenar en archivos tipo texto, los datos del proceso de soldadura y de funcionamiento de todo el sistema. Se divide en seis módulos, orientados a funciones específicas que se mencionan a continuación:

*Cámara termográfica:* Permite la configuración y verificación de la cámara. Muestra la imagen termográfica y un perfil de esta con el valor máximo y mínimo.

*Fuente de soldadura:* Establece los parámetros de soldadura que no cambian durante el proceso. Esto incluye la inductancia, tiempos de pre-gas y post-gas, desfasaje, diámetro del alambre, distancia entre la punta de contacto y la pieza, tipo y espesor del material, y composición y flujo de gas de protección. Se muestra en la Figura 3a.

*Mesa de soldadura:* Facilita el ajuste de la posición inicial y muestra el estado de la interfaz.

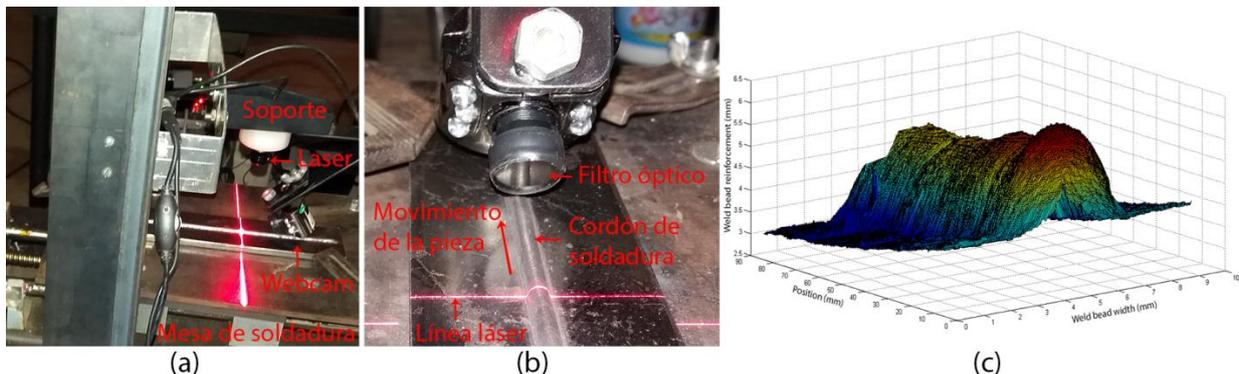
*Adquisición de datos:* Permite crear o modificar la secuencia de soldadura. Esto incluye el período de muestreo, la abertura y cierre del arco eléctrico, los valores de tensión y velocidad del alambre que serán enviados a la fuente en cada posición. El usuario inicia el proceso y este se detiene automáticamente al culminar la secuencia, o de forma manual. Crea un archivo con toda la información enviada y recibida de la fuente de soldadura (a través de la interfaz) y de la cámara termográfica, incluyendo la posición de la pieza. Se muestra en la Figura 3b.



**Figura 3. Programa para la adquisición de datos: a) Configuración de la fuente de soldadura; b) Configuración de la secuencia de operación y adquisición de datos**

**USB CDC y Localización del archivo de datos:** Estos módulos permiten configurar el puerto de comunicación USB con la interfaz de adquisición de datos y la carpeta donde se almacenarán los archivos de configuración y las mediciones de cada experimento. Para garantizar que las mediciones se tomen con el período de tiempo correcto, estas son obtenidas por la interfaz y enviadas al computador. El programa, al recibir un muestreo, solicita a la cámara una imagen termográfica, la procesa y almacena el valor de cada pixel junto con las mediciones recibidas. O sea, el tiempo de muestreo es definido por el usuario en el programa, pero es controlado por la interfaz.

El **escáner o perfilómetro láser** permite obtener un perfil en tres dimensiones de la geometría del cordón de soldadura. Su funcionamiento se basa en la técnica de triangulación [2,11] y algoritmos de procesamiento de imágenes desarrollados específicamente para este sistema. Emplea un emisor láser que dibuja una línea sobre el cordón de soldadura, una cámara web (webcam) de baja resolución con comunicación USB y un filtro óptico ajustado a la frecuencia de emisión del láser. Esto puede apreciarse en la Figura 4a y b.



