



VI Congreso Iberoamericano de Acústica - FIA 2008  
Buenos Aires, 5, 6 y 7 de noviembre de 2008

FIA2008- A019

## **Detección de Defectos en Soldadura Basado en la Acústica Aerotransportada del Proceso MIG / MAG**

Eber Huanca Cayo<sup>(a)</sup>,  
Sadek C. Absi Alfaro.

(a) Universidad de Brasilia, Facultad de Tecnología, Departamento de Ingeniería Mecánica,  
Campus Universitario Darcy Ribeiro – Asa Norte, Brasilia - DF – Brasil, E-mail: eber@unb.br

### **Abstract**

The welding process's sound is a consequence of the modulation in amplitude of the current for the voltage of the electric arc. Lasted experiments demonstrated that the experienced welder has an absolute dependence of the acoustics in the control of the welding process; a power spectra analysis from the sound signal confirms the existence of an component of dominant frequency, however it presents an random behavior due to the stochastic characteristics of its origin; therefore it is not very reliable to evaluate the stability of the process. In this work a technique of detection of welding defects is presented based on the stability of the airborne acoustics of the process MIG/MAG for the transfer for short circuit mode. Statistical parameters of the acoustic pressure were determined and of the level of acoustic pressure for welding without defects from multiple tests; with these results have been development an algorithm of defects detection based on a mobile window that moves through the statistical signals calculated from the acoustics process. Finally a group of test plates within and without defects were tested; the algorithm based on the airborne acoustics of the developed process, showed satisfactory results for the detection of defects

### **Resumen**

El sonido del proceso de soldadura es una consecuencia de la modulación en amplitud de la corriente por la tensión del arco. Experimentaciones pasadas demostraron que el soldador experimentado tiene una dependencia absoluta de la acústica en el control del proceso de soldadura; un análisis espectral del sonido confirmo la existencia de una componente de frecuencia dominante, sin embargo ella presenta un comportamiento aleatorio debido a las características estocásticas de su origen; por tanto resulta poco confiable para evaluar la estabilidad del proceso. En este trabajo se presenta una técnica de detección de defectos de soldadura basada en la estabilidad de la acústica aerotransportada del proceso MIG/MAG para el modo de transferencia por cortocircuito. Se determinaron parámetros estadísticos de la presión acústica y del nivel de presión acústica para soldaduras sin defectos a partir múltiples ensayos; con estos resultados de desarrollo un algoritmo de detección de defectos basado en una ventana móvil que se desplaza a través de las señales estadísticas calculadas a partir de la acústica del proceso. Finalmente un conjunto de cuerpos de prueba con y sin defectos fueron sometidos a ensayo; el algoritmo basado en la acústica aerotransportada del proceso desarrollado, mostró resultados satisfactorios para la detección de defectos.

