



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
**FACULTAD DE QUÍMICA**

**Efecto de la corriente y la longitud del arco sobre las  
características del arco en soldadura GTAW**

**TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE**

**INGENIERO QUÍMICO METALÚRGICO**

**PRESENTA**

**JON JESUS VALLE CONTRERAS**



**DIRECTOR DE TESIS**

**RAMÍREZ ARGÁEZ MARCO AURELIO**

**CIUDAD UNIVERSITARIA, CDMX, 2018**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## **JURADO ASIGNADO:**

**PRESIDENTE:** Profesor: GONZÁLEZ RIVERA CARLOS  
**VOCAL:** Profesor: RAMÍREZ ARGÁEZ MARCO AURELIO  
**SECRETARIO:** Profesor: RUIZ TAMAYO AGUSTÍN GERARDO  
**1er. SUPLENTE:** Profesor: DELGADO ÁLVAREZ JOSÉ ALFREDO  
**2° SUPLENTE:** Profesor: GONZÁLEZ GONZÁLEZ DIEGO ENRIQUE

## **SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:**

**FACULTAD DE QUÍMICA, EDIFICIO D**  
**CIRCUITO DE LA INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA S/N**  
**CIUDAD UNIVERSITARIA**  
**COYOACÁN**  
**MÉXICO 04510 CIUDAD DE MÉXICO. 2018**

## **ASESOR DEL TEMA:**

**RAMÍREZ ARGÁEZ MARCO AURELIO**

## **SUPERVISOR TÉCNICO:**

**DELGADO ÁLVAREZ JOSÉ ALFREDO**

## **SUSTENTANTE:**

**JON JESUS VALLE CONTRERAS**

## Agradecimientos

Agradezco al proyecto IN115617 titulado "Determinación de las características magnetohidrodinámicas de plasmas de soldadura mediante simulación numérica y teorías de escalamiento", cuyo responsable técnico es el Dr. Marco Aurelio Ramírez Argáez (director de esta tesis) por el apoyo recibido a través de la licencia del software CFD con el que se realizó este trabajo.

# ÍNDICE

<b>CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>5</b>
1.1 Marco teórico.....	5
1.2 Tipos de soldadura .....	6
1.3 Tipos de corriente para la soldadura .....	9
<b>1.3.1 Fuentes de energía para soldadura .....</b>	<b>10</b>
<b>1.3.2 Generación de calor .....</b>	<b>11</b>
1.4 El arco eléctrico.....	11
1.5 Descripción del sistema a modelar .....	12
1.6 Revisión bibliográfica .....	14
1.7 Hipótesis.....	21
1.8 Objetivo.....	21
<b>CAPÍTULO 2 METODOLOGÍA .....</b>	<b>22</b>
2.1 Suposiciones del modelo .....	22
2.2 Ecuaciones que describen algunas aportaciones físicas mencionadas .....	23
2.3 Ecuaciones Gobernantes.....	23
2.4 Condiciones a la frontera .....	27
2.5 Técnica de solución numérica.....	28
2.6 Diseño experimental.....	31
<b>CAPÍTULO 3: RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>32</b>
3.1 Velocidades en el arco .....	32
3.2 Mapas de temperatura en el arco .....	39
3.3 Presiones del arco .....	46
3.4 Mecanismos de transferencia de calor.....	51
3.5 Variable más significativa.....	55
<b>Conclusiones .....</b>	<b>57</b>
<b>Índice de Anexos .....</b>	<b>59</b>
<b>Índice de Figuras.....</b>	<b>60</b>
<b>Índice de Tablas .....</b>	<b>63</b>
<b>Bibliografía .....</b>	<b>64</b>

# **Efecto de la corriente y la longitud del arco sobre las características del arco en soldadura GTAW**

## **CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN**

### **1.1 Marco teórico**

La industria del acero, solo por mencionar una de las industrias metalúrgicas, ha sido y seguirá siendo de las principales actividades que toman parte en la aportación económica del país. Según la estadística de la CANACERO, México se encuentra en el décimo tercer lugar en producción de acero crudo a nivel mundial, con 18.8 millones de toneladas al corte en el 2016.

Los procesos de manufactura de los metales, entre los cuales hay que colocar las aleaciones de aluminio, por su volumen de producción, incluyen la formación de piezas por fundición o por conformado mecánico. Muchas de estas piezas o componentes deben ser unidos posteriormente a su fabricación; uno de los procesos más utilizados para lograr dicha unión es el de soldadura.

Según la American Welding Society (AWS), la soldadura se define como la coalescencia localizada (la fusión o unión de la estructura de granos de los materiales que se están soldado) de metales o no metales, producida mediante el calentamiento de los materiales, a las temperaturas de soldadura requeridas, con o sin la aplicación de presión y con o sin el uso de material de aportación.

Con el paso del tiempo, se han desarrollado métodos de soldadura, dependiendo de la naturaleza del material a unir bajo diferentes condiciones, tanto de presión como modo de aplicación de calor. [1]

## 1.2 Tipos de soldadura

En las secciones que prosiguen, se presentan algunos tipos de soldadura.

Soldadura Blanda: Se realiza por debajo de los 400°C; el material metálico de aportación más empleado es una aleación de Sn-Pb, que funde aproximadamente a 230°C. Este tipo de soldadura se lleva a cabo cuando se exige una resistencia considerable en la unión, o cuando se tratan de evitar temperaturas excesivas.

Soldadura fuerte: En este método se alcanzan temperaturas de hasta 800°C; se utilizan aleaciones de AgSn o CuZn como material fundente; para cubrir las superficies y eliminar el óxido se emplea bórax, mientras un soplete de gas aporta el calor necesario para la unión.

Soldadura por presión: Es una soldadura en frío, donde la unión entre los metales se produce sin aportación de calor. Puede resultar muy útil en aplicaciones en las que es fundamental no alterar la estructura o las propiedades de los materiales a unir; esta categoría se subdivide en:

- a) Presión en frío o en caliente
- b) Por fricción

Soldadura oxiacetilénica (con gases al soplete): En general, este tipo de soldadura incluye cualquier proceso en el que la fuente de calor es por combustión exotérmica de un combustible gaseoso con oxígeno. El calor aportado en este tipo de soldadura se debe a la reacción de combustión del acetileno, que es fuertemente exotérmica, donde se alcanzan temperaturas del orden de los 3500°C.

Soldadura aluminotérmica: Es comúnmente conocida como soldadura con termita (o TW por sus siglas en inglés Thermit Welding); este proceso usa el calor de reacciones químicas altamente exotérmicas, en donde el calor generado proviene de las reacciones de partículas sólidas para producir la fusión y la unión, o coalescencia, entre dos metales.

Soldadura por arco eléctrico: Es un método con el que se obtiene la unión a bajo costo, aplicable para unir toda clase de materiales, y con el que pueden obtenerse resultados óptimos; además de ser fácil y de rápida utilización [2].

La energía para este tipo de soldadura puede ser obtenida de fuentes eléctricas o electromagnéticas de tres maneras diferentes: (1) por arco eléctrico, (2) por resistencia o la energía transformada por el paso de corriente eléctrica en un conductor con resistencia eléctrica elevada, efecto conocido como calor Joule (calculada por el producto del cuadrado de la corriente eléctrica,  $I$ , por la resistencia,  $R$ , es decir,  $I^2R$ ), y por energía radiante de alta intensidad.

Los procesos de soldadura que emplean un arco eléctrico como fuente de calor se denominan procesos de soldadura de arco. En soldadura, este tipo de fuente de calor se utiliza con mayor frecuencia debido a que el calor de fusión puede ser generado, concentrado y controlado efectivamente. Existen muchas variantes de soldadura de arco eléctrico. En la Tabla 1, se enlistan algunos procesos de soldadura de arco eléctrico empleados usualmente.

