

# Comportamiento del tiempo de duración, la frecuencia de los cortocircuitos y la conductividad eléctrica durante el reencendido del arco en la soldadura SMAW (AC) con electrodos E6013

(Behavior of short-circuit frequency and duration time and electrical conductivity on arc turn- on during SMAW (AC) with E6013 electrodes)

Alejandro García Rodríguez<sup>1</sup>, Carlos René Gómez Pérez<sup>1</sup>, Oscar Miguel Rivera Borroto<sup>2</sup>, Jorge Víctor Miguel Oria<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Centro de Investigaciones de Soldadura. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas.

<sup>2</sup> Centro de Estudios Informáticos. Universidad Central de Las Villas.

[alejo2@uclv.edu.cu](mailto:alejo2@uclv.edu.cu), [crene@uclv.edu.cu](mailto:crene@uclv.edu.cu)

## Resumen

*El presente trabajo tiene como objetivo la evaluación del comportamiento del tiempo de duración, la frecuencia de los cortocircuitos y la conductividad durante el reencendido del arco en el proceso de soldadura SMAW (Shielded Metal Arc Welding), con corriente alterna y electrodos E6013. El análisis estadístico no-paramétrico garantiza un procesamiento robusto de los datos, atenuando la influencia de valores atípicos y errores derivados del empleo de aproximaciones a distribuciones continuas conocidas. La mediana y la mediana de la desviación absoluta (MAD), respecto a la mediana de los datos, constituyen los estimadores de localización y dispersión utilizados, respectivamente. El electrodo, en el régimen de 160 A, presenta una mayor estabilidad, en el aporte metálico, dada por el menor valor del MAD promedio del período de cortocircuito (39,36 ms) y de la duración del cortocircuito (1,43 ms), reafirmada con la presencia de una mayor conductividad eléctrica durante el reencendido ( $1766,17 \times 10^{-3} \text{ S} \cdot \text{s}^{-1}$ ).*

**Palabras clave:** SMAW, parámetros eléctricos, análisis estadístico, procesamiento robusto, desempeño, E6013

**Abstract:** *The objective of this work is the valuation of the behavior of short-circuits frequency and duration time and electrical conductivity on arc reigniting in SMAW (Shielded Metal Arc Welding) process with alternate current and E6013 electrodes. The non parametric statistic analysis realize a robust data processing, minimizing the outliers influence and mistakes derivates about employ of approximations to well know continues distributions. The median and the median absolute deviation (MAD) respect to median of the data are the localization and dispersion estimators used, respectively. The electrode at 160 A present a better stability on metal transference supported on the most little value of MAD for the period of transference (39,36 ms), and the MAD of the short-circuit duration (1,43 ms), according with the presence of a major electric conductivity during the arc reigniting ( $1766,17 \times 10^{-3} \text{ S} \cdot \text{s}^{-1}$ ).*

**Key-words:** SMAW, electric parameters, statistical analysis, robust processing, behavior, E6013

## 1. Introducción

Algunos autores [1-8] han publicado sus experiencias en la caracterización operativa de electrodos revestidos en régimen de transferencia metálica por cortocircuito, mediante el empleo de la digitalización del voltaje y la corriente del arco.

El comportamiento de los parámetros eléctricos ha sido descrito esencialmente en el trabajo de Ponomarev [8], determinándose las diferencias fundamentales para los distintos tipos de revestimientos empleados para electrodos revestidos. Especialmente los electrodos rutilicos han sido objeto de estudio en países latinoamericanos [7] para la obtención de información sobre la operatividad de este tipo de electrodo de amplio uso a nivel mundial por su excelente comportamiento eléctrico.

Sin embargo, el procesamiento estadístico de los parámetros

no ha sido expuesto de manera explícita cuando se utilizan dispositivos de alimentación automática forzada [1, 3, 4, 7]. En el caso de nuestra investigación se utiliza un sistema de alimentación por gravedad que no introduce modificaciones en la respuesta propia del electrodo. La evaluación de la respuesta del electrodo bajo este sistema de autoalimentación impone el análisis de las distribuciones de los parámetros para determinar el procedimiento estadístico adecuado.