## 1 Introducción

En el final de la década de los años 70's se logro medir el voltaje del arco eléctrico mediante métodos acústicos [1], [2]; en ese trabajo se destacó la potencialidad de este método para el monitoreo de procesos de soldadura. Uno de los procesos de soldadura que actualmente es utilizado en la industria de la construcción metálica es la soldadura de arco con protección gaseosa, (Gas metal arc welding – GMAW), este proceso de soldadura también es conocido como MIG/MAG. Sus principales ventajas son la alta tasa de transferencia metálica, elevada penetración y facilidad de soldar en todas las posiciones. Cuando el uso de este proceso de soldadura creció a escalas industriales, las exigencias y requerimientos de calidad de la soldadura en el mercado también fueron multiplicándose. La calidad de la soldadura actualmente es tema de múltiples investigaciones y discusiones, ya que su calificación envuelve diversos criterios de carácter subjetivo y que deben cumplir con las exigencias geométricas y estructurales suficientes para ser catalogadas como de buena calidad. Para lograr estos requerimientos, se tiene que mantener una continuidad en la estabilidad del proceso; esto sucede cuando el flujo de calor y masa de la punta del electrodo consumible hasta la poza de fusión a través del arco mantiene uniformidad en la transferencia; cualquier discontinuidad y/o trastorno en la transferencia originara un defecto en la soldadura. Adolfson, 1999 determino que la máxima estabilidad de un proceso de soldadura se produce cuando se tiene un máximo número de cortocircuitos en la transferencia, la desviación estándar de los periodos de cortocircuitos es mínima e se produce un mínimo nivel de salpicaduras. El arco eléctrico del proceso de soldadura, genera entre otros fenómenos físicos, la emisión de temperatura, emisión de campos electromagnéticos, emisión de luminosidad y emisión de presión acústica. Es conocido que los soldadores especializados usan una combinación visual y acústica para el monitoreo y control del proceso de soldadura [4]. Hasta el momento fueron propuestos algunos sistemas experimentales de monitoreo acústico para el proceso MIG/MAG y éstos aun no fueron implementados comercialmente. Mansor [5], propuso un método de identificación de modos de transferencia basada en el análisis en el dominio del tiempo. Tam [6], investigó la caracterización acústica del proceso MIG/MAG, empleando el método Taguchi y análisis psico – acústico; [7] estudios de factibilidad de la señal acústica para el monitoreo del proceso MIG/MAG; identificación de modos de transferencia mediante el análisis de señales acústicas en el dominio de la frecuencia [8]; medición de la calidad a partir del monitoreo acústico [9]; monitoreo on-line del proceso MIG/MAG mediante señales audibles [10]; evaluación de la estabilidad del proceso MIG/MAG en el modo de transferencia por cortocircuito [11]; identificación de modos de transferencia a partir del SPL del arco [12]. En estos trabajos se destacan las ventajas del monitoreo acústico por necesitar tener conexiones físicas al proceso, ya que es de naturaleza no invasiva; también concluyen que el sonido del proceso es una útil herramienta para la medición de la estabilidad del proceso de soldadura MIG/MAG. Cayo [11] concluyo que el uso del nivel de presión de sonido (que en adelante será citado como SPL (del ingles Sound Pressure Level) es una herramienta factible para la evaluación de la estabilidad del proceso MIG/MAG. La detección de inestabilidades en el proceso a partir del comportamiento acústico, permitiría detectar defectos en cordones de soldadura. Un sistema acústico de detección de defectos en soldadura, evitaría las inspecciones y ensayos no destructivos posteriores a la ejecución de la obra para identificación de defectos en las soldaduras de las piezas unidas. La relación entre la tensión y corriente del arco es representada por la ecuación (1) la cual da origen al sonido del arco eléctrico [1], [2]. En 1979 y 1980, Arata [13], [14] hizo mediciones confirmando la estrecha relación entre el SPL y los parámetros eléctricos del arco, él también revelo la influencia del sonido en la posa de fusión. Además de ello descubrió que hay sincronización entre los impulsos acústicos y los cortocircuitos de la transferencia. [15] también confirmó esta

sincronización junto con un retardo producido por la naturaleza aerotransportada del sonido. El equivalente continuo de SPL,  $Leq$  en función de la señal acústica en el tiempo que esta descrita por (2).

$$S_a(t) = \frac{d(k.V(t).I(t))}{dt} \tag{1}$$

$$L_{eq} = 20.Log \left[ \sqrt{\frac{1}{\Delta t} \int_{t_0}^{t_0+\Delta t} \left( \frac{S_a(t)}{50E-3} \right)^2 dt} / p_o \right] \tag{2}$$

- Donde:
- $Sa(t)$  - Señal de sonido (V),
  - $V(t)$  - Tensión del arco (V)
  - $I(t)$  - Corriente eléctrica del arco (A)
  - $k$  - Factor geométrico
  - $Leq$  - SPL (dB)
  - $Po$  - Referencia estándar de presión de sonido (20 uPa)
  - $t_0$  - Tiempo de inicio de integración (s)
  - $\Delta t$  - Intervalo de tiempo de integración (s)