*Tabla 1. Ejemplos de procesos de soldadura con arco eléctrico.*

Ejemplos de procesos de soldadura con arco eléctrico con siglas en inglés.	
Atomic hydrogen (arc) welding	AHW
Carbon arc welding	CAW
Electrogas welding	EGW
Electroslag welding	ESW
Flux-cored arc welding	FCAW
Gas metal arc welding	GMAW
Gas tungsten arc welding	GTAW
Magnetically impelled arc butt welding	MIAB
Plasma arc welding	PAW
Shielded metal arc welding	SMAW
Stud arc welding	SW
Submerged arc welding	SAW



La soldadura de arco con gas y electrodo de tungsteno (GTAW por sus siglas en inglés), utiliza un electrodo no consumible de tungsteno para crear el arco a la pieza de trabajo. Este electrodo es cubierto con un gas inerte, como el Argón, Helio (o una mezcla de los dos) con el fin de proteger al electrodo de la degradación.

En vista de que el electrodo es inerte, este aditamento sólo sirve como fuente de electrones. Existen cinco procesos predominantes en la soldadura por arco eléctrico con electrodo no consumible: 1) GTAW, 2) soldadura de arco con plasma (PAW, por sus siglas en inglés), 3) soldadura con arco y carbón (CAW, por sus siglas en inglés), 4) Soldadura de arco de pernos (SW, por sus siglas en inglés), y 5) soldadura por arco magnético (MIAB, por sus siglas en inglés). [3]

El presente trabajo se enfoca en el proceso de soldadura GTAW que la American Welding Society define como “un proceso de soldadura de arco que utiliza el arco eléctrico que salta entre un electrodo de tungsteno (no consumible) y la pieza a soldar, mientras un gas inerte protege el baño de fusión sin la aplicación de presión”.

Los tipos de corriente más utilizados son la corriente continua de polaridad directa, esto es, el electrodo conectado al polo negativo. En la Figura 1 se muestran los tipos de distribución de calor para cada caso de corriente. En algunas aplicaciones concretas se puede utilizar corriente continua con el electrodo de tungsteno conectado al polo positivo. En la Figura 1 DCSP significa corriente directa con polaridad directa que significa que el electrodo de tungsteno es el cátodo y la pieza de trabajo es el ánodo, mientras que DCRP significa corriente directa de polaridad revertida, lo cual implica que el electrodo de tungsteno es el ánodo y la pieza de trabajo es el cátodo. En la Figura 1 también se presenta el caso menos común del uso de corriente alterna (AC).

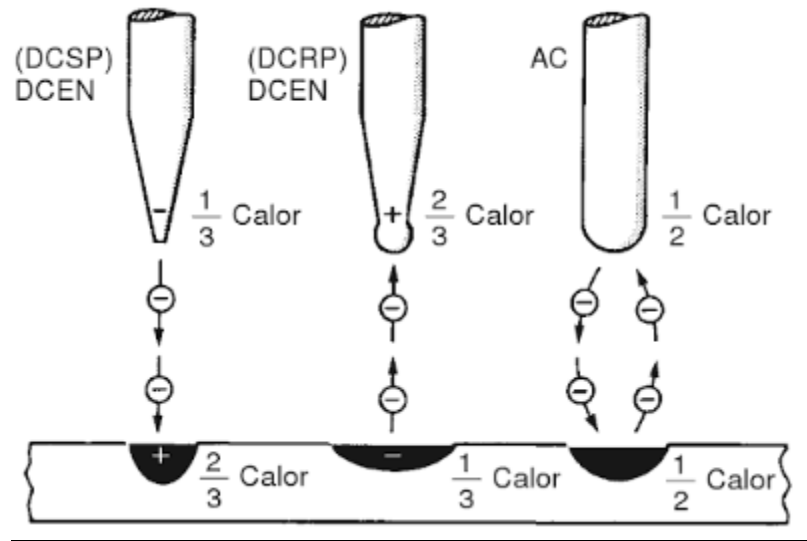


Figura 1. Tipos de distribución de calor dependiendo de los tipos de corriente utilizada.

El tungsteno se utiliza como electrodo debido a su alta temperatura de fusión y a sus características eléctricas. El gas argón es más comúnmente utilizado como gas protector ya que produce muy buena cobertura de la zona de soldadura y es más económico que el helio [4].

### 1.3 Tipos de corriente para la soldadura

En soldadura se pueden utilizar los tres tipos de corriente, cada tipo tiene características únicas que estarán en función de las aplicaciones determinadas; en la Figura 1 se representan las principales diferencias entre las distribuciones de calor según la corriente.

La soldadura por corriente continua se identifica por la polaridad del electrodo. Si éste es negativo, se denomina corriente continua de electrodo negativo (CCEN). Si es positivo, se denomina corriente continua de electrodo positivo (CCEP). El cambio de electrodo de positivo a negativo o viceversa tiene efectos importantes en el proceso de soldadura.

La corriente continua de electrodo negativo concentra alrededor de dos tercios de su calor de soldadura en la pieza y el tercio restante en el tungsteno. Una mayor aportación de calor a la soldadura ocasiona una mayor fusión o una penetración más profunda en el metal base.

### 1.3.1 Fuentes de energía para soldadura

Por definición, la soldadura requiere de aplicación de calor, presión, o ambas para obtener como resultado la coalescencia de los dos metales involucrados en el proceso de unión. En la Tabla 2 se presenta un listado de las diversas fuentes de energía para la soldadura.

*Tabla 2. Lista de varias fuentes de energía fundamentales y específicas para los procesos de soldadura.*

<b>Fuente de energía</b>	<b>Ejemplos de soldadura (siglas en inglés<sup>1</sup>)</b>
Mecánica	
Fricción	FRW, USW
Deformación plástica	
Trabajo en frío	CW, FOW, ROW
Trabajo en caliente	HPW, FOW, ROW, EXW
Química	
Oxicombustibles	OFW, PGW, AHW
Reacciones aluminotérmicas	TW, FOW
Eléctricas	
Arco eléctrico	AHW, CAW, SMAW, FCAW, FCAW, SW, GTAW, PAW, GMAW, SAW, EGW, MIAB.
Resistencia interna (Calentamiento Joule)	RSW, RSEW, PW, PEW, UW, FW, IW, ESW.
Energía de radiación	EBW, LBW, IR welding, imaging arc or arc image welding.
Soldadura por difusión térmica	DFW, DFB

<sup>1</sup> En la sección de anexos se enlistan las siglas de los tipos de soldadura y su nombre en inglés.

### 1.3.2 Generación de calor

En un conductor eléctrico, la cantidad de calor generado depende de tres factores: la corriente aplicada, la resistencia del conductor y el tiempo de flujo de corriente. Estos tres factores afectan el calor generado como se expresa en la siguiente ecuación:

$$Q = I^2 R t \quad (\text{Ec 1})$$

Donde:  $Q$  es el calor generado expresado en Joules,  $I$  es la corriente en Amperes,  $R$  es la resistencia en Ohms y  $t$  es el tiempo de flujo de corriente en segundos. [5]

### 1.4 El arco eléctrico

El arco eléctrico es un conductor eléctrico en estado gaseoso que transforma energía eléctrica en calor. La conducción eléctrica en el gas se genera por emisión termiónica desde el cátodo de tungsteno. Con la emisión termiónica de electrones, se produce la activación térmica y eléctrica de átomos del gas de cobertura a los que se les quitó electrones externos por colisión de los electrones con el gas. En el proceso de colisión entre electrones emitidos con alta energía y moléculas del gas de cobertura se generan iones con carga positiva que generan arcos de plasma, que pueden ser estables o inestables, dependiendo de la fuente de corriente.

Se ha medido la temperatura en el arco eléctrico y normalmente se encuentra en un rango de entre 5 000 y 30 000 K, dependiendo de la naturaleza del plasma y la corriente conducida por éste. En la Tabla 3 se presentan temperaturas encontradas en la literatura para diferentes tipos de gas.

Tabla 3. Temperatura de arcos eléctricos para varios gases. [6]

Gas	Temperaturas (K) del arco eléctrico cercanas al cátodo.
Vapor alcalino	4000
Vapor alcalinotérreo	5000
Vapor de hierro	6000
Argón (200 A)	10,000-15,000

### 1.5 Descripción del sistema a modelar

La Figura 2 es una descripción 2D del sistema que se presenta en la soldadura de arco eléctrico con cátodo de tungsteno y gas argón (GTAW), en la que se muestra una representación de los fenómenos físicos presentes en el proceso GTAW.

