

Efecto de la corriente y longitud de arco en soldadura por arco eléctrico en CO₂ mediante simulación numérica

José Alfredo Delgado^{a1} , Patricio Méndez² ,
Marco Aurelio Ramírez-Argáez^{b1} 

¹Departamento de Metalurgia, Facultad de Química, Universidad Nacional Autónoma de México; ²Department of Chemical and Materials Engineering, University of Alberta, Edmonton, AB T6G 2V4, Canada.

¹alfredo_231_5@hotmail.com; ¹marco.ramirez@unam.mx

²pmendez@ualberta.ca

DOI <https://doi.org/10.33412/pri.v9.1.2064>



Resumen: Se desarrolló un modelo matemático 2D para un proceso de soldadura por arco eléctrico en CO₂. Se presentan resultados de simulaciones computacionales basadas en los principios de conservación de masa, cantidad de movimiento y leyes de Maxwell, resueltas simultáneamente con la ayuda del software comercial PHOENICS. El modelo predice las propiedades eléctricas de la columna del arco, los patrones de flujo, contornos de temperatura, flujo de calor y potencial eléctrico, al variar la longitud de arco y la corriente aplicada. Al incrementar la corriente, el jet del arco es más intenso, el arco es más caliente y transfiere más calor a la pieza de trabajo, mientras que al incrementar la longitud del arco la temperatura máxima, la velocidad máxima y el flujo de calor no cambian aunque un arco corto focaliza más el calor que un arco largo.

Palabras clave: arco eléctrico, transferencia de calor, flujo de fluidos, modelado matemático.

Title: Effect of current and arc length in electric arc welding in CO₂ by numerical simulation

Abstract: A 2D mathematical model was developed for an arc welding process in CO₂. Computational simulations were performed by using the commercial software PHOENICS based on mass and momentum conservation equations as well as on Maxwell equations. The model predicts the electric characteristics of the arc column, flow patterns, temperature contours, heat flux, total heat flow and the electrical potential, by varying the arc length and current applied. By increasing the current the arc jet is stronger, hotter and provides more heat to the weld pool, while by increasing the arc length the maximum temperature, maximum velocity and heat flow are unchanged, although a short arc focuses

the heat in a small area and a long arc spreads the heat in a wider area of the work piece.

Key Words: electric arc, heat transfer, fluid flow, mathematical modeling.

Tipo de artículo: original

Fecha de recepción: 6 de agosto de 2018

Fecha de aceptación: 17 de octubre de 2018

1. Introducción

Dentro de los procesos alternos de manufactura, la soldadura es uno de los métodos más rápidos, eficaces y económicos para la unión entre metales, y a nivel industrial tiene una importancia enorme, especialmente en sectores como la industria metalmecánica, de autopartes y construcción. Dentro de los diversos procesos de soldadura, la soldadura por arco eléctrico es un proceso complejo que requiere la comprensión de los fenómenos magneto-hidrodinámicos del sistema como la única forma cuantitativa de poder optimizar las diversas variables del proceso que den un desempeño óptimo del proceso de soldadura sin defectos.

Existen numerosos y diversos trabajos de modelado matemático sobre procesos de soldadura con arco eléctrico. El primer intento por describir la física involucrada en los arcos eléctricos fue hecho por Maecker [1] quien fue el primero en explicar la generación del jet de alta intensidad producido por fuerzas electromagnéticas a altas corrientes y derivó expresiones para la máxima velocidad y presión dentro del arco a través de las ecuaciones de Maxwell. Posteriormente, investigaciones realizadas por Lowke y Ludwig [2], Ramakrishnan y Nuon [3] y Allum [4] derivaron expresiones analíticas para relacionar las características del arco como el voltaje, el campo eléctrico, el radio del arco y la velocidad del plasma en función de la longitud del arco, la corriente, la temperatura y la presión del gas. Sin embargo, estas expresiones analíticas simples se obtuvieron despreciando los efectos viscosos y asumiendo arcos isotérmicos, propiedades físicas constantes y forma simple del arco, es decir, son aproximaciones poco apegadas a la naturaleza de un arco.