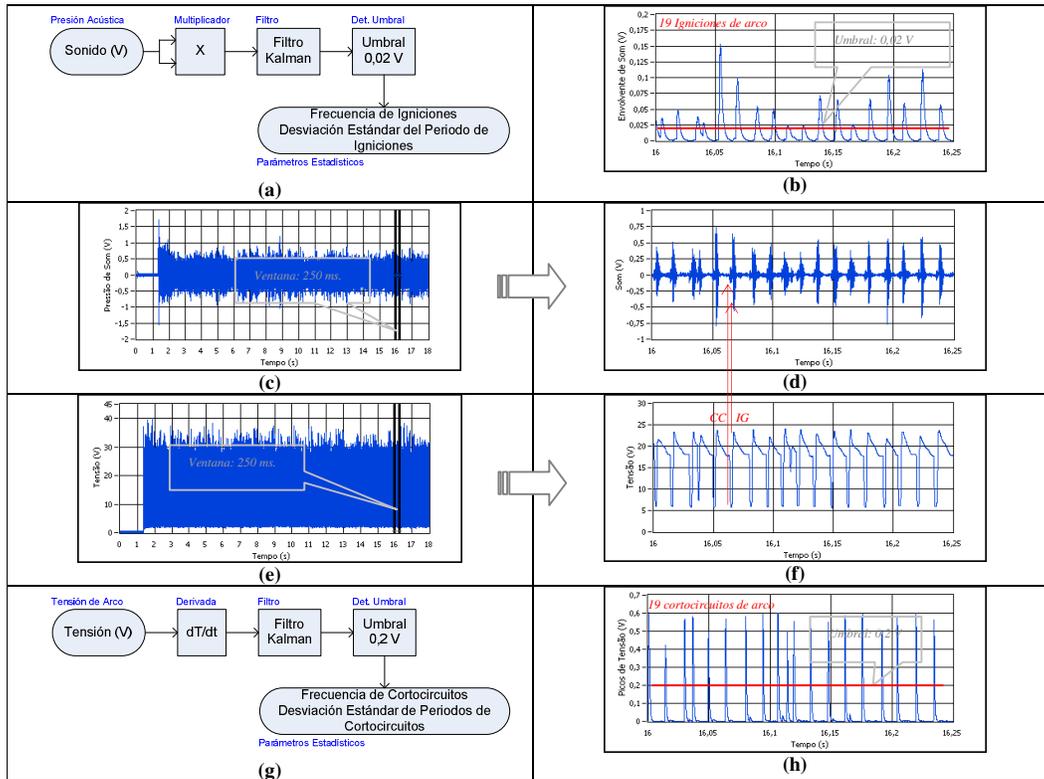


Figura. 1. Hardware y Equipos usados en la Experimentación

El modo de transferencia por cortocircuito en el proceso de soldadura se produce cuando se tiene una secuencia de cortocircuitos e igniciones del arco de soldadura. Estos fenómenos se ven reflejados en la acústica del arco expresada por la ecuación 1. Debido a esto es posible calcular el numero de cortocircuitos e igniciones del arco a partir de la acústica del arco [12] , [17]. En la figura 1(c) y (e) se presentan las señales de presión de sonido y tensión

de arco respectivamente. En las figuras 1(d) y (f) se presenta una ventana de 250 ms. de las señales descritas anteriormente, en ellas es posible notar como se reproduce en el sonido los cortocircuito e igniciones del arco eléctrico. Un cortocircuito en el arco se reproduce en el sonido como un pulso de pequeña amplitud, mientras que una ignición se reproduce en el sonido como un impulso de gran amplitud. Debido al ruido ambiental a veces es poco notorio el impulso acústico que reproduce el cortocircuito. Sin embargo el cortocircuito y la ignición del arco son dos fenómenos que siempre ocurrirán uno después del otro, por tanto es posible medir la frecuencia de igniciones y la periodicidad de estos a partir de los impulsos acústicos producidos por el arco eléctrico. Para el cálculo del número de igniciones a partir de la acústica del arco, se siguió el modelo mostrado en la figura 1(a), que consiste en un detector de envolvente cuadrático optimizado con un filtro de kalman. En la figura 1(b) se muestra la envolvente de la señal acústica, donde cada impulso representa una ignición del arco. Para el cálculo del número de cortocircuitos a partir de la tensión del arco se usó una combinación de un derivado y filtro kalman (ver Fig.1 (g)). Cada impulso de la grafica mostrada en la figura 1(h) representa un cortocircuito. Para ambos casos (igniciones y cortocircuitos) se establecieron umbrales de detección para el conteo de pulsos por cada ventana; para el caso de la ventana de 250 ms. se puede notar que se detectaron 19 igniciones acústicamente medidas (ver fig. 1(b)) y también se detectaron 19 cortocircuitos a partir de la tensión del arco (ver fig. 1(h)) confirmando la estrecha relación de las señales eléctricas y acústicas del proceso de soldadura.