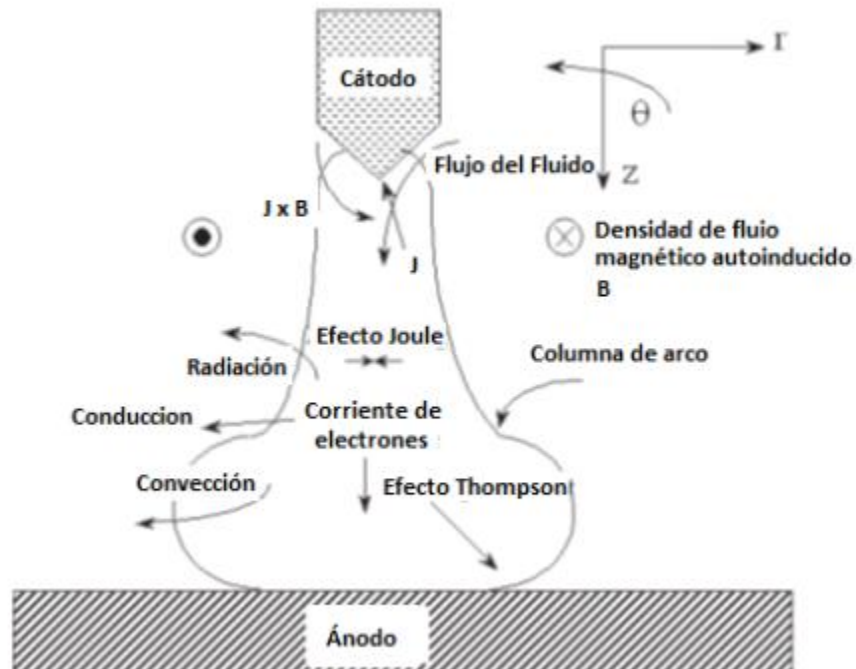


Figura 2. Esquema de una soldadura GTAW con los procesos involucrados en la soldadura.

El fenómeno parte de una diferencia de potencial generada entre el cátodo de tungsteno y la pieza de trabajo (ánodo) tan grande que provoca que el cátodo emita electrones de alta energía; las colisiones entre dichas partículas y las moléculas de gas crean iones que mejoran la conductividad eléctrica de la especie gaseosa.

La corriente generada en el cátodo se focaliza en un pequeño punto con alta densidad de corriente; cuando la corriente se separa de la superficie catódica, la zona de conducción se expande y los vectores que representan la densidad de corriente se distribuyen en un área mayor, provocando bajas densidades de corriente en la columna del arco comparadas con la densidad de corriente presente en el cátodo.

Se genera un campo magnético inducido en dirección azimutal, debido al flujo de la corriente a través del arco. La densidad de corriente interactúa con dicho campo para producir fuerzas de cuerpo electromagnéticas. La corriente tiene dos componentes vectoriales, la que tiene dirección axial presenta mayor predominancia; a su vez las fuerzas magnéticas alineadas en la dirección radial disminuyen de manera directamente proporcional al decremento de la densidad de corriente.

La diferencia de presión provocada por el decremento de las fuerzas electromagnéticas genera una zona de alta presión debajo del cátodo promoviendo el movimiento de gas en dirección al ánodo, dando como resultado un jet de plasma de alta velocidad. Finalmente, cuando el jet entra en contacto con el ánodo, éste desvía el jet formando una expansión del arco sobre la región de la cara anódica determinando así la morfología de “campana” característica de este fenómeno, por su alta temperatura esta campana se ve luminosa.

El paso de corriente a través del arco genera calor por efecto Joule y se alcanzan temperaturas altas, por arriba de los 10,000 K (temperatura significativa del gas Argón para conducir corriente), así como elevados gradientes de temperatura entre los electrodos fríos y la columna del arco caliente. En el balance de energía se deben considerar el transporte de energía por medio de los electrones y radiación, que son mecanismos de transferencia de calor adicionales, estas variaciones abruptas de temperatura significan que las propiedades del arco dependen fuertemente de la temperatura. [7]

## 1.6 Revisión bibliográfica

A lo largo de la historia el estudio de los fenómenos encontrados en un arco eléctrico ha sido objeto de estudio; a continuación se presentará una revisión bibliográfica de algunos artículos que han estudiado y modelado las interacciones de efectos eléctricos, térmicos, magnéticos y dinámica de fluidos en la región del arco en soldadura con arco.

En el primer trabajo [8] se realiza un modelo para estudiar los efectos antes mencionados utilizando condiciones a la frontera, sobre los electrodos, determinadas de manera experimental con la medición del tamaño de la punta del electrodo fundida para una corriente de arco dada.

Se determinó que los arcos de alta densidad están dominados por efectos de dinámica de fluidos inducidos por el arco mismo. La interacción de la corriente del arco con su propio campo magnético se comporta como una bomba electromagnética, que bombea gas de los alrededores, lanzándolo hacia la superficie anódica en forma de un jet de plasma. A medida que el jet de plasma se acerca a la superficie anódica se genera una zona de estancamiento generando redireccionamiento del plasma que da como resultado la distribución característica en forma de campana que presentan los arcos de alta intensidad. En el trabajo referido se presentan soluciones a las ecuaciones de conservación de masa, momentum, corriente y energía acopladas que deben ser resueltas numérica y simultáneamente, dichas ecuaciones se resolvieron para el arco en toda su columna, excepto en las zonas cercanas al ánodo y cátodo. Una de las condiciones de frontera más importantes es la densidad de corriente cercana al cátodo que fue determinada experimentalmente a través de mediciones del tamaño de la punta fundida del cátodo.

Las suposiciones del sistema son: Arco en equilibrio termodinámico local (LTE, por sus siglas en inglés), el arco es rotacionalmente simétrico, ópticamente delgado y presenta flujo laminar, la gravedad y disipación de calor debido a efectos de la viscosidad son despreciables.

Las ecuaciones se resolvieron por diferencias finitas para corrientes de 100, 200 y 300 A y para distancias entre electrodos de 10 y 20 mm. Para un arco ( $I=200$ ,  $d=10\text{mm}$ ) a presión atmosférica obtuvieron un valor máximo de densidad de corriente  $J_{max} = 1.2 \times 10^2 \text{ A/m}^2$ . Se explica que el gas es atraído desde los alrededores hacia el eje del arco por las fuerzas electromagnéticas de bombeo, y se genera el movimiento del jet hacia la superficie del ánodo que cuando choca con éste se desvía en dirección radial. La temperatura máxima es de 21 000 K que se alcanza cerca del cátodo. Se observa también que la velocidad axial incrementa rápidamente cerca de la punta del cátodo, al acercarse al charco de soldadura se genera un estancamiento, que genera un incremento en la presión, y una disminución de la velocidad. La temperatura presenta un rápido aumento frente al cátodo debido al calentamiento óhmico, conforme el arco se distribuye (por el decremento de densidad de corriente) la temperatura cae hasta valores por debajo de 15 000 K cerca del ánodo. Cerca de la punta del cátodo la densidad de corriente es alta, pero disminuye rápidamente con el aumento de la distancia del cátodo.

Los resultados muestran que, con el aumento de la corriente, existe una zona de alta temperatura cerca del cátodo. Se obtuvo un comportamiento inesperado que es el decremento de temperaturas máximas con un aumento en la distancia entre electrodos de 10 a 20 mm.

Es importante mencionar que la punta del cátodo presentaba mayor deterioro con el incremento de corriente y tiempos de operación largos. La modificación de la punta del electrodo afecta directamente la medición, ya que la reproducibilidad es un problema, además de que la geometría está íntimamente ligada a la distribución de densidad de corriente, que a su vez afecta las temperaturas alcanzadas, entre otras variables. [8]

Haciendo suposiciones y buscando generar modelos más cercanos a la realidad se implementaron ciertos criterios, tanto en las condiciones de frontera como algunas otras ecuaciones, que describen de manera más acertada el comportamiento del fenómeno estudiado; como la adición de ecuaciones que permiten calcular los flujos de calor en una de las zonas críticas, como lo es la interacción entre el arco y las superficies de los electrodos.



En otro artículo [9] se utilizaron las ecuaciones de Navier/Stokes, ecuaciones de transporte de energía y de difusión magnética; se realizó un modelo matemático para predecir la distribución de velocidad, temperatura y densidad de corriente en soldadura con gas inerte.