En la composición química del revestimiento del electrodo rutilico E6013, el óxido de titanio proporciona, mediante el titanio, un elemento de bajo potencial de ionización que garantiza un adecuado proceso encendido y reencendido del arco eléctrico, por lo que es reconocido como un electrodo de alta estabilidad eléctrica, muy útil en el trabajo con corriente alterna [2, 9], lo cual lo hace apropiado para el estudio de la influencia de los materiales del revestimiento en la estabilidad del arco eléctrico en la soldadura. Esencialmente el régimen de transferencia metálica por cortocircuito ocurre cuando se suelda con electrodos revestidos en la mayoría de las aplicaciones, alcanzándose

---

(Recebido em 07/07/2008; Texto Final em 10/12/2008).

las mayores tasas de deposición horaria, y variaciones en los parámetros definidos en las metodologías [1, 8], tales como: duración del cortocircuito, frecuencia de cortocircuito y conductividad eléctrica durante el reencendido del arco. El efecto producido por los diferentes gases componentes de la atmósfera que se forman por la descomposición térmica de los materiales del recubrimiento durante la soldadura, se refleja en las señales de voltaje y corriente del arco, de cuyo procesamiento se extraen los parámetros con determinadas distribuciones probabilísticas, que es necesario analizar y describir utilizando las medidas de tendencia central y dispersión más adecuadas [10].

## 2. Materiales y métodos

En la soldadura con electrodo consumible uno de los principios básicos para mantener constante la longitud del arco radica en garantizar que la velocidad de alimentación del electrodo coincida con la velocidad de fusión del mismo [10, 11]. Con este fin se utiliza un dispositivo de alimentación por gravedad [6, 10, 12-15], que garantiza que las variaciones de la estabilidad del arco dependan exclusivamente de las características propias del electrodo revestido. Además, se utiliza una instalación compuesta por un transformador de soldadura [12], un circuito acondicionador de señales de voltaje y corriente, provenientes de la fuente de potencia en un rango de -5V a +5V, acoplado en su salida a una computadora, donde las señales analógicas son digitalizadas mediante una tarjeta de adquisición de datos PCI-1710, con una frecuencia de muestreo de hasta 100 kHz y un convertidor análogo digital de 12 bits [16], programada para obtener 5000 muestras por segundo en los canales de voltaje y corriente de soldadura durante el tiempo que dura el experimento.

Desde el punto de vista operativo, los electrodos rútilicos son conocidos como los mejores comparados con los celulósicos y los básicos, siendo ampliamente utilizados a nivel mundial [7].

### 2.1. Proceder experimental

Se utilizan electrodos de la clasificación E6013 [9] ( $\varnothing$  4 mm) contenidos en el mismo paquete sellado, certificados para su uso en corriente directa y corriente alterna, en un rango de 120A a 160A. Para variar el régimen de trabajo se opta por una planificación experimental correspondiente a un diseño factorial (Tabla 1) de 3 niveles para el factor independiente "Corriente", con dos réplicas independientes en cada nivel, realizándose posteriormente un análisis estadístico entre y dentro de grupos, según la terminología usada en Diseños de Experimentos tipo One-way analysis of Variante (ANOVA) [17]. Los 9 electrodos se escogen mediante un muestreo aleatorio, sin reposición, sometiéndose todos a un procedimiento de identificación, medida, pesaje e inspección visual, que garantiza que los mismos no presenten defectos, tales como grietas, roturas, excentricidad del revestimiento, así como un peso y dimensiones diferentes a los del electrodo promedio definido por el fabricante.

Tabla 1. Valores de corriente a los que se someten los electrodos en cada uno de los tres ensayos.

Experimento	1	2	3
Corriente de Soldadura (A)	125	140	160

La fuente de corriente alterna impone reiteradas inversiones de polaridad en el arco a un ritmo de 120 veces por segundo, convirtiéndose el electrodo en cátodo y la placa metálica en ánodo y viceversa, imponiéndose diferentes condiciones para la transferencia de calor que afectan la estabilidad térmica del arco [11]. Este efecto hace que se encienda y apague el arco eléctrico en sucesivas oportunidades, siendo idóneo para la evaluación del comportamiento eléctrico del consumible en condiciones de inestabilidad reiteradas.

Se realizaron soldaduras con corriente alterna sobre placas de 200x50x10 mm de acero al carbono CT-3, según las normas Rusas y Ucrainianas "Gostandar". El dispositivo de alimentación y las placas a soldar fueron sucesivamente fijados mediante tornillos a la mesa de trabajo obteniéndose nueve cordones de soldadura en posición plana, tres en cada régimen (Tabla1). La constancia en el coeficiente de forma del cordón y la situación de los frentes de solidificación indican una mayor estabilidad en el régimen de 160 A [12].