## 2 Procedimiento Experimental

### 2.1 Consideraciones Generales

La señales de tensión del arco y presión del sonido del proceso fueron muestreadas con una frecuencia de 20 kHz. Estudios en psico-acústica determinaron que mientras la señal de sonido del proceso MIG/MAG no supere los 400 ms de retardo, este será un buen indicador del comportamiento del proceso [6]. En diversos trabajos de monitoreo acústico de soldadura, cada autor ubicó el micrófono a distintas distancias de la poza de fusión; 85 mm [2], 1 m [15], 200 mm [16], 35 mm [10]. En este trabajo el micrófono se ubico a 150 mm de la poza de fusión y un ángulo de inclinación de 45°. (ver Fig. 2-a), para esta ubicación se tomo en cuenta la protección del micrófono contra las salpicaduras de la soldadura y la radiación térmica en exceso que pueda alterar la estabilidad, repetitividad y tiempo de respuesta del micrófono.

### 2.2 Instrumental y Materiales

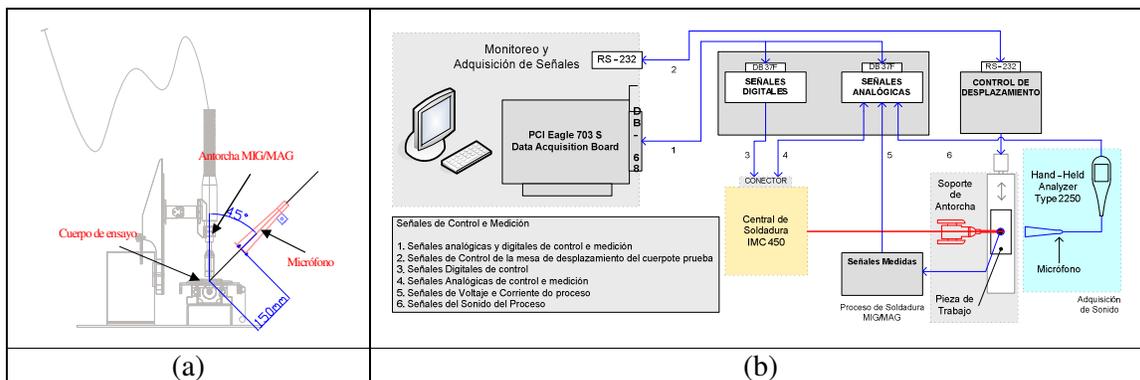


Figura. 2. Hardware y Equipos usados en la Experimentación

Para la adquisición y procesamiento de señales de tensión de arco y presión de sonido del arco, se usó el software de instrumentación virtual LabVIEW 8.2 y la tarjeta de adquisición de datos PCI Eagle 703S siguiendo la distribución mostrada en la figura 2 (b). Para la medición de sonido se usó la salida analógica del decibelímetro Brüel & Kjær - Type 2250 que usa el micrófono 4189 con una sensibilidad de  $-26 \text{ dB} \pm 1.5 \text{ dB}$ ,  $50 \text{ mV/Pa}$ .

### 2.3 Ensayos de Soldadura

Los ensayos fueron realizados con alambre electrodo AWS A5.18 ER70S-6 de 1 mm de diámetro. Los cuerpos de ensayos fueron chapas de acero AISI 1020 de 6.50 mm. El gas de protección usado fue la mezcla de argón y anhídrido carbónico M21 (ATAL 5A/Ar 82% + CO<sub>2</sub> 18%). En la tabla 1 se muestran los experimentos que se ensayaron. Los experimentos están divididos en cuatro grupos; el primer grupo consiste en ensayos de soldaduras de buena calidad. Los tres siguientes grupos de ensayos consisten en soldaduras con presencia de defectos por ausencia de gas, variación de *Stand off* (también conocido como CTWD) y presencia de suciedad respectivamente. En estos ensayos se adquieren señales de tensión y presión acústica del arco eléctrico.

**Tabla 1.** Parámetros eléctricos para los ensayos realizados

Experimento		Tensión	WFS (m/min)	ST. (mm/s)	CTWD (mm)	Flujo de Gas (l/min)
Proceso Estable		20,0	6	10	12	15
Proceso Inestable	Ausencia de Gas	20,0	6	10	12	15 - 0 - 15
	Variación de CTWD	20,0	6	10	12 - 10	15
	Presencia de Suciedad	20,0	6	10	12	15

CTWD = Distancia entre el contacto del electrodo y el cuerpo de ensayo (Contact Tip to Work Distance)

WFS = velocidad de alimentación del electrodo (Wire Feed Speed)

ST = velocidad de desplazamiento de la antorcha de soldadura (Speed Travel)

### 2.4 Detección de Defectos

Para la detección de defectos se usó la técnica de la ventana móvil. La ventana de análisis es de 250 ms., y se desplaza a lo largo de las señales calculadas a partir de la acústica del arco eléctrico. Como resultado de los ensayos de máxima estabilidad se establecieron los niveles máximos y mínimos de la variación de las señales de SPL, frecuencia de igniciones y desviaciones estándar del SPL y el periodo de igniciones (ver tabla 2).