Con el incremento de las capacidades de cómputo, las soluciones numéricas como herramienta para la descripción de un arco eléctrico de forma realista fueron posibles a través de, Hsu et al. [5], Mckelliget y Szekely [6], y Kim et al. [7] por mencionar algunos. Estos trabajos simulaban arcos eléctricos con argón como gas de cobertura, usando una densidad de corriente en un punto del cátodo, J_c , como el único parámetro ajustable. Estos trabajos reproducen campos de temperatura, corrientes y densidades de flujo de calor en la superficie del ánodo y todos ellos están en buen acuerdo con mediciones experimentales de Néstor, [8] y Hsu et al. [5].

Actualmente y debido a la complejidad matemática del problema, los modelos matemáticos de arcos eléctricos en soldadura se centran en problemas específicos como la fusión del charco de soldadura [9], [10], la influencia del gas o mezclas de gases de cobertura sobre las propiedades del arco [11]-[13], así como fenómenos en las interfaces de los electrodos y el arco [14], [15] entre otros. Este trabajo tiene como objetivo analizar cómo se

ven afectadas las propiedades eléctricas del arco variando la longitud del arco y la corriente del mismo, para lo cual se presentan simulaciones en estado estacionario de arcos eléctricos ardiendo en atmósferas de CO_2 .

2. Modelo matemático

La formulación matemática general de este modelo se puede encontrar en el trabajo de Ramírez et al. [16], aquí se presenta la formulación matemática resumida. Las suposiciones más significativas consideradas en este modelo son: i) se considera que el arco está en el Equilibrio Termodinámico Local (LTE) [17], ii) se supone que la densidad de corriente en el cátodo es constante con un valor de $6.5 \times 10^7 \text{ A/m}^2$ sobre la base de las mediciones experimentales disponibles [6], iii) Se considera que la superficie del ánodo es plana. Esto es ciertamente una simplificación excesiva, ya que la depresión de la piscina de soldadura es un problema muy bien documentado. Las ecuaciones que gobiernan incluyen: i) la ecuación de continuidad, ii) las ecuaciones turbulentas de Navier-Stokes en 2D, iii) la ecuación de conservación de energía que incluye como términos fuente el efecto de calentamiento Joule, el efecto Thompson y las pérdidas de radiación del plasma caliente, iv) las ecuaciones de Maxwell, v) la ley de Ohm y vi) la ecuación de conservación de carga.

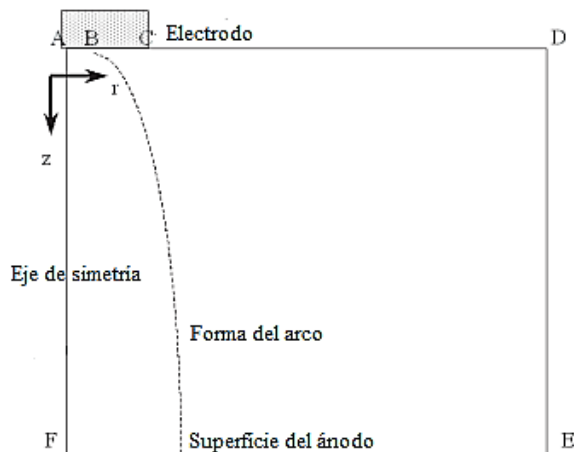


Figura 1. Dominio de cómputo en 2D.