La instalación experimental consta de un transformador de soldadura AIRCO 220V AC, una mesa de trabajo, un circuito acondicionador de señales y una tarjeta de adquisición de datos acoplada a una computadora. La corriente, sensada mediante un SHUNT, y el voltaje de soldadura son acondicionados y acoplados mediante un sistema de adquisición de datos Advantech PCLD-8710 de hasta 100 kHz, un convertidor A/D de 12 bits, 16 canales de entrada digital, 16 canales de salida digital, contador y temporizador programable y 2 canales de salida analógica, 16 canales de entrada simple u 8 entradas diferenciales o combinaciones; una frecuencia de muestreo de 100 mil muestras por segundo; tiempo de conversión 8 microsegundos; tensión máxima de entrada,  $\pm 15$  V; impedancia de entrada, 1 millón de Ohms por cada 5 pico Faradios.

Las señales de voltaje y corriente fueron digitalizadas con una frecuencia de 5000 muestras por segundo sin distorsión de frecuencia ni fase y con un error inferior al 2 % en la medición de amplitud.

Se empleó un dispositivo de alimentación por gravedad, que elimina la influencia del sistema de alimentación sobre la respuesta específica del electrodo [12].

### 2.2 Procesamiento Digital de las Señales

Las señales de voltaje y corriente se exploran con el paquete de programas MATLAB 7.0, utilizando las Herramientas de Procesamiento Digital de Señales (PDS) y se procesan mediante la implementación de un programa en el código de programación de MATLAB 7.0 para la detección automática de la frecuencia de cortocircuito, la duración de los mismos y la conductividad durante el reencendido, parámetros que caracterizan el comportamiento de la transferencia metálica y de carga eléctrica. Para la detección de la duración de cada cortocircuito

se requiere el análisis del histograma de frecuencias del voltaje de soldadura, para localizar el valor límite por debajo del cuál se va a considerar que existe un cortocircuito. En este caso se determina gráficamente, que el voltaje umbral puede ser tomado como  $\pm 5$  V, por lo que el algoritmo debe determinar el tiempo en que la señal de voltaje permanece por debajo de este valor para cada cortocircuito. Además, debe anotar el momento en que ocurre la entrada para el cálculo posterior de la frecuencia de cortocircuito, una vez calculado el valor promedio del período de ocurrencia del corto. En el caso de la conductividad del reencendido se detecta el pico y se calcula la conductividad

eléctrica promedio, a partir del voltaje y la corriente de soldadura en este intervalo de tiempo.

### 2.3 Análisis estadístico

Los parámetros tenidos en cuenta fundamentalmente para la soldadura con corriente alterna [1], se dividen en dos grupos (Tabla 2): los que se utilizan para caracterizar la transferencia metálica; y los que se utilizan para caracterizar la transferencia de carga.

Tabla 2. Parámetros de estudio.

Parámetro	Transferencia Metálica	Transferencia de Carga
Duración del Cortocircuito	X	-
Frecuencia de cortocircuito	X	-
Conductividad durante el reencendido	-	X

La compleja naturaleza de los fenómenos involucrados en la soldadura se manifiesta en cada parámetro, a través de distribuciones probabilísticas que difieren considerablemente del modelo de una distribución normal, lo cual ha sido comprobado en cada caso mediante el análisis del grado de abultamiento y la asimetría, unido al método de Shapiro-Wilk [18]. Tanto la no normalidad en la distribución de los puntajes de las muestras como la diferencia estadísticamente significativa entre las varianzas entre grupos invalidan los métodos del ANOVA clásico para realizar el análisis dentro y entre grupos [17].

El análisis de los modelos más parecidos a la distribución empírica en cada caso para, el parámetro “duración del cortocircuito”, según la prueba Kolwomorov-Smirnov, permite utilizar un modelo Log-Normal [10, 12]. No fue posible encontrar similitud estadística entre las distribuciones continuas fundamentales y las distribuciones empíricas en el caso de los otros dos parámetros.

El empleo de un análisis libre de distribución, usando métodos no-paramétricos en la caracterización de las distribuciones empíricas, permite hacer un análisis robusto dentro de grupos mediante la prueba de Kruskal-Wallis [19, 20], partiendo de probar la hipótesis nula de que las medianas de cada distribución son estadísticamente iguales.