**Tabla 2.** Niveles Máximos y Mínimo Establecidos

Niveles establecidos	Media Aritmética de SPL (dB)	Desviación Estándar del SPL (dB)	Frecuencia de Igniciones (ign/seg)	Desviación Estándar del período de igniciones
Máximo (Mx)	84,0000	4,0000	14,0000	0,0073
Mínimo (Mn)	78,5000	1,0000	7,5000	0,0025

Estos niveles mostrados fueron determinados a partir de la aplicación de las ecuaciones (2) y (3) para el calculo del SPL medio y el numero medio de igniciones para una ventana de 250 ms. La ecuación (4) se empleo para el calculo de las desviaciones estándar del SPL medio y el periodo de igniciones. La ecuación (5) es usada como la ventana móvil que compara los valores calculados y detecta defectos; toma el valor 1 si estos superan los limites superiores o inferiores establecidos (ver tabla 2) y 0 cuando no presenta defectos. Finalmente la ecuación (6) determina la presencia de defectos por cada ventana analizada, esta ecuación lógica, esta constituida por la función booleana “or” de las cuatro ventanas analizadas. La detección de defecto en alguna de las ventanas, dará como resultado la detección de alguna inestabilidad en la soldadura.

$$\bar{x}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_j = \frac{1}{n} (x_1 + \dots + x_n) \tag{3}$$

$$S_i = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (x_j - \bar{x}_i)^2} \tag{4}$$

$$W_i = \begin{cases} 1, & \text{si } (V_{i=1}^k > Mx) \text{ or } (V_{i=1}^k < Mn) \\ 0, & \text{si } (Mn \leq V_{i=1}^k \leq Mx) \end{cases} \tag{5}$$

$$d_f = \begin{cases} 1, & \text{si } W_{SPL} \parallel W_{dsSPL} \parallel W_{IGN} \parallel W_{dsIGN} \\ 0, & \end{cases} \tag{6}$$

- Donde:
- $\bar{x}_i$  : -Media Aritmética de la i-esima ventana de Analisis
  - $S_i$  : -Desviación Estándar de la i-ésima ventana de Análisis
  - $n$  : -Numero de Datos Componentes de la ventana de Análisis
  - $x_j$  : -j-esimo Dato Componente de la ventana de Análisis
  - $W_i$  : -Test  $i$  de comparación
  - $V_i^k$  : -i-esima ventana de dato medio comparado con la referencia k
  - $Mx$  : -Máximo valor de referencia de estabilidad establecido
  - $Mn$  : -Mínimo valor de referencia de estabilidad establecido
  - $d_f$  : -f-esima ventana con datos defectuosos

### 3 Análisis y Discusión de Resultados

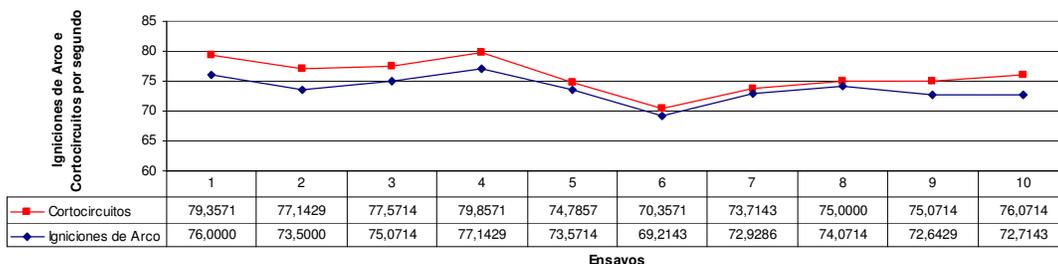


Figura. 3. Cortocircuito e Igniciones de arco para condiciones de máxima estabilidad

En la figura 3 se muestra los resultados obtenidos en el primer grupo de ensayos de la tabla 1, en el podemos notar el numero de cortocircuitos calculados a partir de la tensión de arco y el numero de igniciones de arco calculadas a partir de la presión acústica aerotransportada. En esta grafica podemos notar la estrecha similitud entre ambos resultados, lo que nos garantiza que el sonido del arco es un buen indicador de la actividad del proceso de soldadura GMAW.