**Figura 4. Componentes del escáner láser: a) Estructura de soporte sobre la mesa de soldadura; b) Cámara con filtro óptico; c) Imagen tridimensional del cordón de soldadura**

La pieza se mantiene fija en la mesa de soldadura después de concluida esta y se desplaza hasta la posición del escáner para obtener su geometría. Un programa desarrollado en Matlab/GUIDE se comunica con la interfaz de adquisición de datos para controlar la posición de la pieza mientras la cámara obtiene las imágenes de la línea láser. Durante su funcionamiento, cada imagen se convierte a tonos de grises y se filtra utilizando un filtro N-D multidimensional Gaussiano. Posteriormente se aplica un filtro de mediana y se transforma a monocromática. Seguidamente se le realizan operaciones

morfológicas de “skel”, para eliminar los pixels cercanos a la línea del perfil sin afectar esta, y “clean” para eliminar el resto de los pixels aislados.

Terminado este primer procesamiento, se eliminan los pixels duplicados en cada columna y se aplica un algoritmo de interpolación para completar los puntos faltantes en la curva. Posteriormente, se rota la imagen y durante el proceso se identifica la recta que representa la superficie de la pieza (línea base). La imagen queda en posición horizontal y se calcula la altura como la diferencia entre la línea base y el valor máximo de la curva. El ancho del cordón se calcula utilizando la primera derivada de la curva. Finalmente se escalan los valores obtenidos utilizando los datos de calibración. El sistema guarda en un archivo texto la información de la posición, el perfil obtenido y los valores de alto y ancho del cordón para cada posición. Con estos datos es posible obtener una representación tridimensional como la mostrada en la Figura 4c.

Es posible configurar dos modos de funcionamiento. Uno que se basa en un incremento fijo de la posición en cada muestreo y el otro en la lectura de la posición a medir a partir del archivo de datos obtenido durante la soldadura. Con este sistema es posible escanear cordones de hasta 25 mm de ancho y 10 mm de alto. Su calibración se realiza con un procedimiento automático utilizando piezas de dimensiones conocidas. Se ha verificado una resolución de 0.035 mm de ancho y 0.05 mm de alto, con un error inferior al 5% de la plena escala del sistema.

### **3. Metodología para medir la penetración utilizando procesamiento de imágenes**

La medición de la penetración del cordón de soldadura se realiza después de concluido el proceso utilizando una o varias imágenes obtenidas en un corte longitudinal del cordón. La pieza soldada se corta por el centro del cordón de soldadura, utilizando un método de corte que no provoque cambios en la estructura metálica de la pieza. En nuestro caso se utilizó un cepillo mecánico, que eliminó aproximadamente la mitad de la pieza analizada, pero pueden usarse otros métodos como discos de corte o fresas a baja velocidad.

La cara lateral de la pieza cortada, es pulida e sometida a una solución de Nital (2.5-5%) para mejorar la definición de la imagen. Posteriormente se obtiene una imagen digital de la cara lateral, como la mostrada en la Figura 5a, y se envía al algoritmo de procesamiento de imágenes. En nuestro caso, las imágenes se tomaron utilizando la cámara de un teléfono celular con 13 Mega Pixel y luz solar como fuente de iluminación.

El algoritmo de procesamiento de imágenes, desarrollado en un script de Matlab, tiene como parámetros de entrada la ubicación del archivo de la imagen a ser procesada, la espesura y longitud del material, entre otros datos. Al ser invocado, el algoritmo carga la imagen en memoria y para evitar errores en la referencia, el usuario debe marcar en la imagen dos puntos sobre la superficie superior e inferior del material. También debe cortar la imagen en sus extremos laterales para que contenga exactamente a la pieza soldada, cuyo valor de longitud fue informado al inicio. Los puntos van a definir la superficie inferior y superior de la pieza y van a ser utilizados como referencia para medir la penetración del cordón.

Una vez realizado esto, se calcula la ecuación de la recta de la línea base o línea que representa la superficie superior y es la referencia de cero de la medición de la penetración. También se calcula la línea de la superficie inferior y los factores de escala en cada eje. Teniendo en cuenta los datos de espesura del material y las ecuaciones de