Mediante la prueba de la mediana de Mood [21], se puede

probar la hipótesis de que las medianas de las 9 distribuciones son estadísticamente iguales, obteniéndose el valor de la mediana y su intervalo de confianza con una certidumbre del 95%, válido para realizar el análisis entre grupos. Para obtener una medida de dispersión robusta se emplea el estimador MAD (Median Absolute Deviation) [22, 23], (Ecuación 1), que considera la mediana de los valores absolutos de la desviación de los datos respecto a su mediana.

$$\text{MAD} = \text{mediana}(\text{abs}(X - \text{mediana}(X))) \quad (1)$$

#### 2.3.1 Duración del cortocircuito

El resultado de la prueba de medianas de Mood (Tabla 3), permite probar la hipótesis de que las medianas de las 9 distribuciones es la misma, mediante el conteo del número de observaciones en cada muestra hacia cualquier lado de la “grand median”, que en este caso es 26,0. Como el P-value para la prueba de Chi-cuadrado es menor que 0,05, las medianas de las muestras son significativamente diferentes con un nivel de confianza de un 95%, además incluye los intervalos de confianza de cada mediana basado en la estadística de orden de cada muestra.

Tabla 3. Resultados de la Prueba de las medianas de Mood. Total n = 1844, Grand median = 26,0 para la duración del cortocircuito.

Muestra	Tamaño muestra	n ≤	n >	Mediana (conteo)	95,0 % Limite Inferior	95,0 % Limite Superior	Mediana (ms)
12518	109	34	75	37,0	29,76	41,24	7,4
12519	105	26	79	39,0	33,0	50,14	7,8
12520	112	38	74	36,0	31,13	41,87	7,2
14014	250	122	128	27,0	25,0	31,0	5,4
14015	236	113	123	27,5	23,0	32,0	5,5
14016	242	123	119	26,0	24,0	30,0	5,2
16022	279	172	107	23,0	22,0	25,0	4,6
16023	259	163	96	22,0	20,0	25,0	4,4
16033	252	148	104	23,5	21,0	26,0	4,7

Test statistic = 93,9427 P-Value = 0,0

La prueba de Kruskal-Wallis ha sido utilizada para hacer estudios estadísticos dentro de grupos, determinando si las medianas de las muestras tomadas con el mismo valor de corriente son iguales (Tablas 4 y 5). Los datos de las tres columnas son combinados y organizados de menor a mayor. Se calcula el

rango promedio de cada distribución. Como el P-value es mayor o igual que 0,05, puede afirmarse que no existen diferencias significativas entre las medianas de ninguno de los tres grupos muestrales.

Tabla 4. Resultados del análisis dentro de grupos, según la prueba de Kruskal-Wallis (duración del cortocircuito).

Corriente	Experimento	Tamaño muestra	Rango Promedio	Test statistic	P-Value
125 A	12518	109	158,94	1,36543	0,505242
	12519	105	172,34		
	12520	112	159,65		
140 A	14014	250	367,48	0,300368	0,86055
	14015	236	367,55		
	14016	242	358,45		
160 A	16022	279	405,13	1,06014	0,588564
	16023	259	384,87		
	16033	252	395,76		

Tabla 5. Resultado del análisis de dispersión de los datos.

Muestras	12518	12519	12520	14014	14015	14016	16022	16023	16033
MAD	18	20	18	11	12,5	10	7	7	7,5
MAD(ms)	3,6	4	3,6	2,2	2,5	2	1,4	1,4	1,5

Una manera de sustentar el análisis, que permite llegar a conclusiones cualitativas importantes, lo constituye la exploración de las distribuciones de densidad empíricas de las 9 muestras (Figura 1).

### 2.3.2 Frecuencia de Cortocircuito

Para este parámetro se sigue el mismo procedimiento no-paramétrico. Primeramente se aplica la prueba de las medianas

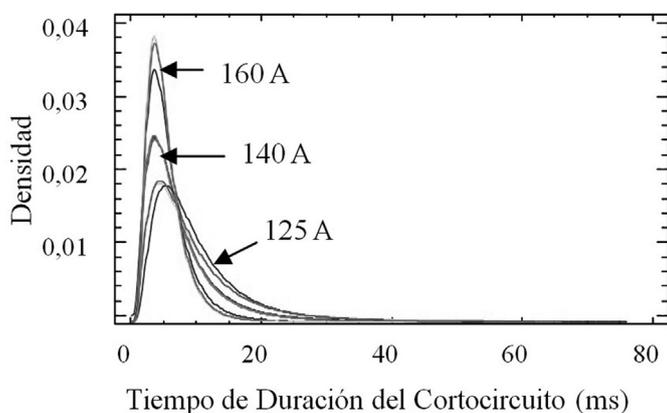


Figura 1. Distribución de densidad de las 9 muestras en los tres distintos niveles de corriente para el parámetro “duración del cortocircuito”[10].

### 2.3.3 Conductividad durante el reencendido del arco

Manteniendo los mismos criterios para la prueba entre grupos, que en los parámetros anteriores, la prueba de Mood

de Mood, que arroja una diferencia significativa entre las medianas de las distribuciones.