La figura 1 muestra un esquema del dominio computacional (cátodo-arco-ánodo). En cuanto a las condiciones de frontera, la lista completa requerida para todas las variables, también, se puede encontrar en el trabajo de Ramírez et al. [16]. Una parte importante del modelo matemático es la representación de las regiones cercanas a los electrodos (cátodo y ánodo). En esas posiciones se establece la salida de LTE y se necesita cuidado especial para representar el sistema. Para representar la región del cátodo, se supone que la caída de tensión en esa área puede estar relacionada con un término de flujo de calor denominado "caída catódica". En el ánodo, se consideran tres interacciones: flujo de calor del arco al ánodo, flujo de la densidad de corriente que entra en el ánodo y un esfuerzo de cizalla debido al chorro que impacta en el ánodo. En realidad, la presión debida a este choque del chorro de arco (que causa una deformación de la

superficie) se descuida en este estudio. El flujo de calor del arco tiene cuatro contribuciones diferentes: un flujo de calor debido a una caída de voltaje cerca del ánodo llamada "caída del ánodo", condensación de electrones, radiación y convección. Este modelo ha sido validado con éxito contra medidas experimentales de temperatura y velocidad a través de datos encontrados en la literatura tales como los realizados por Néstor [8] y Hsu et al. [5], y los detalles de la validación se pueden encontrar en el trabajo de Ramírez et al. [18].

El modelo matemático anteriormente presentado fue resuelto utilizando la técnica de volumen de control propuesta por Patankar e implementado en el *software* comercial de dinámica de fluidos PHOENICS versión 3.2. Subrutinas de FORTRAN fueron escritas para describir el problema magnético, los términos fuente que aparecen en cada ecuación, así como algunas condiciones de contorno especiales.

Se obtuvieron soluciones convergidas cuando los desbalances de las ecuaciones de conservación en el dominio son inferiores al 1% para todas las ecuaciones de conservación. El número de iteraciones necesarias para lograr la convergencia fue de alrededor de 3000 para un dominio computacional en una malla de 60×60 , y también según las condiciones específicas de los cálculos.

3. Resultados y discusión

Los resultados del arco eléctrico basados en la representación matemática de la región del arco se describen en este capítulo. De igual manera en este capítulo se analiza el efecto de las variables aquí empleadas y las repercusiones que tienen sobre las propiedades físicas y eléctricas del plasma, dentro de las cuales algunas de las más importantes son los patrones de flujo y contornos de temperatura.

3.1 Efecto de la intensidad de corriente

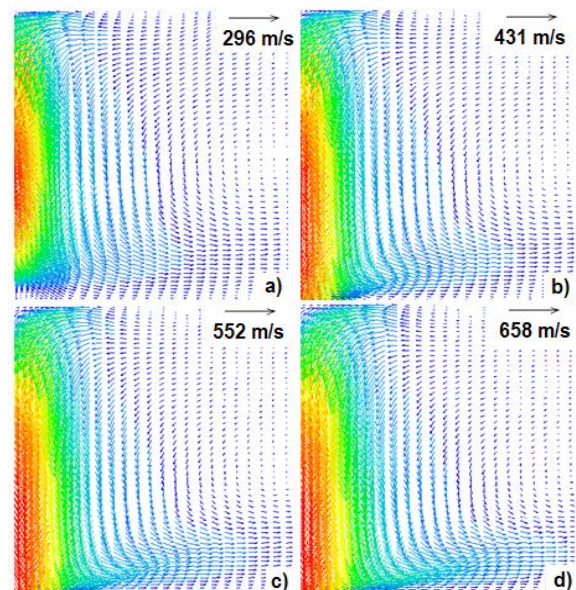


Figura 2. Vectores de velocidad para arcos eléctricos de CO_2 y 5 mm de longitud para a) 100 A, b) 150 A, c) 200 A y d) 250 A.

En la figura 2 se presentan los patrones de flujo en 2D del chorro de plasma de CO₂ con la misma longitud de arco de 5 mm y variando las corrientes del arco en a) 100 A, b) 150 A, c) 200 A y d) 250 A. Claramente se aprecia que el jet es más intenso (mayores velocidades) al aumentar la corriente del arco. La máxima velocidad del arco se duplica al aumentar la corriente de 100 a 250 A (ver tabla 1). Estos resultados son el producto de una mayor magnitud de las fuerzas de Lorentz que son proporcionales a la densidad de corriente. También se aprecia que el jet de 100 A no choca sobre el ánodo con fuerza a diferencia del de 250 A que llega mucha cantidad de movimiento. Estas consideraciones de la presión del arco se deben tomar en cuenta para correlacionar defectos de la soldadura.