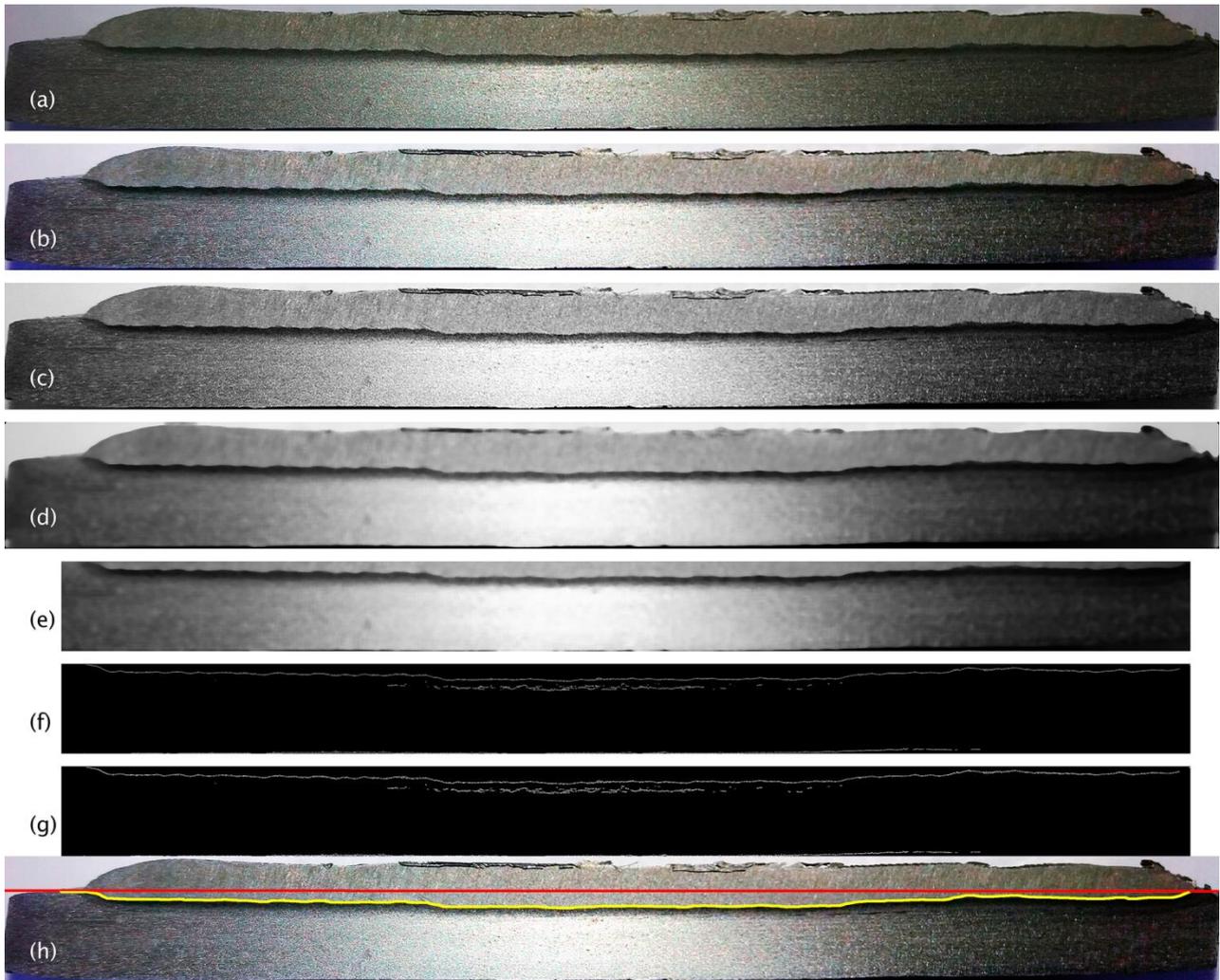
ambas rectas, es posible determinar la escala del eje vertical en cada columna de la imagen. Este parámetro es imprescindible para corregir los efectos de distorsión, rotación y desalineamiento de la imagen tomada. Con el valor de longitud de la pieza se calcula el factor de escala en el eje horizontal. Una vez obtenida esta información, se aplica el algoritmo de procesamiento de imágenes mostrado en la Figura 5 y que se explica a continuación.