El objetivo del modelo es desarrollar una representación cuantitativa a los fenómenos de flujo de calor y flujo de fluido en soldadura con arco, con especial atención a la interfase entre el arco y las superficies de los electrodos; además de investigar el comportamiento del charco de soldadura.

El trabajo permite una definición de la interacción entre el plasma y el charco de soldadura. Este artículo difiere de los anteriores por la búsqueda del desarrollo de la representación del sistema con el uso de fuentes empíricas.

De igual manera, se usaron las ecuaciones de conservación de masa, momentum y energía, además de las ecuaciones de Maxwell para el campo electromagnético. Se presentan suposiciones similares a las del artículo anterior: el arco es radialmente simétrico y está representado en 2D en términos de coordenadas cilíndricas; el arco es estable; está en equilibrio termodinámico local (LTE); el gas usado es Argón a 1 atm; se supone flujo laminar (velocidades de 100 m/s, longitud característica de 0.01m, y viscosidad cinemática del argón a 20 000 K de 1.9 g/m-s que resulta en un número de Reynolds de 520.); el plasma es ópticamente delgado; se tiene un cátodo plano.

A diferencia de los modelos anteriores, en la zona del cátodo se considera una temperatura que está caracterizada por la temperatura de la columna de plasma adyacente al electrodo, ya que [8] han demostrado que mientras la temperatura de partículas pesadas disminuye a medida que se acerca a la superficie del electrodo, la temperatura de los electrones se mantiene alta en el borde de la zona de cobertura, cercana al electrodo. Debido a que el espesor de la capa límite es muy pequeña se considera que la temperatura en la superficie catódica y su capa límite es prácticamente la misma.

Algunas otras condiciones de frontera se aplican para la superficie anódica y se plantea una ecuación que describe el flujo de calor al ánodo debido al flujo de electrones donde

se considera el efecto Thomson y el calor aportado por la función trabajo, además de considerar la energía adquirida por los electrones que atraviesan la superficie.

Este trabajo realizó simulaciones en computadora para corrientes de 100 y 200 A, para una variedad de longitudes de arco.

Para la variable temperatura; los resultados fueron similares a los obtenidos por [8], además de que el comportamiento del sistema es muy parecido a lo reportado anteriormente y solo difiere un poco en los valores obtenidos de temperatura y voltaje.

Con las suposiciones mencionadas se realizó un modelo matemático que representa la interacción entre el plasma y los electrodos. En conclusión, las temperaturas encontradas coinciden con los valores medidos; las densidades de corriente coinciden con los datos experimentales y se encontró que la presencia del ánodo tiene efectos mínimos en la densidad de corriente del arco. Esto implica que la densidad de corriente del ánodo para un rango de diferentes longitudes de arco puede ser tomada directamente de los resultados calculados para longitudes de arco más grandes, y que los fluxes convectivos son cercanos a los obtenidos en la experimentación. [9]

Una vez determinada la interacción existente en las fronteras del arco y los electrodos, se buscó profundizar esta interacción, utilizando suposiciones donde se afecta la ecuación del campo eléctrico, ya que L Sansonnens et al. [10] reportaron que el flujo de electrones tiene una importante participación en el sistema.

L Sansonnens et al. abordaron un método de predicción, en dos dimensiones, de la distribución de temperatura, velocidad y potencial de un arco eléctrico usando dos cátodos, uno de tungsteno y otro de tungsteno con torio.

El plasma y los electrodos están descritos en coordenadas cilíndricas, asumiendo simetría rotacional alrededor del eje del arco. Se supone flujo laminar, electrones y partículas pesadas con temperaturas iguales. El plasma y los electrodos se describen usando las ecuaciones de conservación de masa, energía, momentum, corriente eléctrica y densidad de electrones. En este trabajo en lugar de sólo representar la densidad de corriente  $j$  dependiente del campo eléctrico  $E$  y la conductividad eléctrica  $\sigma$ , dado por  $j = \sigma E$ , también se incluye un término de difusión de corriente de electrones.

En vista de que se considera al sistema en equilibrio termodinámico local, se tomaron en cuenta las mismas consideraciones del experimento de [11].

Las regiones de plasma cerca de la superficie de los electrodos están caracterizadas por la presencia de gradientes de temperatura, por esta razón la descripción de estas zonas en el dominio computacional requiere de una definición de nodos más fina cerca de los electrodos.

Se sabe que los efectos de la difusión pueden generar cambios en la zona de no equilibrio del plasma para estimar la conductividad eléctrica. Se incluyeron dichos efectos para temperaturas menores a 20 000 K con el uso de la Ecuación 2.

$$\sigma = en_e\mu_e = \frac{n_e e^2}{m_e \nu_e} = \frac{n_e e^2}{m_e \nu_{th} (n_i A Q_{ei} + n_a B Q_{ea})} \quad (\text{Ec 2})$$

Donde:  $e$  es la carga eléctrica,  $n_e$  es la de densidad de electrones,  $\mu_e$  es la movilidad de iones,  $n_i$  es la de densidad de iones,  $n_a$  es la de densidad de partículas neutras,  $m_e$  es la masa del electrón,  $\nu_e$  es la frecuencia de colisión de los electrones contra los iones y especies neutras,  $\nu_{th} = (\delta k_b T / \pi m_e)^{1/2}$  es la velocidad térmica del electrón,  $k_b$  es la constante de Boltzmann,  $T$  es la temperatura a la que se encuentra el plasma  $Q_{ei}$  es la sección transversal ion-electrón y  $Q_{ea}$  es la sección transversal electrón-partícula neutra, A y B son constantes de ajuste para la conductividad eléctrica  $\sigma$ .

Adicionalmente, usando la relación de Einstein para calcular el coeficiente de difusión de electrones ( $D_e$ ) en función de  $k_b$  (constante de Boltzmann),  $T$  (temperatura a la que se encuentra el plasma) (Ec 3) y  $\mu_e$  que se obtuvo de la ecuación (Ec 2) que incluye los efectos de no equilibrio termodinámicamente estable sobre la densidad electrónica.

$$\frac{D_e}{\mu_e} = \frac{k_b T}{e} \quad (\text{Ec 3})$$

Se usaron cálculos para evaluar los efectos de enfriamiento por emisión termiónica de electrones desde la superficie, calentamiento debido a iones emitidos desde el plasma que impactan en el cátodo y radiación de cuerpo negro de la superficie del electrodo. Se considera despreciable el calentamiento de los electrodos por radiación.

Para el cátodo, el flux de energía adicional se calcula por medio de la Ecuación 4:

$$F = -\epsilon \alpha T^4 - |j_e|\phi + |j_i|V_i \quad (\text{Ec 4})$$

Donde  $\epsilon$  es la emisividad,  $\alpha$  es la constante de Stefan-Boltzmann,  $T$  es la temperatura de la superficie,  $\phi$  es la función trabajo efectivo del material del electrodo a temperatura ambiente,  $j_e$  es la densidad de corriente de electrones,  $j_i$  es la densidad de corriente de iones y  $V_i$  el potencial de ionización del plasma.

Para el caso de una soldadura operando con  $I=200$  A y  $L= 5$  mm, L. Sansonnens *et al* [10] reportan que se presentan perfiles de temperatura con un valor máximo que alcanza los 21 500 K en el eje axial cerca de la punta del cátodo. De manera paralela, se presenta una diferencia de potencial de 10.5 V.

Los valores medidos para la máxima temperatura de plasma y diferencia de potencial oscilan alrededor de 23 000 K y 13.1 V respectivamente.

En este trabajo asocian la diferencia en los datos calculados con los medidos debido a la omisión de la descripción de la capa límite de la región del cátodo.

Midieron caídas de voltaje cercanas a las presentadas por [12], encontrando que la temperatura del cátodo está dada por conducción térmica del plasma y el enfriamiento del cátodo está asociado a la emisión termiónica de electrones desde la superficie.

Finalmente, describen el comportamiento del charco de soldadura en conjunto con el arco eléctrico. En este trabajo realizaron un análisis paralelo o simultaneo de la interacción determinada por las diferentes ecuaciones que rigen ambos sistemas para obtener resultados más apegados a la realidad y que cumplen como predictores de los futuros experimentos.