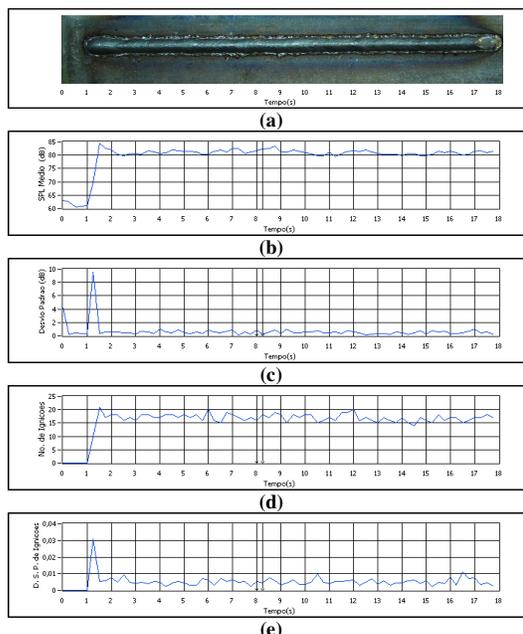


Figura. 4. Soldadura sin Defectos

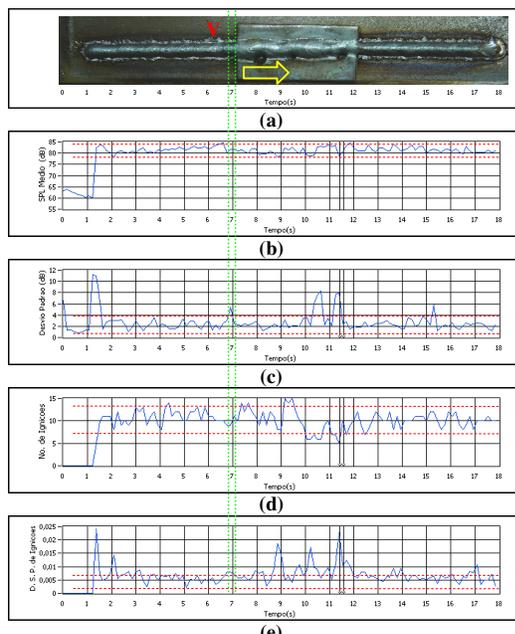


Figura. 5. Defecto por Ausencia de Gas de Protección

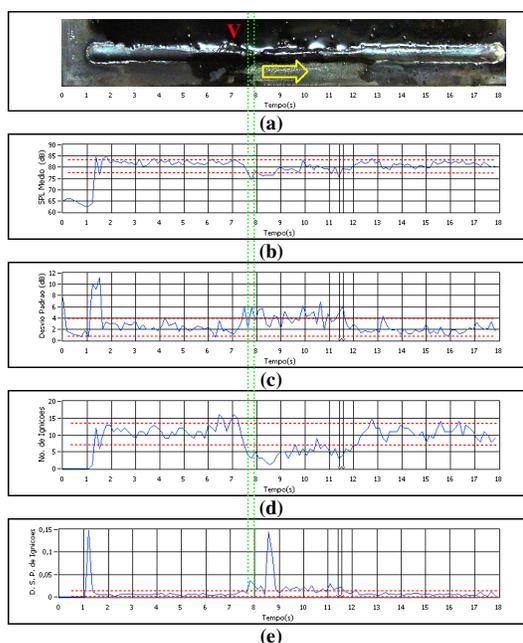


Figura. 6. Defecto por presencia de Grasa

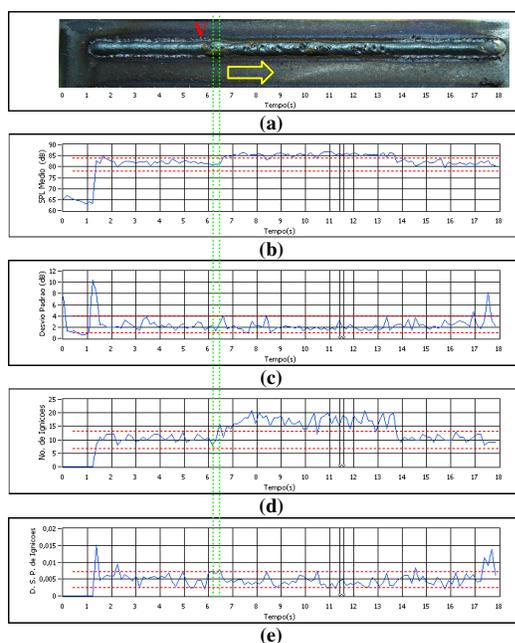


Figura. 7. Defecto en de variación de CTWD

En la figura 4(a) se muestra una soldadura con máxima estabilidad; en las figuras 4 b-e, se muestra el comportamiento del SPL calculado a partir de la ecuación 2, el desvío estándar del SPL, el número de igniciones para una ventana de análisis de 250 ms., y la desviación estándar de los periodos de igniciones. A partir de estas señales y múltiples ensayos, se determinaron los valores medios que servirán de referencia aceptable para la detección de defectos. En las figuras 5, 6 y 7, se muestran ensayos de simulación de defectos por variación de *stand off*, presencia de grasa sobre los metales y ausencia de gas respectivamente. En estas figuras también podemos la presencia de los niveles máximos y mínimos establecidos para cada señal (línea punteada) así como la ventana móvil V. esta ventana de análisis es de 250 ms. se desplaza a lo largo de las señales calculada a partir de la acústica del arco eléctrico. Detectando defectos a partir de las ecuaciones (5) y (6). Esto es posible de notar en las figura 6(d) y 7(d) (frecuencia de igniciones) así como en la figura 5(c) y (e) (desviaciones estándar de SPL y periodos de igniciones). Estas variaciones atípicas permiten detectar defectos originados por la inestabilidad del arco y detectadas a partir de la acústica del arco. Se realizaron ensayos finales con los parámetros establecidos en la tabla 1 para soldaduras estable e inestables en un número total de 40 ensayos, 10 por cada grupo (soldaduras estables, soldaduras simulando variación de *stand off*, presencia de grasa y ausencia de gas de protección). En estos ensayos finales se pudo detectar la totalidad de las soldaduras defectuosas originadas por la presencia de grasa y ausencia de gas. En los defectos generados por la variación de *stand off*, solo pudieron ser detectadas 5 ensayos como defectuosos. Dentro de los 10 ensayos correspondientes a soldaduras sin presencia de defectos, todas fueron evaluadas correctamente.