Para realizar el análisis dentro de los grupos se utiliza la prueba de Kruskal-Wallis que no detecta diferencias significativas entre las medianas de las distribuciones obtenidas en cada condición de corriente.

La distribución de densidad (Figura 2), permite corroborar cualitativamente los resultados mostrados en las Tablas 6, 7 y 8.

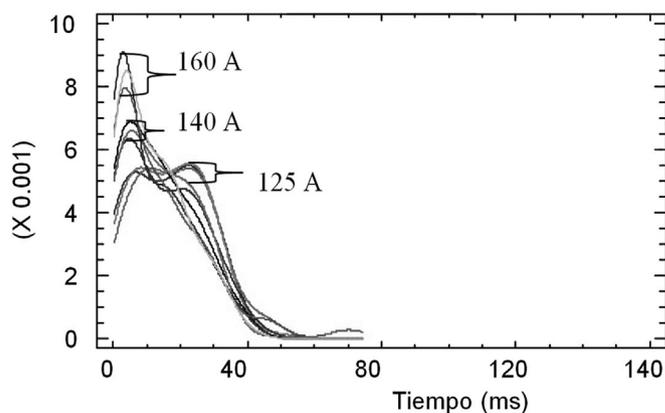


Figura 2. Funciones de distribución de densidad de las distribuciones obtenidas en los 9 experimentos para el parámetro “período de cortocircuito”.

arroja que existen diferencias significativas en las medianas de las distribuciones empíricas de la conductividad durante el reencendido del arco (Tabla 9).

Tabla 6. Resultados de la prueba de las medianas de Mood, Total n = 1824, Grand median = 59,7 para las 9 distribuciones del parámetro “frecuencia de cortocircuito”.

Muestra	Tamaño muestra	$n \leq$	$n >$	Mediana (ms)	95,0 % Límite Inferior(ms)	95,0 % Límite superior(ms)	Frecuencia (Hz)
12518	108	44	64	88,8	57,30	110,76	11,26
12519	104	38	66	85,7	64,4	114,93	11,67
12520	111	43	68	88,2	61,86	112,14	11,34
14014	249	124	125	60,2	49,24	67,0	16,61
14015	235	116	119	61,4	47,17	82,80	16,29
14016	241	119	122	59,8	50,6	76,2	16,72
16022	278	155	123	45,9	33,4	60,2	21,79
16023	258	142	116	52,4	34,4	62,04	19,08
16033	240	131	109	51,7	38,38	63,94	19,34

Test statistic = 25,2727 P-Value = 0,00139743

Tabla 7. Resultados del análisis dentro de grupos, según la prueba de Kruskal-Wallis para el parámetro “frecuencia de cortocircuito”.

Corriente	Experimento	Tamaño muestra	Rango Promedio	Test statistic	P-Value
125 A	12518	108	158,37	0,246176	0,884186
	12519	104	164,04		
	12520	111	163,62		
140 A	14014	249	355,06	0,549869	0,759622
	14015	235	367,86		
	14016	241	366,46		
160 A	16022	278	385,29	0,653211	0,721368
	16023	258	400,23		
	16033	251	397,25		

Tabla 8. Valores del MAD para las 9 distribuciones del parámetro “Período de cortocircuito”.

Muestras	12518	12519	12520	14014	14015	14016	16022	16023	16033
MAD (ms)	48,8	51,4	47,6	46,8	43,4	46,6	38,1	43,2	36,8
Promedios	49,26			45,6			39,36		

Tabla 9. Resultados de la prueba de las medianas de Mood, Total n = 2508; Grand median = 1354,2.

Muestra	Tamaño de la muestra	$n \leq$	$n >$	Mediana (Siemen*10 <sup>-3</sup> )	Límite inferior 95,0 %	Límite superior 95,0 %
12518	247	169	78	1105,3	1050,06	1155,89
12519	200	125	75	1165,1	1069,95	1292,84
12520	248	165	83	1094,0	1031,82	1188,8
14014	366	216	150	1265,5	1189,88	1306,31
14015	389	208	181	1300,0	1223,39	1389,92
14016	332	165	167	1355,5	1277,73	1465,89
16022	237	61	176	1836,7	1646,23	2100,01
16023	233	77	156	1593,6	1500,02	1816,75
16033	256	68	188	1868,2	1664,74	2185,57

Test statistic = 225,764 P-Value = 0,0

El análisis entre grupos se realiza mediante la prueba de Kruskal-Wallis, no detectándose diferencias significativas entre las medianas de las distribuciones de conductividad durante el

reencendido del arco, obtenidas en cada uno de los tres diferentes regímenes de corriente (Tabla 10).