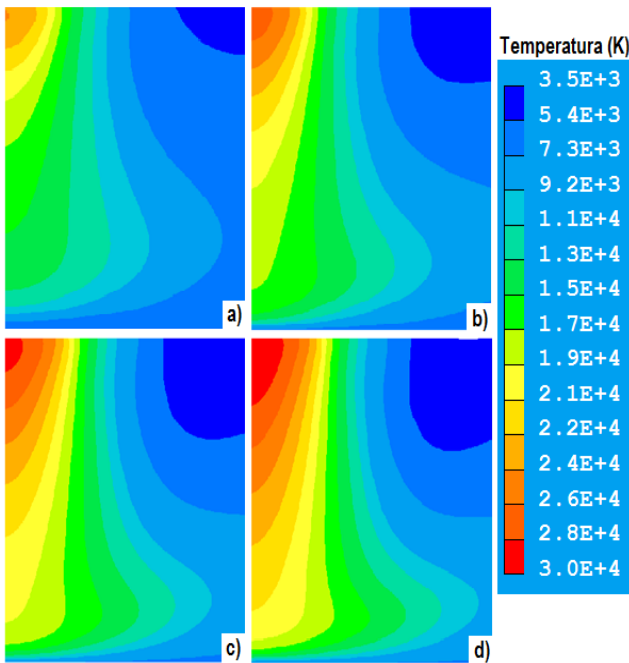


Figura 3. Contornos de Temperatura para arcos eléctricos de CO₂ y 5 mm de longitud para a) 100 A, b) 150 A, c) 200 A y d) 250 A.

En la figura 3 se presentan los contornos de temperatura del arco en 2D del plasma de CO₂ con la misma longitud de arco de 5 mm y variando las corrientes del arco en a) 100 A, b) 150 A, c) 200 A y d) 250 A. El arco está más caliente al aumentar la corriente del arco, y son casi 5500 K el incremento de la máxima temperatura al variar la corriente de 100 a 250 A (ver tabla 1). Esto resulta de un mayor calor Joule y efecto Thompson al aumentar la corriente que calienta más al plasma. También se aprecia que la campana del arco se hace más ancha al aumentar la corriente, lo cual resulta de una mayor convección que trae el jet de plasma. Entonces, un plasma de mayor intensidad de corriente transfiere mayor calor por mecanismos electrónicos, por convección y por radiación que un plasma de baja corriente.

3.2 Efecto de la longitud de arco

En la figura 4 se presentan los patrones de flujo en 2D del jet de plasma de CO₂ con la misma corriente de arco de 200 A y variando las longitudes del arco en a) 3 mm, b) 5 mm, c) 7 mm y

d) 10 mm. La máxima velocidad del arco permanece prácticamente constante al aumentar la longitud del arco de 3 a 10 mm (ver tabla 1). Estos resultados confirman que las fuerzas de Lorentz son las responsables de darle la cantidad de movimiento al jet y como no cambia la corriente, tampoco cambia la fuerza del jet. Sin embargo, la longitud del arco influye en definir la cantidad de movimiento con la que el jet golpea el charco de soldadura, siendo mayor para arcos cortos que para largos y nuevamente, esto se puede asociar a posibles defectos de soldadura.