Primeramente, se mejora el contraste de la imagen con un algoritmo de ecualización del histograma aplicado a cada canal RGB de forma independiente. Seguidamente, se transforma la imagen RGB a escala de grises y se aplica un filtro de mediana sobre la matriz de la imagen. El filtro es bidireccional y abarca 20 puntos vecinos del punto analizado en cada iteración. Este paso ayuda a suavizar los bordes de la imagen y a reducir los ruidos. A continuación, se restringe el área de trabajo y se aplica un algoritmo de detección de bordes con el operador Sobel en el sentido horizontal. Este algoritmo calcula una aproximación al gradiente de la función de intensidad de la imagen y retorna una imagen monocromática conteniendo el perfil de la penetración del cordón. A esta se le aplica un filtro N-D multidimensional Prewitt que enfatiza los bordes en el sentido horizontal. Seguidamente, se obtienen todos los puntos de la imagen, se hacen cero aquellos que estén por encima de la línea base y se eliminan los puntos aislados del perfil del cordón. Para completar los puntos faltantes se utiliza un método de interpolación. Posteriormente, se aplica un filtro de mediana a la serie de datos. Finalmente, se dibuja la línea de penetración y la línea base sobre la imagen original con fines de verificación visual por parte del usuario. Esta imagen se guarda en la misma carpeta de origen.

Finalmente se leen todas las posiciones medidas por el sistema de adquisición de datos desde un archivo texto (especificado inicialmente) y se buscan estas posiciones en la serie de datos de penetración. Un nuevo archivo es generado con los datos de penetración en cada posición medida durante el experimento.

Es importante señalar que si se detecta que el corte de la pieza no está correctamente alineado con el centro del cordón o si se requiere una precisión mayor en la medición, es necesario repetir este proceso (incluyendo el desbaste de la pieza) por lo menos 3 veces, con el objetivo de encontrar el valor máximo de la penetración en cada punto de la imagen. Debido al desalineamiento del corte o fenómenos propios del proceso de formación del cordón, pueden existir puntos donde la penetración sea menor o mayor que la real (por ejemplo, si el corte está sobre una ladera del cordón y no sobre su cresta). En estos casos, el algoritmo utiliza varias imágenes para determinar el valor máximo de penetración en cada punto medido.

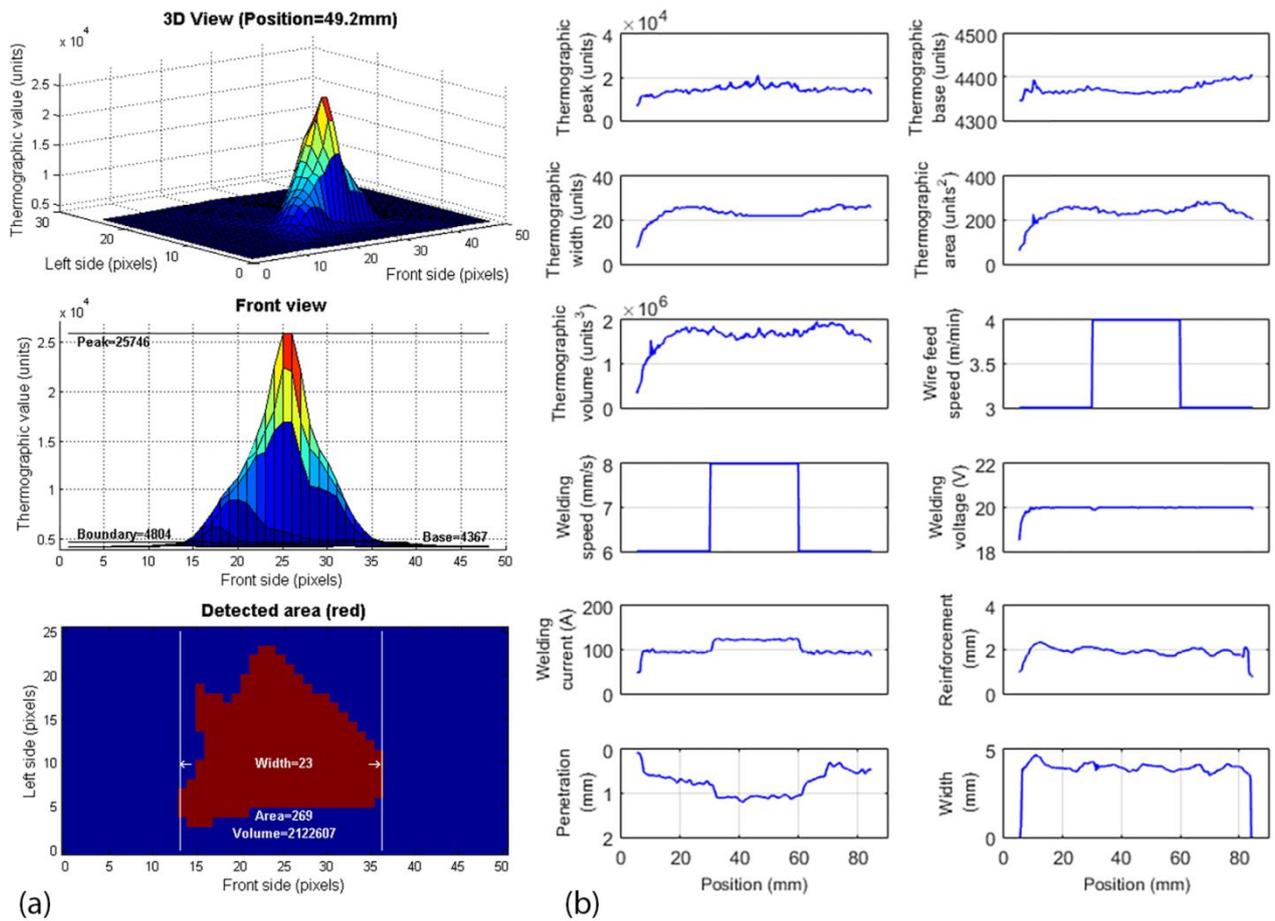
La principal ventaja del método es que permite obtener la medición de la penetración en todo el cordón de soldadura y por tanto su comportamiento dinámico. Los cortes transversales, usados tradicionalmente, no permiten esto.