Tabla 10. Resultados del análisis dentro de grupos según la prueba de Kruskal-Wallis.

Corriente	Experimento	Tamaño muestra	Rango Promedio	Test statistic	P-Value
125 A	12518	247	336,86	2,69549	0,259825
	12519	200	367,15		
	12520	248	343,65		
140 A	14014	366	516,23	5,48374	0,0644497
	14015	389	546,23		
	14016	332	571,85		
160 A	16022	237	375,00	2,9751	0,225925
	16023	233	344,17		
	16033	256	370,40		

El análisis de dispersión de los datos se realiza de la misma manera, a partir del estimador MAD.

Del análisis de las distribuciones de densidad para este parámetro (Figura 3), se observa una definición menos evidente de los regímenes de trabajo. Atendiendo al solapamiento de las distribuciones del régimen de 125 y 140 A, existe más definición en el régimen de 160 A, aunque tienen también mayor dispersión, como puede constatare en los datos ofrecidos en la Tabla 11.

Tabla 11. Valores del MAD para el parámetro “conductividad durante el reencendido del arco”.

Muestras	12518	12519	12520	14014	14015	14016	16022	16023	16033
MAD. $10^{-3}(S \cdot s^{-1})^*$	289,41	341,12	281,445	275,735	273,6	386,2	683,5	515	812,4

\* Siemen/seg

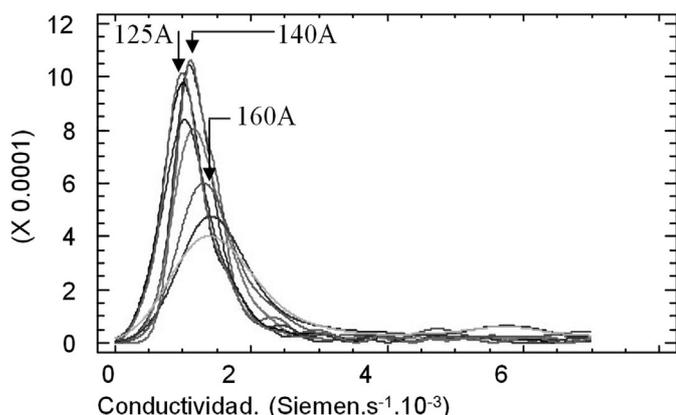


Figura 3. Funciones de distribución de densidad del parámetro “conductividad durante el reencendido” de los conjuntos obtenidos en los 9 experimentos.

### 3. Análisis de resultados

Por las características de las distribuciones estudiadas, es necesario hacer un análisis no paramétrico evitando errores en el ajuste a curvas de modelos conocidos y la influencia de valores atípicos del parámetro, que puedan afectar la verdadera tendencia de la distribución.

Como es conocido [11, 14], el cortocircuito ocurre cuando la mezcla de revestimiento y metal fundidos de la punta del electrodo, pendiente en forma de gota líquida, toca el baño fundido minimizando la longitud de arco y el voltaje en los terminales de la fuente de soldadura, mientras la corriente de soldadura y el campo magnético asociado a su paso por el

electrodo, facilitan el proceso de desprendimiento de la gota. El tiempo de duración del cortocircuito disminuye con el aumento de la magnitud de la corriente (Tabla 3), de acuerdo con lo reportado en la literatura [5,4, 3,11]. La dispersión disminuye con el aumento de la corriente, lo cual puede interpretarse como una mayor estabilidad de la duración del cortocircuito (Tabla 5). La frecuencia de los cortocircuitos, aumenta con el aumento de la corriente de soldadura (Tabla 6), resultado consistente con el hecho de que disminuya el tiempo de duración del cortocircuito (Tabla 3).

Durante la inversión de la polaridad de la corriente alterna, el arco se enfría y se apaga ocasionalmente, necesitando reencenderse en el subsiguiente cambio de polaridad, disminuyendo considerablemente la conductividad del arco y produciéndose un pico de voltaje llamado pico de reencendido [11]. La conductividad durante el reencendido del arco es un parámetro que involucra el comportamiento del voltaje y la corriente de soldadura y es directamente proporcional a la corriente de soldadura e inversamente proporcional al voltaje. Valores mayores de este parámetro sugieren un arco más conductivo y, por tanto, más fácil de reencender, lo cual ayuda a la estabilidad del mismo. Se observa un aumento de la conductividad a medida que aumenta la corriente de soldadura (Tabla 9); sin embargo, la dispersión de este parámetro es mayor en el régimen de 160 A (Tabla 11), lo cual coincide con el aumento de la frecuencia de cortocircuito, que propicia inestabilidad en el reencendido.