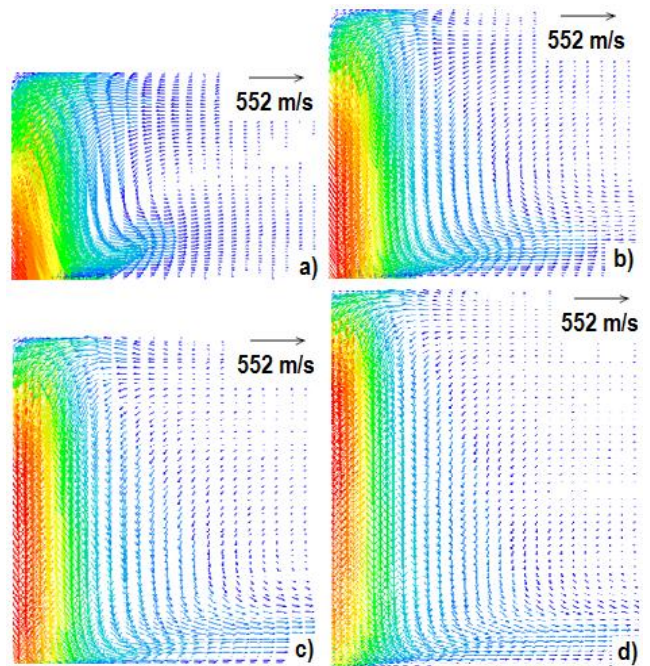


Figura 4. Vectores de velocidad para arcos eléctricos de CO₂ y 200 A de corriente para diferentes longitudes de arco a) 3 mm, b) 5 mm, c) 7 mm y d) 10 mm.

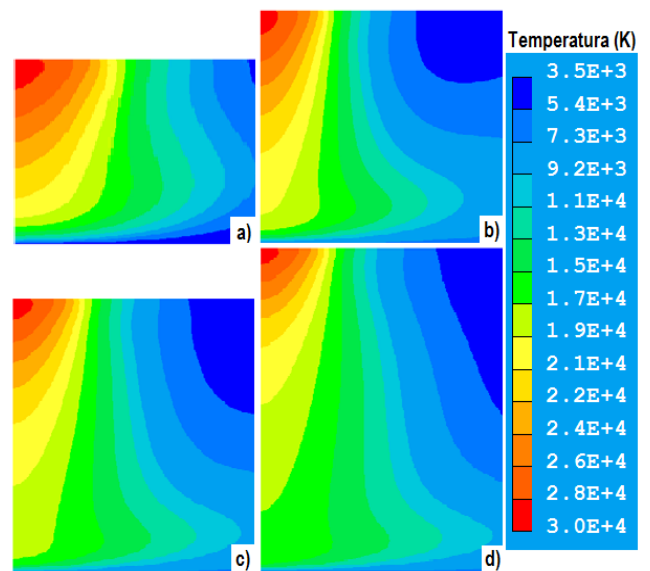


Figura 5. Vectores de velocidad para arcos eléctricos de CO₂ y 200 A de corriente para diferentes longitudes de arco a) 3 mm, b) 5 mm, c) 7 mm y d) 10 mm.

En la figura 5 se presentan los contornos de temperatura del arco en 2D del plasma de CO₂ con la misma corriente del arco de 200 A y variando las longitudes del arco en a) 3 mm, b) 5 mm, c) 7 mm y d) 10 mm. El arco está igualmente caliente al aumentar la longitud del arco y su máxima temperatura es de aproximadamente 28,800 K sin importar la longitud del arco (ver tabla 1). Esto confirma que el calor Joule y el efecto Thompson son los mecanismos responsables de calentar al arco y dependen de la corriente del mismo, por lo que al tener la misma corriente el arco presentan temperaturas máximas casi idénticas.