En el artículo titulado “*A unified numerical modeling of stationary tungsten-Inert-Gas welding process*” [13], se revisa la importancia de la transferencia de calor desde el arco de plasma hacia el charco de soldadura con el uso de un modelo numérico para obtener valores cuantitativos de los balances de masa, energía y fuerza del proceso.

Además de las ecuaciones clásicas para la solución del arco eléctrico, se usaron algunas otras para determinar la penetración de la soldadura en el proceso, ya que los trabajos anteriores sólo se habían enfocado en el arco eléctrico o en el charco de soldadura por separado. Se utiliza el modelo descrito en [10] agregando la fusión del ánodo y los efectos convectivos en el charco de soldadura.

A diferencia de los trabajos anteriores se calculan velocidades con valores diferentes de cero en regiones donde la temperatura es mayor que la del punto de fusión del material utilizado. Las temperaturas de las zonas que están en contacto con los alrededores se asumen con un valor de temperatura ambiente.

Se obtienen temperaturas máximas aproximadamente de 3 500 K en la punta del cátodo, 17 000 K en la región del arco cercano a la punta del cátodo, y 2 000 K en el centro de la superficie anódica. También se considera el fenómeno de flujo de plasma a consecuencia del flujo de masa inducido por los campos magnéticos presentes, obteniéndose una velocidad máxima de plasma cercano al cátodo de 203 m/s. Los perfiles de temperatura y velocidades tienen un comportamiento muy similar a los trabajos presentados y revisados previamente.

En este trabajo se estudió el efecto de la corriente y de la longitud del arco sobre las características de la columna del arco e interacciones arco-charco de soldadura a través de modelado matemático de arcos eléctricos en soldadura.

## 1.7 Hipótesis

La corriente eléctrica en un arco de plasma, en conjunto con la longitud del arco, definen el aporte de calor que el arco proporciona a la pieza soldada. Se espera que al incrementar la intensidad de corriente se aumente linealmente el aporte de calor y que al aumentar la longitud del arco el calor aportado afecte a una mayor área de la soldadura y esto ayude a incrementar el aporte de calor necesario para realizar la unión de piezas metálicas por soldadura con arco eléctrico usando electrodo de tungsteno y gas argón.

## 1.8 Objetivo

Simular arcos eléctricos de soldadura variando la corriente ( $I$ ) y la longitud del arco ( $L$ ) teniendo como gas de cobertura argón, empleando un modelo matemático basado en la magnetohidrodinámica del proceso a través de las ecuaciones de conservación de masa, cantidad de movimiento, leyes de Maxwell, ley de Ohm y ley de conservación de carga, resueltas numéricamente con un software de Dinámica de Fluidos (Computational Fluid Dynamics, CFD, por sus siglas en inglés) con el fin de predecir las características de un arco eléctrico e interacciones del arco con el charco de soldadura.

## CAPÍTULO 2 METODOLOGÍA

Es importante comprender los mecanismos y procesos que se presentan en el arco eléctrico en una soldadura GTAW. Esta investigación se dedica al análisis de dichos fenómenos, aplicando técnicas y modelos numéricos para predecir el comportamiento de un arco eléctrico. Los modelos permiten generar resultados aproximados a la realidad con un margen de error relativamente pequeño; dependiendo del método o modelo que se utilice.

El modelo idóneo para el estudio del análisis del GTAW está basado en los fenómenos físicos que rigen al sistema, por lo que se utilizó el software PHOENICS de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) sobre el cual se implementó un modelo matemático que representa la región de un arco formado entre dos electrodos.

El modelo matemático se presenta en tres secciones: suposiciones, ecuaciones gobernantes y condiciones a la frontera.

### 2.1 Suposiciones del modelo

- El plasma se encuentra en condiciones locales de equilibrio termodinámico.
- Coordenadas cilíndricas 2-D.
- El electrodo, y los alrededores se excluyen del dominio del cálculo al no tener efecto sobre la región del arco.
- Solución en estado estable.
- El material de trabajo se considera plano (ánodo).
- Se descartan los efectos de compresibilidad.
- Las propiedades físicas se consideran dependientes de la temperatura.
- El plasma se considera ópticamente delgado (no absorción de la radiación).
- Los cálculos en la región del arco dependen de la temperatura de la superficie anódica.

## 2.2 Ecuaciones que describen algunas aportaciones físicas mencionadas

La suposición que excluye parte del entorno obedece a la necesidad de la resolución a detalle de una pequeña región ocupada por el plasma con un número mínimo de puntos en la malla. La exclusión del electrodo de tungsteno es válida ya que la densidad de corriente es conocida inicialmente y la temperatura de la superficie catódica puede ser expresada por la ecuación de Richardson-Dushman para emisión termiónica [7], que relaciona la temperatura del cátodo con la densidad de corriente **(Ec 5)**.

$$J_c = AT_c \exp\left(-\frac{e\phi_c}{k_B T_c}\right) \quad \text{(Ec 5)}$$

Donde:  $A = 60 \times 10^4 \text{ A}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ K}^{-2}$ ,  $T_c$  es la temperatura del cátodo,  $e$  es la carga electrónica  $\phi_c$  es la función trabajo del material,  $k_B$  es la constante de Boltzman.

## 2.3 Ecuaciones Gobernantes

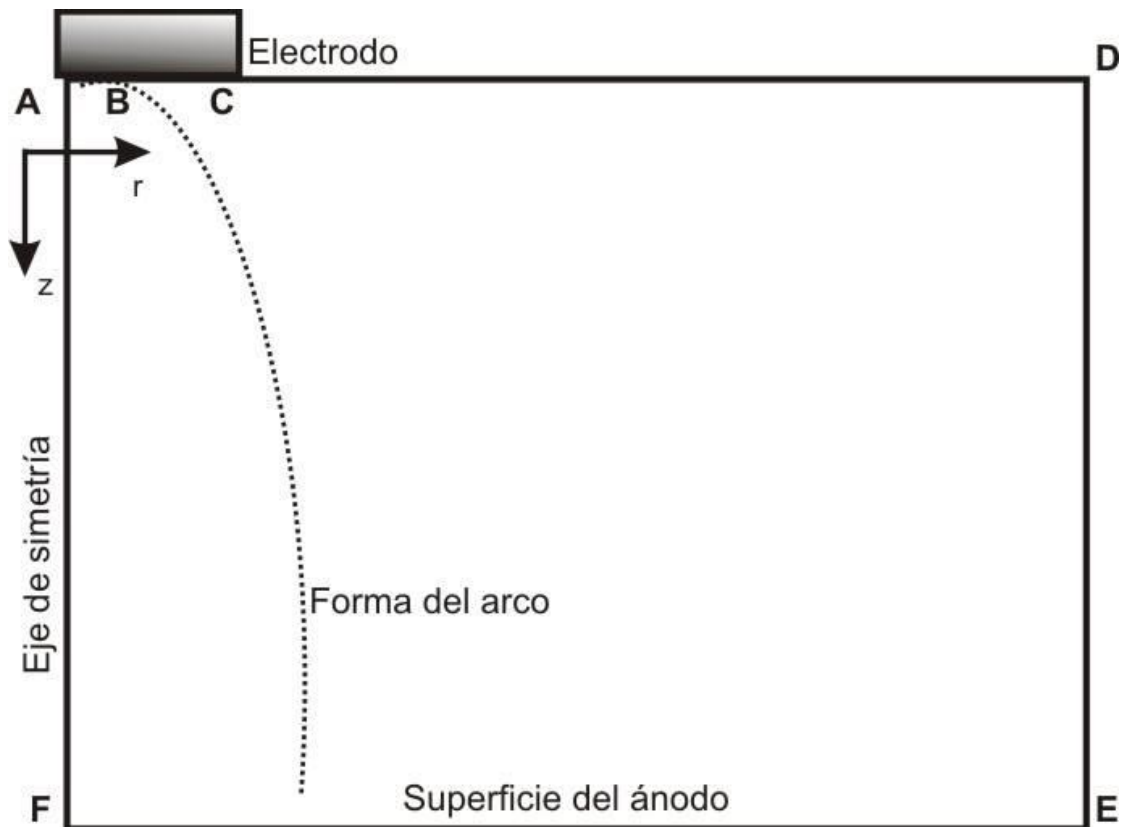


Figura 3. Esquema del dominio de cómputo usado en la simulación CFD.