Del análisis del comportamiento de la dispersión de la duración del cortocircuito (Tabla 5), se aprecia una mayor estabilidad (1,43 ms) en el régimen de 160 A, al igual que en la dispersión (39,36 ms) del período de cortocircuito (Tabla 8); también se aprecia que los mayores valores de conductividad ( $1766,17 \cdot 10^{-3} S \cdot s^{-1}$ )

ocurren en este régimen (Tabla 9). Estos criterios evidencian una mayor estabilidad en el régimen de 160 A.

El análisis dentro de grupos, aplicando el método de Kruskal-Wallis, para los tres parámetros, no aportó diferencias significativas entre las medianas de los parámetros obtenidos en cada nivel de corriente (Tablas 4, 7, 10), lo cual es coherente con el análisis gráfico de las distribuciones empíricas de densidad (Figuras 1, 2, 3) y las dispersiones (Tablas 5, 8, 11). Este resultado permite dar un criterio positivo sobre la repetitividad de los resultados.

El análisis entre grupos, basado en el análisis del comportamiento de las distribuciones de densidad empírica en los distintos regímenes de trabajo y las estimaciones de las medianas y su desviación absoluta respecto a la misma, permite observar una adecuada reproducibilidad de los resultados, ya que las distribuciones de densidad mantienen variaciones proporcionales características en los diferentes regímenes de trabajo.

El comportamiento de los parámetros duración del cortocircuito y frecuencia del cortocircuito están relacionados al disminuir la mediana de la duración del cortocircuito con el aumento del régimen de corriente (Tabla 3) y, a su vez, la dispersión absoluta de los datos respecto a su mediana disminuye (Tabla 5), mientras que la frecuencia de cortocircuito aumenta (Tabla 6) y su dispersión disminuye (Tabla 8). A medida que la corriente aumenta, disminuye el tiempo en que la gota está en contacto con el metal fundido pues las condiciones para su desprendimiento mejoran; consecuentemente, aumenta la frecuencia con que ocurre la transferencia. Menores dispersiones indican mayor estabilidad en el régimen de 160 A, lo que corrobora los resultados obtenidos mediante análisis metalográfico [12].

Durante la realización de los experimentos se observó un mejor desempeño eléctrico operativo en el régimen de 160 A, apreciándose mayor facilidad en los procesos de cebado y mantenimiento del arco. Los valores de frecuencia de cortocircuitos promedio coinciden con valores reportados, a partir de mediciones hechas por técnicas ópticas [11], durante el desempeño del proceso SMAW a 160 A con electrodos de 4 mm. Los índices de estabilidad reportados por algunos investigadores [1,3,4], según ha sido expuesto [10], utilizan el coeficiente de variación como índice de estabilidad en la transferencia metálica y de carga, se ha demostrado que el empleo de estos índices es solo válido en determinadas relaciones de los valores medios y su desviación estándar. El empleo de la media, como medida de localización, y la desviación estándar, como medida de dispersión, indican el empleo de técnicas paramétricas para la descripción estadística de las distribuciones obtenidas [1,3,4], sin embargo, no aparece descrito el tipo de modelo paramétrico usado para hacer los cálculos.

El espectro de frecuencias del arco se ubica fundamentalmente por debajo de 240 Hz en la soldadura SMAW, según demuestran estudios espectrales mediante la aplicación de la transformada de Fourier a las señales de voltaje y corriente en los experimentos realizados en este estudio. Esto se debe a la inercia del arco eléctrico [11]. Coincidiendo con la literatura [8], el empleo de una frecuencia de 5000 muestras por segundos garantiza una

adecuada medición de los procesos transientes en todas las posibles alteraciones del voltaje y la corriente de soldadura, tanto en amplitud, como en fase y frecuencia.

#### 4. Conclusiones

1. Teniendo en cuenta el significado físico de los parámetros evaluados, en términos estadísticos, existe una adecuada repetitividad y reproducibilidad en los resultados obtenidos del análisis dentro y entre grupos, apreciándose un comportamiento coherente con las condiciones fenomenológicas del proceso.
2. El análisis no paramétrico realizado, permite un procesamiento robusto de los datos, evitando la influencia de valores atípicos y errores derivados del empleo de aproximaciones a distribuciones continuas conocidas.
3. El electrodo E6013 Ø 4mm, en el régimen de 160 A, presenta una mayor estabilidad, manifiesta en la regularidad del aporte metálico, dada por el MAD promedio del período de cortocircuito (39,36 ms) y de la duración del cortocircuito (1,43 ms), reafirmada con la presencia de una mayor conductividad eléctrica durante el reencendido ( $1766,17 \text{ S}\cdot\text{s}^{-1}$ ).