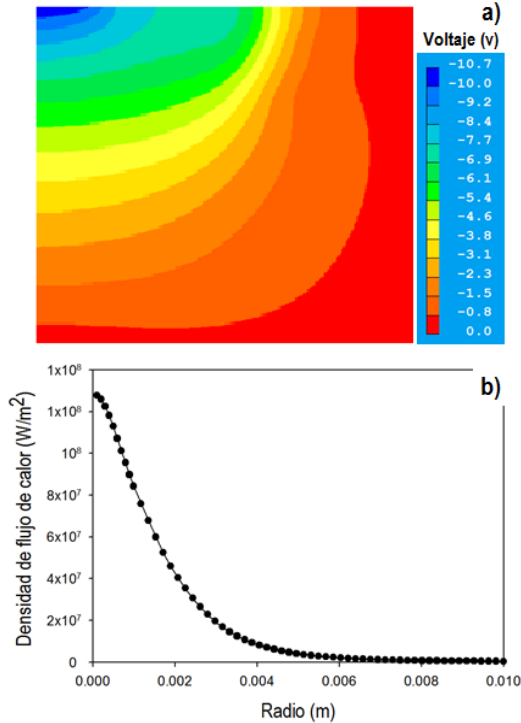


Figura 6. Otras características de un arco de CO₂ a 200 A y longitud de 5 mm, a) voltaje y b) densidad de flujo de calor.

Otras características de los arcos son importantes, tales como el voltaje del arco, y sobre todo la densidad de flujo de calor transferido a la pieza de trabajo. En la figura 6 se presentan a manera de ilustración a) el voltaje en volts y b) la densidad de flujo de calor sobre la pieza de trabajo en W/m² para un arco con corriente de 200 A y 5 mm de longitud. Se aprecia un voltaje de 10.7 V (ver figura 6a), el perfil radial de la densidad de flujo de calor con un máximo en el centro geométrico y un decaimiento parabólico conforme aumenta el radio (ver figura 6b).

La tabla 1 presenta voltajes, temperatura y velocidad máxima, así como la densidad de flujo de calor máxima transferida hacia la pieza de trabajo de cada arco simulado en este trabajo. Ya se ha discutido el efecto de la corriente y longitud de arco sobre velocidades y temperaturas. Respecto a los voltajes, estos aumentan al aumentar tanto la corriente como la longitud de arco. Sin embargo, es la longitud de arco la variable que afecta más el voltaje. Esto se explica por una simple relación óhmica que relaciona al voltaje con la corriente y la resistencia que a su vez depende de la longitud de arco (longitud del conductor) y la

conductividad eléctrica. Se ve que la longitud del conductor es el factor que más influye en el voltaje del arco. Finalmente, la densidad de flujo de calor máxima aumenta con el aumento de la corriente debido al aumento en la temperatura del arco y en el caso del efecto de la longitud del arco se tiene que para arcos cortos, el calor tiene un pico alto en el centro y está focalizado en una pequeña región circular del ánodo, mientras que para arcos largos, el máximo flux de calor es menor pero su distribución es más extendida en el radio, es decir, abarca una mayor área circular. Estos aspectos se deben tomar en cuenta a la hora de realizar una soldadura ajustando la longitud de arco más conveniente.

Tabla 1. Características de los arcos eléctricos reportados en este trabajo

Corriente de arco (A)	Longitud de arco (m)	Velocidad máxima (m/s)	Temperatura máxima (K)	Voltaje máximo (V)	Densidad de flujo de calor máximo (W/m ²)
100	0.005	296	24,462	8.97	4.11e 07
150	0.005	431	27,103	9.82	9.41e 07
200	0.005	552	28,740	10.7	1.27e 08
250	0.005	658	29,911	11.5	1.52e 08
200	0.003	534	28,979	7.16	1.53e 08
200	0.005	552	28,740	10.7	1.27e 08
200	0.007	536	28,814	13.1	1.14e 08
200	0.01	538	28,741	16.1	9.32e 07

4. Conclusión

La corriente del arco produce fuerzas electromagnéticas más intensas que provocan un jet de plasma más intenso (alrededor de dos veces más rápido con corriente de 250 A que con 100 A), un efecto Joule mayor y por ende plasmas más calientes (casi 5500 K más caliente el arco). También aumenta de manera lineal tanto el voltaje como el flujo de calor total hacia la pieza de trabajo.