**Figura 5. Procesamiento de la imagen macrográfica para determinar la penetración del cordón: a) Imagen de la pieza después de la preparación con Nital; b) Ecualización del histograma en cada canal; c) Imagen en tonos de grises; d) Aplicación del filtro de mediana; e) Restricción del área de trabajo; f) Aplicación del algoritmo de detección de bordes; g) Aplicación del filtro multidimensional para enfatizar bordes; h) Representación de la línea base y la penetración del cordón**

#### **4. Empleo de los datos para modelar de la geometría del cordón de soldadura**

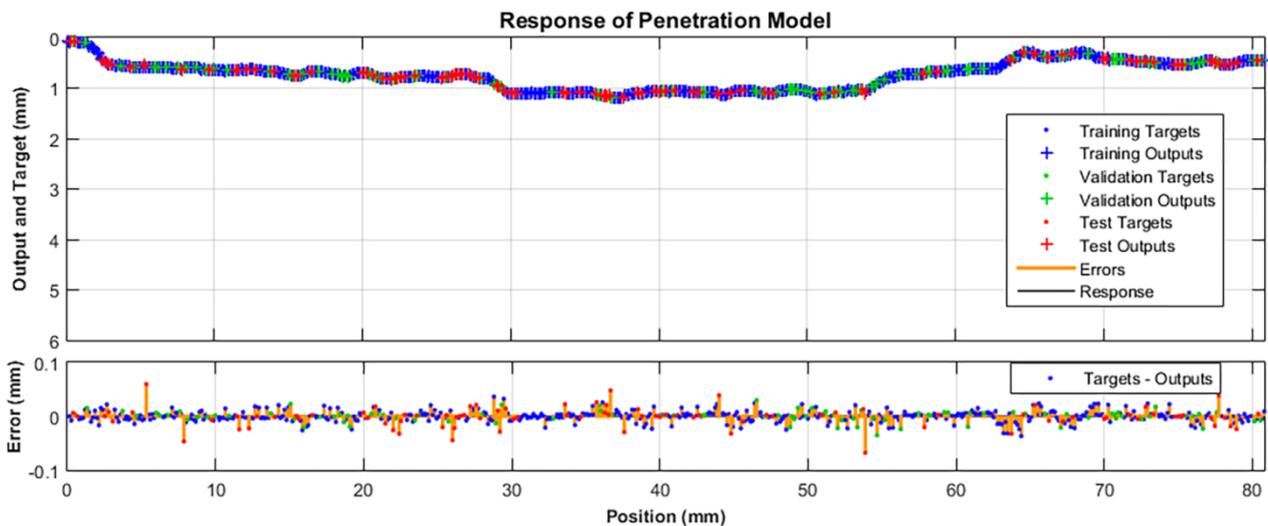
Para modelar la penetración y el ancho del cordón de soldadura, se desarrolló en Matlab un algoritmo que procesa los datos obtenidos anteriormente. Según se explica en [8], el algoritmo se basa en la fusión sensorial de la información obtenida de la imagen termográfica, y las mediciones de corriente y tensión de soldadura. Una red neuronal es entrenada utilizando esta información como entrada. Como función objetivo se utilizan las mediciones de penetración y ancho del cordón. En la Figura 6a se muestran los parámetros calculados a partir de la imagen termográfica obtenida en la posición 49.2 mm, durante un experimento de soldadura GMAW convencional con fuente de tensión constante. En la Figura 6b se observan todas las mediciones y parámetros.