#### 5. Referencias Bibliográficas

- [1] Farias, J. P. Metallic Mg as a coating component in C-Mn-Ni electrode. 1993. p 225. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil.
- [2] Rissone, N. M. R. de, Surian, E. S., Vedia, L. A. Effect of slag variations on ANSI/AWS A5.1-91 E6013 electrode properties: replacement of TiO<sub>2</sub> in electrode coating with MnO, FeO, CaO, MgO, K<sub>2</sub>O, Na<sub>2</sub>O. Science and Technologic of Welding and Joining, 2001. 6(5).
- [3] Rissone, N. M. R. de et al. ANSI/AWS A5.1-91 E6013 Rutile electrodes: The Effect of Calcite. Welding Journal Supplement. p 113-s - 124-s. Julio 2002.
- [4] Souza, M. S. et al. Validación de un sistema computarizado para el control de la calidad de electrodos revestidos, 1995. p 87. Tese (Doutorado). Centro de Ciências Exatas e Tecnologia. Universidade Federal de Uberlândia, Brasil..
- [5] Fedele, R. A., Brandi, S. D. Influência dos parâmetros de soldagem por eletrodo revestido na transferência de elementos químicos. Soldagem & Inspeção, 2002. 7(2).
- [6] Pessoa, E. C. P. Estudo comparativo do Desempenho de Eletrodos Revestidos E6013, E7024 e E7018 em Soldagem Subaquática em Água Doce do Aço A36 à Profundidades de 50 e 100 metros. in Congresso Brasileiro do Engenharia do Fabricação. 2003. Uberlândia. Brasil.
- [7] Farias, J. P., Bálamo, P. S., Surian, E. S. The effect of wollastonite on operational characteristics of AWS E6013 electrodes. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2004. 26(3): p. 17.
- [8] Ponomarev, V., Arc Welding Process Statistical Analysis. Methodical Approaches, Analysis Conceptions, Experiences. 1997.
- [9] ANSI/AWS, Specification for carbon steel electrodes for shielded metal arc welding, Standard 5.1-91,1991, American National Standards Institute/American Welding Society, Miami,

F1.

[10] García Rodríguez, A. G. P. Criterios sobre algunas Metodologías de Caracterización Operativa de Electrodo Revestidos en la Soldadura en Modo de Transferencia Metálica por Cortocircuitos. Soldadura & Inspeção, Abril-Junio 2008.13(2).pag 141-149.

[11] Lancaster, J. F. The Physics of Welding. 2 Ed, 1986. 340 p..

[12] García Rodríguez, A. G. P. Valoración del Desempeño de un Dispositivo de Autoalimentación Diseñado para la Evaluación Operativa de Electrodo Revestidos. Soldagem & Inspeção, Aceptado para publicar 2009.

[13] Cary, H. B. Modern Welding Technology third edition. 1996.

[14] Weman, K. Welding Processes Handbook. 2003, p 189. Woodhead Publishing Ltd Cambridge.

[15] Pessoa, C. P. E. Study of Porosity Location in Fresh Water Wet Welds. in 22ND International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. 2003. Cancun, México.

[16] Roca, A. S. Nuevo criterio para el análisis de estabilidad del proceso de soldadura GMAW, empleando técnicas de Emisión Acústica e Inteligencia Artificial. 2006. p.105. Tese (Doctorado). Facultad Ingeniería Mecánica, Departamento de Tecnología de Construcción de Maquinaria. Universidad de Oriente, Santiago de Cuba.

[17] Guerra, C. W., Barreras, E. M. Estadística. 1ra ed. 2003, p 376. Habana: Félix Varela.

[18] Shapiro, S. S. W. An analysis of variance test for normality (complete samples). Biometrika, 1965. 52 (3 and 4): p. 591-611.

[19] Wallis, W. H. K. Use of ranks in one-criterion variance analysis. Journal of the American Statistical Association, 47 (260) 1952 p. 583-621..

[20] Siegel, S., Castellan, N. J. Nonparametric Statistics for the Behavioral Sciences. 1988, New York: McGraw-Hill.

[21] Mood, A. M. Introduction to the Theory of Statistics. Third Edition ed. 1974: McGraw-Hill. 540-541.

[22] Ripley, B. D. Robust Statistics. 2004, Springer-Verlang. p. 11.

[23] Sachs, L. Applied Statistics: A Handbook of Techniques, ed. Springer-Verlag. 1984. 253.