#### 4 Conclusiones

El uso de la acústica del arco de soldadura, es una herramienta factible para la evaluación de la estabilidad del proceso MIG/MAG; desde el hecho que las inestabilidades del proceso se ven reflejadas en la presión acústica emitida.

El algoritmo desarrollado, presenta mejores resultados ante inestabilidades producidas por fallas originadas por la ausencia de gas y presencia de suciedad sobre los cuerpos de prueba en comparación a los defectos originados por la variación del *stand Off*.

Las inestabilidades generadas por la variación de *stand off* no presentan grandes variaciones o por lo menos variaciones perceptibles en el SPL y la frecuencia de igniciones, esto se debe a que la inestabilidad se produce solo en el momento de la variación del *stand off*, luego de ello el arco eléctrico se estabiliza para el nuevo *stand off* y por tanto las emisiones acústicas permanecen estables. Sin embargo este tipo de defectos presentan variaciones notorias en la desviación estándar del SPL y la periodicidad de igniciones únicamente durante la variación del *stand off*. Los defectos originados por la presencia de grasa se caracterizan por la abrupta reducción de la frecuencia de igniciones así como la desviación estándar de la periodicidad de igniciones. Los defectos originados por la ausencia de gas de protección se reflejan en el incremento de la frecuencia de igniciones, no obstante ello los demás parámetros permanecen estables.

La caracterización de cada tipo de defecto abre la posibilidad de poder identificar el tipo de defecto que origina la inestabilidad en el proceso. La identificación en tiempo real del tipo de defecto a partir de la acústica del proceso, podría convertirse en una formidable herramienta de control para el proceso de soldadura MIG/MAG.