**Figura 6. Mediciones obtenidas en un experimento con fuente GMAW convencional: a) Análisis de la imagen termográfica para un intervalo de muestreo; b) Conjunto de mediciones**

La Figura 7 representa la respuesta del modelo de penetración, apreciándose un ajuste satisfactorio de este a los valores de penetración medidos. Los modelos son utilizados en [7] como estimadores dentro de un lazo de control multivariable de la penetración y el ancho del cordón.

De esta forma, es posible apreciar la utilidad de los algoritmos y herramientas desarrolladas para medir y estimar la geometría del cordón de soldadura.



**Figura 7. Entrenamiento del estimador de la penetración del cordón de soldadura**

## 5. Conclusiones

El desarrollo de sistemas de medición puede ser una tarea compleja si las condiciones del proceso son adversas, como ocurre en las aplicaciones de soldadura por arco eléctrico. Si, además, se requiere un período de muestreo pequeño y del sincronismo entre varios instrumentos de medición, se hace aún más complejo el trabajo, debido a que es difícil garantizar el muestreo en tiempo real de todas las variables.

La solución desarrollada en este trabajo y utilizada en un proceso de soldadura GMAW, emplea una interfaz de adquisición de datos con microcontrolador y comunicación USB, junto a un programa de computador, que garantizan satisfactoriamente este requerimiento para períodos de muestreo entre 5 y 500 ms.

El escáner laser tridimensional de bajo costo, desarrollado para medir la geometría externa del cordón de soldadura utilizando técnicas de triangulación y procesamiento de imágenes, demostró un correcto desempeño en esta función.

La metodología elaborada para medir la penetración del cordón en cortes longitudinales, que utiliza un algoritmo de procesamiento de imágenes, permitió capturar los datos para crear un modelo dinámico de esta variable y presenta un ajuste satisfactorio.

Los sistemas desarrollados no poseen gran complejidad y resaltan por su bajo costo, pudiéndose emplear en actividades docentes y de investigación.

## Referencias bibliográficas

- [1] Scotty A, Ponomarev V. Soldagem MIG-MAG: melhor entendimento, melhor desempenho. Artibler Editora Ltda.; 2008.
- [2] Huang W, Kovacevic R. Development of a real-time laser-based machine vision system to monitor and control welding processes. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2012;63:235–248.
- [3] Shi Y, Zhang G, Ma XJ, et al. Laser-Vision-Based Measurement and Analysis of Weld Pool Oscillation Frequency in GTAW-P. *Weld. J.* 2015;94:176–187.
- [4] Lv N, Zhong J, Wang J, et al. Automatic measuring and processing system of audio sensing for real-time arc height control of pulsed GTAW. *Sens. Rev.* [Internet]. 2014 [cited 2017 Mar 17];34:51–66. Available from: <http://www.emeraldinsight.com/doi/10.1108/SR-02-2013-628>.
- [5] Franco FD. Monitorização e localização de defeitos na soldagem TIG através do

- sensoriamento infravermelho. Master Thesis. Universidad de Brasília; 2008.
- [6] Bestard GA, Alfaro SCA. Propuesta de diseño de un sistema de control de la geometría del cordón en procesos de soldadura orbital. *Rev. Control. Cibernética y Autom.* 2016;4.
  - [7] Bestard GA. Sensor fusion and embedded devices to estimate and control the depth and width of the weld bead in real time. Ph.D. thesis. Universidade de Brasília; 2017.
  - [8] Bestard GA, Sampaio RC, Vargas JAR, et al. Sensor Fusion to Estimate the Depth and Width of the Weld Bead in Real Time in GMAW Processes. *Sensors (Basel)*. 2017;18:151.
  - [9] IMC-Soldagem. Manual de Instruções Inversal 450/600. Florianópolis: IMC-Soldagem; 2005.
  - [10] FLIR-Systems. ThermoVision A40 M Manual del usuario. 2004.
  - [11] Federico B. Problema de ingeniería. Técnicas digitales III. Medición con láser por triangulación. 2011.