Considerando las suposiciones antes mencionadas, la representación matemática de la región del arco puede basarse en el dominio computacional presentado en el esquema 2D de la Figura 3.

Las ecuaciones gobernantes de los fenómenos físicos son:

Ecuación de continuidad **(Ec 6)**:

$$\frac{\partial}{\partial z}(\rho v_z) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\rho r v_r) = 0 \quad \text{(Ec 6)}$$

Conservación de momento axial **(Ec 7)**:

$$\frac{\partial}{\partial z}(\rho v_z^2) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\rho r v_r v_z) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \frac{2\partial}{\partial z}\left(\mu \frac{\partial v_z}{\partial z}\right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}\left(r\mu \left(\frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial z}\right)\right) - B_\theta J_r \quad \text{(Ec 7)}$$

Conservación de momento radial **(Ec 8)**:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial z}(\rho v_r v_z) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\rho r v_r^2) \\ & = -\frac{\partial P}{\partial r} + \frac{2\partial}{r\partial r}\left(\mu \frac{r\partial v_r}{\partial r}\right) - \frac{2v_r}{r^2}\mu + \frac{\partial}{\partial z}\left(\mu \left(\frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial z}\right)\right) \\ & + B_\theta J_z \end{aligned} \quad \text{(Ec 8)}$$

Donde  $v_r$  y  $v_z$  son componentes de velocidad radial y axial respectivamente,  $P$  es la presión,  $\rho$  es la densidad,  $J_z$  y  $J_r$  son componentes axial y radial de la densidad de corriente,  $B_\theta$  es la densidad de flux magnético azimutal y  $\mu$  es la viscosidad. El lado izquierdo de las ecuaciones anteriores representa términos convectivos, mientras que los términos del lado derecho representan el gradiente de presión, la viscosidad y fuerzas de cuerpo (O fuerzas de Lorentz). Las fuerzas de cuerpo son el resultado del producto cruz entre  $J \times B$ , que pueden ser expresadas por las componentes  $-J_r B_\theta$  en la dirección axial y  $J_z B_\theta$  en la dirección radial..

Conservación de energía **(Ec 9)**:

$$\frac{\partial}{\partial z}(\rho v_z h) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\rho r v_r h) = \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{k}{C_p} \frac{\partial h}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{kr}{C_p} \frac{\partial h}{\partial r} \right) + S_t \quad \text{(Ec 9)}$$

Donde el término fuente de energía es descrito mediante la **(Ec 10)**:

$$S_t = \left( \frac{J_z^2 + J_r^2}{\sigma} \right) - S_r + \frac{5 k_B}{2 e} \left( \frac{J_z}{C_p} \frac{\partial h}{\partial z} + \frac{J_r}{C_p} \frac{\partial h}{\partial r} \right) \quad \text{(Ec 10)}$$

Donde,  $J_z$  y  $J_r$  son las componentes axiales y radiales de la densidad de corriente,  $\sigma$  es la conductividad eléctrica,  $S_r$  es la pérdida de radiación por unidad de volumen,  $k_B$  es la constante de Boltzman,  $e$  es la carga eléctrica de un electrón,  $C_p$  es el calor específico y  $h$  es la entalpía.

$S_t$  representa los términos fuente de energía. El primer término del lado derecho de la ecuación **(Ec 10)** es el calor aportado por el efecto Joule,  $S_r$  representa la pérdida de radiación por unidad de volumen y el último término es el calor causado por el flujo de electrones conocido como efecto Thompson.

Ecuaciones de Maxwell **(Ec 11)**, **(Ec 12)**, **(Ec 13)**:

$$\bar{\nabla} \times \bar{E} = 0 \quad \text{(Ec 11)}$$

$$\bar{\nabla} \times \bar{H} = \bar{J} \quad \text{(Ec 12)}$$

$$\bar{\nabla} \cdot \bar{B} = 0 \quad \text{(Ec 13)}$$

$E$  es el campo eléctrico,  $H$  es el campo magnético,  $J$  es la densidad de corriente y  $B$  es la densidad de flujo magnético.

Ecuación de conservación de carga **(Ec 14)**:

$$\bar{\nabla} \cdot \bar{J} = 0 \quad \text{(Ec 14)}$$

Y adicionalmente se utiliza la ley de Ohm **(Ec 15)**:

$$\bar{J} = \sigma(\bar{E}) \quad \text{(Ec 15)}$$

Dicha ecuación representa la corriente dirigida por los gradientes de potencial.

Las ecuaciones de Maxwell, la ley de conservación de carga y la Ley de Ohm, se necesitan para determinar las características eléctricas del arco. Sin embargo, es conveniente expresar el problema eléctrico en términos de potencial eléctrico con ayuda de las siguientes ecuaciones **(Ec 15)**:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \sigma r \frac{\partial \phi}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \sigma \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) = 0 \quad \text{(Ec 16)}$$

Donde  $\phi$  es el potencial eléctrico asociado al campo eléctrico a través de la **(Ec 15)**:

$$\bar{E} = -\nabla\phi \quad \text{(Ec 17)}$$

Resolviendo la ecuación **(Ec 16)**, es posible obtener los componentes de la densidad de corriente con ayuda de la Ley de Ohm **(Ec 18)**, **(Ec 19)**:

$$J_r = -\sigma \left( \frac{\partial \phi}{\partial r} \right) \quad \text{(Ec 18)}$$

$$J_z = -\sigma \left( \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) \quad \text{(Ec 19)}$$

Debido al hecho de que la mayoría de la corriente tiene dirección axial, el flux de campo magnético puede ser derivado de la integración de la Ley de Ampere **(Ec 20)**:

$$B_\theta = \frac{\mu_0}{r} \int_0^r J_z r dr \quad \text{(Ec 20)}$$

Las ecuaciones anteriores definen completamente el problema electromagnético, y se deriva de la combinación de las ecuaciones de Maxwell, Ohm y conservación de carga [7].

## 2.4 Condiciones a la frontera

La Figura 3 es una representación de la región a analizar y corresponde a las condiciones de frontera presentadas en la Tabla 4.

Para el segmento AB, correspondiente a un pequeño círculo en el cátodo llamado “spot”, se establece una densidad de corriente denominada  $J_c$  que tiene un valor constante de  $6.5 \times 10^7 \text{ A/m}^2$ ; tanto para el segmento BC como para la superficie anódica (segmento EF) se establece un potencial de cero. El potencial para las fronteras abiertas (CD y DE) se establecen con un flux de corriente con valor de cero, debido a que se consideran fronteras aisladas.

En los segmentos AB, BC y EF las velocidades se consideran iguales a cero por la condición de no deslizamiento por la presencia del cátodo sólido y la pieza a soldar, mientras que en las fronteras abiertas (CD y DE) se supone una presión atmosférica de cero y se deja escapar gas que se lleva energía por convección.

Para los valores de entalpía o temperatura se aplican las ecuaciones correspondientes a los cuatro mecanismos de transferencia de calor en el ánodo (EF) que son: radiación, convección, y mecanismos asociados al flujo de electrones (efecto Thompson y condensación de electrones), la temperatura (o entalpía) se fija a un valor constante (1 800 K). El cátodo de tungsteno se encuentra a 4 000 K y en las fronteras abiertas a la atmósfera el fluido caliente escapa solo por convección.

En el eje de simetría se suponen gradientes igual a cero para todas las variables. Las condiciones en el eje de simetría son de cero flujo.

Tabla 4. Resumen de condiciones a la frontera para el Sistema de estudio.