La longitud del arco no influye ni en las fuerzas electromagnéticas ni en el efecto Joule, por lo que los jets presentan los mismos flujos totales de calor y las mismas temperaturas y velocidades máximas independientemente de la longitud del arco (a corriente constante). También aumenta el voltaje de manera lineal con la longitud de arco. Sin embargo, y aunque el flujo de calor no cambia con la longitud del arco, un arco corto focaliza el calor del arco en un área pequeña del ánodo y también promueve un jet de alta intensidad sobre el ánodo en comparación con un arco largo.

Agradecimiento

A la DGAPA de la UNAM por soporte financiero a través del proyecto PAPIIT IN115617 "Determinación de las características magnetohidrodinámicas de plasmas de soldadura mediante simulación numérica y teorías de escalamiento".

Referencias

- [1] Mäcker, H., Plasmaströmungen in Lichtbögen infolge eigenmagnetischer Kompression. *Zeitschrift für Physik*, 1955. 141(1-2): p. 198-216.
- [2] Lowke, J.J. and H.C. Ludwig, A simple model for high-current arcs stabilized by forced convection. *Journal of Applied Physics*, 1975. 46(8): p. 3352-3360.
- [3] Ramakrishnan, S. and B. Nuon, Prediction of properties of free burning welding arc columns. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 1980. 13(10): p. 1845-1853.
- [4] Allum, C.J., Gas flow in the column of a TIG welding arc. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 1981. 14(6): p. 1041-1059.
- [5] Hsu, K.C., K. Etemadi, and E. Pfender, Study of the free-burning high-intensity argon arc. *Journal of Applied Physics*, 1983. 54(3): p. 1293-1301.
- [6] McKelliget, J. and J. Szekely, Heat transfer and fluid flow in the welding arc. *Metallurgical Transactions A*, 1986. 17(7): p. 1139-1148.
- [7] Kim, W.H., H.G. Fan, and S.J. Na, A mathematical model of gas tungsten arc welding considering the cathode and the free surface of the weld pool. *Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science*, 1997. 28(4): p. 679-686.
- [8] Nestor, O.H., Heat Intensity and Current Density Distributions at the Anode of High Current, Inert Gas Arcs. *Journal of Applied Physics*, 1962. 33(5): p. 1638-1648.
- [9] Mougenot, J., et al., Plasma-weld pool interaction in tungsten inert-gas configuration. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2013. 46(13).
- [10] Wang, X., et al., Investigation of heat transfer and fluid flow in activating TIG welding by numerical modeling. *Applied Thermal Engineering*, 2017. 113: p. 27-35.
- [11] Tanaka, M., et al., Influence of shielding gas composition on arc properties in TIG welding. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2008. 13(3): p. 225-231.
- [12] Ramírez-Argáez, M.A., C. González-Rivera, and G. Trápaga, Mathematical modeling of high intensity electric arcs burning in different atmospheres. *ISIJ International*, 2009. 49(6): p. 796-803.
- [13] Murphy, A.B., et al., A computational investigation of the effectiveness of different shielding gas mixtures for arc welding. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2009. 42(11).
- [14] Heberlein, J., J. Mentel, and E. Pfender, The anode region of electric arcs: A survey. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2010. 43(2).
- [15] Javidi Shirvan, A., I. Choquet, and H. Nilsson, Effect of cathode model on arc attachment for short high-intensity arc on a refractory cathode. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2016. 49(48).
- [16] Ramírez, M.A., G. Trapaga, and J. McKelliget, A comparison between two different numerical formulations of welding arc simulation. *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, 2003. 11(4): p. 675-695.
- [17] Boulos, M.I., P. Fauchats, and E. Pfender, *Thermal plasmas - Fundamentals and applications*. Vol. 1. 1994, New York: Plenum press. 452.
- [18] Ramírez, M., *Mathematical Modeling of D.C. Electric Arc Furnace Operations*. 2000, Ph.D. Thesis, Massachusetts Institute of Technology: Boston, USA.