## 5 Referencia Bibliográficas

- [1] Michel G. Drouet and Francois Nadeau, Pressure Waves due to Arcing Faults in a Substation, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. (No.5) 1979, PAS-98.
- [2] Michel G. Drouet and Francois Nadeau, 1982, "Acoustic measurement of the arc voltage applicable to arc welding and arc furnaces", J. Phys. E: Sci. Instrum., Vol. 15.
- [3] Kralj, V Biocybernetic investigations of hand movements of human operator in hand welding. IIW/IIS Doc. 212-140-68, 1968
- [4] ADOLFSSON, S. et al. "On-line quality monitoring in short-circuit gas metal arc welding", Welding Journal, p. no2 59s-73s February, 1999.
- [5] A.M. Mansoor & J.P. Huissoon "Acoustic Identification of the GMAW Process", 9th Intl. Conf. on Computer Technology in Welding, , pp312-323 Detroit, USA, Sept. 1999.
- [6] Joseph Tam e Jan Huissoon, "Developing Psycho-Acoustic Experiments in Gas Metal Arc Welding", Proceedings of the IEEE, International Conference on Mechatronics & Automation, Niagara Falls, Canada, July 2005
- [7] Ladislav Grad et al, "Feasibility study of acoustic signals for on-line monitoring in short circuit gas metal arc welding", International Journal of Machine Tools and Manufacture Volume 44, Issue 5, April 2004, Pages 555-561
- [8] Poopat, B. ; Warinsiriruk, E., "Acoustic signal analysis for classification of transfer mode in GMAW by noncontact sensing technique", Songklanakarin Journal of Science and Technology, Vol. 28, Issue 4, pages/rec.No: 829-840, University of Technology Thonburi, Thungkru, Bangmod, 2006, Bangkok, Thailand.
- [9] Cayo E. H. ; Absi Alfaro, S.C. . "Medición de la Calidad en Soldadura Basado en Sensoreamiento Acústico", 8° Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica, 2007, Cusco - Perú. CIBIM8. Lima - Perú : Pontificia Universidad Católica del Perú, 2007. v. 1. p. 1068-1079.
- [10] M. Čudina, J. Prezelj, I. Polojnar, "Use of Audible Sound For On-Line Monitoring of Gas Metal Arc Welding Process", Croatian Metallurgical Society, Metalurgija 47 (2008) 2, 81-85, 2008, Zagreb, Croatia.
- [11] Cayo E. H. ; Absi Alfaro, S.C., Evaluación Acústica de la Estabilidad del Proceso de Soldadura MIG/MAG para el Modo de Transferencia Corto-circuito, 3 ° Congreso Nacional de Ingenierías Mecánica, Eléctrica, Electrónica y Mecatrónica, Universidad Autónoma Metropolitana, 2008, Azcapotzalco-Ciudad de Mexico, Mexico, v. 3, s. 4, pp. 399-405.
- [12] Cayo E. H. ; Absi Alfaro, S.C., Weld Transference Modes Identification Through Sound Pressure Level in GMAW Process, Sixteenth International Scientific Conference on Achievements of Mechanical and Materials Engineering - AMME'2008, June 2008, Gliwice, Poland, p. 1.15, p.73. ISBN 83-89728-47-8, EAN 9788389728470.
- [13] Arata, Y. et al. Investigation of Welding Arc Sound (Report 1) - Effect of Welding Method and Welding Condition on Welding Arc Sound. Reports Japan Welding Research Institute (1979).
- [14] Arata, Y. et al. Investigation of Welding Arc Sound (Report 2) –Evaluation of Hearing Acuity and Some Characteristics of Sound. Reports Japan Welding Research Institute (1980).
- [15] Angel Sánchez Roca et al, "Caracterización del modo de transferencia por cortocircuito en procesos de soldadura GMAW a partir de la señal de emisión acústica generada por el arco", IV Conferencia Científica Internacional de Ingeniería Mecánica –

COMEC, Universidad Central Marta Abreu de Las Villas, Santa Clara, Cuba, Noviembre, 2006.

- [16] E. Warinsiriruk and B. Poopat, "Investigation of Metal Transfer of ER70S-6 Filler metal in MAG-M Welding by Acoustic Signal Detection", The Fourth Thailand Materials Science and Technology Conference, Bangkok, Thailand, April 2006.
- [17] Cayo E. H.; Absi Alfaro, S.C. . "Welding Quality Measurement Based On Acoustic Sensing", COBEM2007, 2007, Brasília. 19th International Congress of Mechanical Engineering. São Paulo : ABCM, 2007. v. 1. p. 2200-2200-11.