	<b>AB</b>	<b>BC</b>	<b>CD</b>	<b>EF</b>	<b>DE</b>	<b>AF</b>
$v_r$	$v_r = 0$	$v_r = 0$	$v_r = 0$	$v_r = 0$	$\frac{\partial v_r}{\partial r} = 0$	$v_r = 0$
$v_z$	$v_z = 0$	$v_z = 0$	$\frac{\partial v_z}{\partial z} = 0$	$v_z = 0$	$\frac{\partial v_z}{\partial r} = 0$	$\frac{\partial v_z}{\partial r} = 0$
$H$	$T=4000K$	$0$	$\frac{\partial T}{\partial z} = 0$	$T=1800K$	$\frac{\partial T}{\partial r} = 0$	$\frac{\partial T}{\partial r} = 0$
$\Phi$	$\frac{\partial \Phi}{\partial z} = -\frac{J_c}{\sigma}$	$\frac{\partial \Phi}{\partial z} = 0$	$\frac{\partial \Phi}{\partial z} = 0$	$\frac{\partial \Phi}{\partial r} = 0$	$\frac{\partial \Phi}{\partial r} = 0$	$\Phi = 0$
$P$	$\frac{\partial P}{\partial z} = 0$	$\frac{\partial P}{\partial r} = 0$	$0$	$0$	$\frac{\partial P}{\partial z} = 0$	$\frac{\partial P}{\partial r} = 0$

## 2.5 Técnica de solución numérica

Haciendo uso del software CFD PHOENICS y del modelo matemático antes descrito se modificó un código para predecir el comportamiento y las propiedades que presenta un arco eléctrico en atmósfera de Argón para soldadura con electrodo de tungsteno.

El software PHOENICS se compone de 3 funciones principales; 1) definición del problema, 2) simulación y 3) representación de resultados.

Cada una de las funciones anteriores tiene sub-programas llamados:

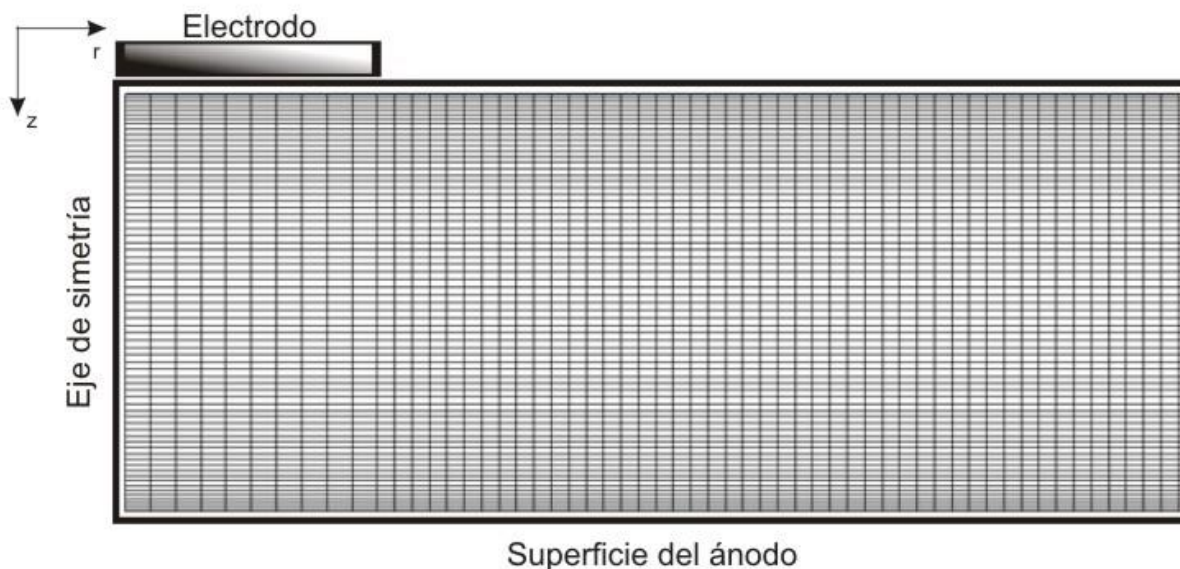
1. SATELLITE (que incorpora el editor de realidad virtual y visualizador).
2. EARTH (El programa encargado de la resolución numérica de las ecuaciones de conservación).
3. PHOTON (encargado de realizar los gráficos de resultados).

La comunicación entre cada uno de los elementos es a través de archivos con las siguientes funciones:

- Q1, Archivo de texto creado por el usuario con la definición del problema a resolver en un lenguaje llamado PIL (Phoenics Input Language).

- EARDAT, un archivo en formato ASCII que expresa lo que el usuario describe vía Q1.
- PHI, es un archivo de resultados escrito por EARTH y que puede ser desplegado por los programas PHOTON, AUTO PLOT y el visualizador para mostrar gráficamente los resultados obtenidos de cada simulación.
- RESULT, que es un archivo en ASCII que expresa los resultados en formato de tablas con valores calculados de cada variable del arco. [14]

Se partió de una malla en 2D en coordenadas cilíndricas polares como la que se presenta en la Figura 4, donde el área cercana al eje de simetría presenta un mallado fino y se determinaron 10 nodos para la superficie catódica y 105 nodos en los alrededores en dirección radial por 70 nodos en dirección axial.



*Figura 4. Dominio de cálculo mostrando una malla típica.*

Posteriormente, con la finalidad de obtener nodos lo más simétricos posibles, dentro del dominio del programa, se modificó la disposición espacial de la malla, ya que el cambio de la variable correspondiente a la distancia entre ánodo y cátodo generaba cambios en las dimensiones de los nodos.

Una vez determinadas las condiciones de corriente aplicada y distancia entre electrodos, se corrió el software con la combinación de comandos previamente explicada y con parámetros de convergencia de todas las variables asociadas a las ecuaciones de conservación con valores menores a  $1 \times 10^{-4}$ . En una corrida típica se empieza el cálculo con la solución de un caso previo para facilitar la convergencia. Los parámetros de relajación de las ecuaciones de Navier-Stokes,  $v_r$  y  $v_z$  se usan en su forma FALSDT (relajación de delta de tiempo falso [15]) con valores de  $1 \times 10^{-8}$ , para facilitar la convergencia de la presión se establece un parámetro de relajación lineal de 0.01, tanto la entalpía como el potencial eléctrico se arrancan congelados con parámetros de relajación lineales de 0.0. Una vez que están por converger las ecuaciones correspondientes a la hidrodinámica, se asigna un valor de  $1 \times 10^{-8}$  al parámetro de relajación lineal del potencial eléctrico y cuando está a punto de converger se congela (el parámetro de relajación correspondiente al potencial eléctrico se pone en cero) y se procede al cálculo de la entalpía determinando un parámetro de relajación lineal con valor de  $1 \times 10^{-8}$ . El procedimiento de congelar una de las dos variables críticas (entalpía o potencial eléctrico) y dejar converger la otra se repite las veces que sean necesarias hasta que ambas ecuaciones de conservación estén cerca de ser satisfechas con errores bajos en los balances. Llegando a este punto ambas variables se relajan simultáneamente con parámetros de relajación progresivamente mayores ( $10^{-7}$ ,  $10^{-6}$ , etc.) hasta que se alcanza la convergencia de todas las ecuaciones de conservación involucradas en el cómputo. Este procedimiento puede, en algunos casos, implicar hasta 40 000 iteraciones. Cabe señalar que para la ecuación de conservación de energía no se pudieron obtener errores inferiores al 3%, a diferencia de las otras ecuaciones que siempre se presentaron errores de hasta 0.1% en los balances. Se estima que esto se debe a que los valores absolutos de entalpía son muy grandes, en relación a los valores de velocidad, presión y campo eléctrico por lo que se consideró que los desbalances no son tan significativos, si se toma en cuenta el orden de magnitud típico de las entalpías.

Cuando se obtuvo la solución y la convergencia llegó a su valor mínimo; se realizó el tratamiento de datos para su posterior interpretación; se generaron gráficos para

determinar temperaturas máximas, perfiles de diferencia de potencial, velocidad y temperatura.

## 2.6 Diseño experimental

Se realizó un análisis de las variables a estudiar en esta tesis: la corriente (I) y la longitud del arco (L), para generar una matriz de experimentos en computadora o simulaciones con 5 corrientes diferentes de 100, 150, 200, 250 y 300 A; y 4 distintas longitudes de arco de 0.003, 0.005, 0.007 y 0.01 m. Esta matriz de experimentos en computadora se muestra en la Tabla 5, requiriendo un total de 20 simulaciones.

Tabla 5. Matriz experimental en computadora con los casos a correr en el simulador CFD.

<b>Distancia\Corriente</b>	<b>100 A</b>	<b>150 A</b>	<b>200 A</b>	<b>250 A</b>	<b>300 A</b>
<b>0.003 m</b>	-	-	-	-	-
<b>0.005 m</b>	-	-	-	-	-
<b>0.007 m</b>	-	-	-	-	-
<b>0.01 m</b>	-	-	-	-	-



## CAPÍTULO 3: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 3.1 Velocidades en el arco

En la Figura 5 se muestra el perfil de velocidad para  $L=0.003$  m y  $A= 300$  A. Se puede observar que la máxima velocidad, con valor de aproximadamente 350 m/s, se presenta cercana al eje de simetría; este fenómeno se debe al flujo de plasma inducido por las fuerzas electromagnéticas generadas cerca del cátodo ya que ésta es la zona que presenta mayor densidad de corriente y campo magnético. El desarrollo del perfil de velocidades es congruente con los trabajos anteriores, donde se explica que al acercarse el jet a la superficie anódica presenta un decremento en la velocidad, por ser desviado a causa de la presencia de una presión de estancamiento producida por el choque del jet sobre la superficie del material de trabajo. Como consecuencia, el plasma se ve desviado en dirección radial generando la forma característica de la campana de un arco eléctrico.

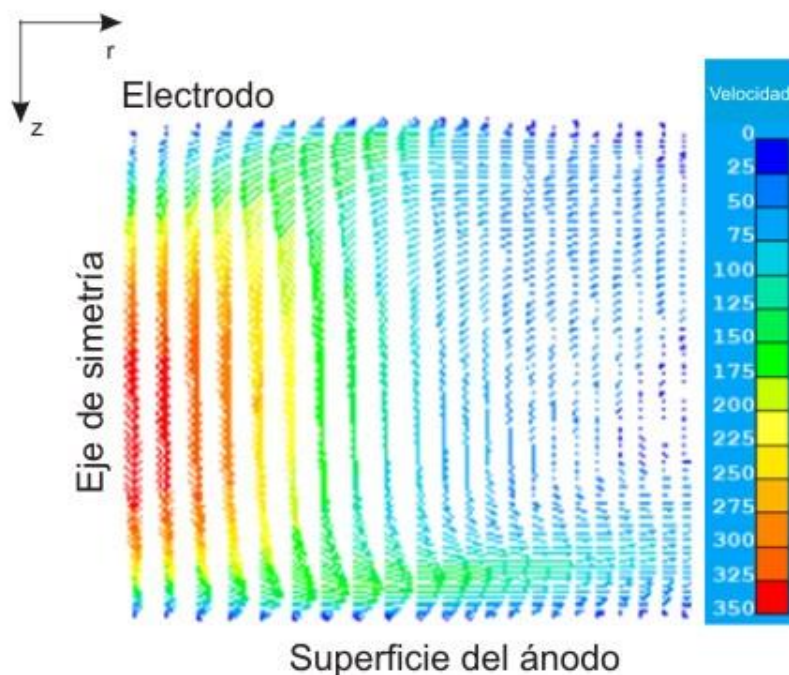
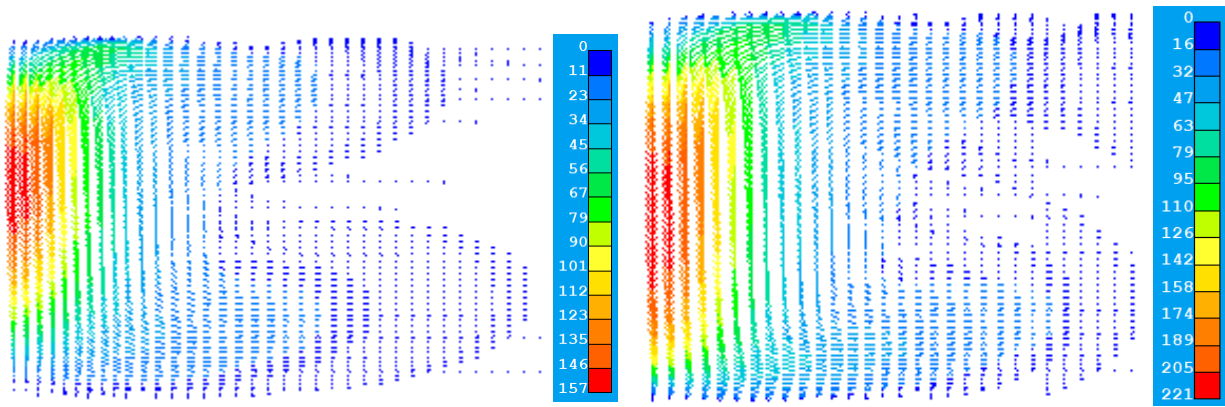
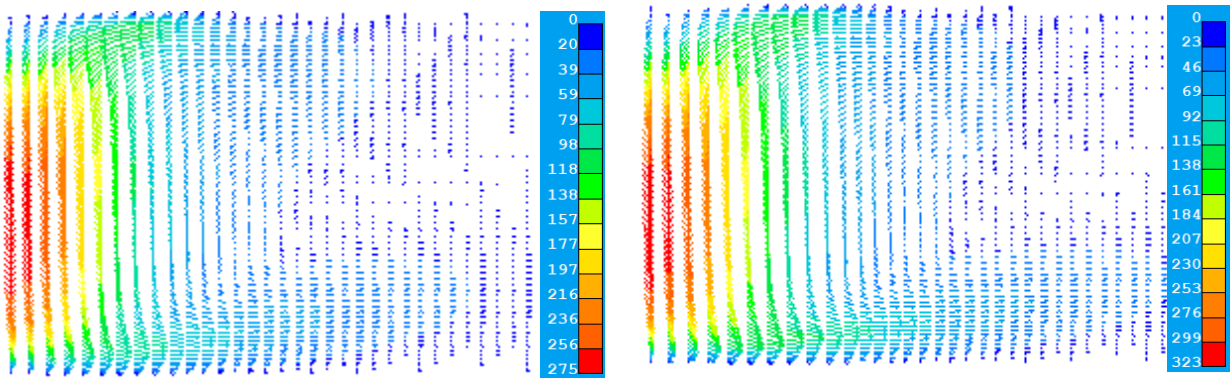


Figura 5. Perfil de velocidades para una distancia de 0.003 m y corriente de 300 A.



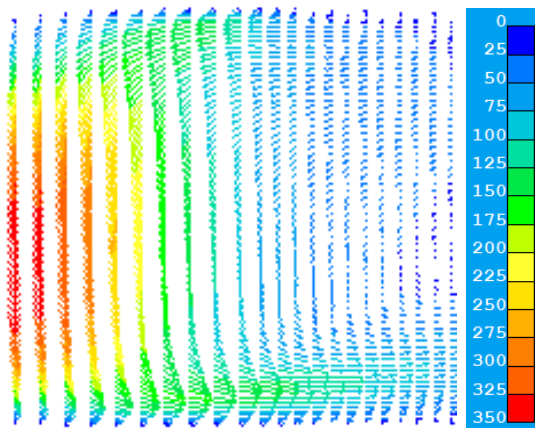
(a) 100 A

(b) 150 A



(c) 200 A

(d) 250 A



(e) 300 A

Figura 6. Perfiles de velocidad para diferentes corrientes aplicadas con longitud estática en 0.03m, (a) 100A, (b) 150A, (c) 200A, (d) 250 A y (e) 300A.

Al aumentar la corriente aplicada, el efecto que se obtiene es que las velocidades del jet aumentan y que la distribución de éstas se presente con valores máximos en el eje de simetría; el choque del jet sobre el ánodo provoca un aumento en la presión, como se muestra en la Figura 6, donde se presentan los patrones de velocidad en soldaduras con la misma longitud de arco de 0.003 m, variando la corriente de a) 100, b) 150, c) 200, d) 250 y e) 300 A. En todos los casos el inicio de la zona de velocidad máxima se genera cerca del electrodo de tungsteno; como se ha descrito en trabajos anteriores, al ser una zona con altas densidades de corriente y por consecuencia altos valores de campo magnético es natural que el plasma en esta zona se mueva con una velocidad alta en dirección al ánodo; ahora bien, el decremento de las velocidades en función de la longitud de arco también se asocia a que conforme el jet de plasma se acerca a la superficie de soldadura éste se desarrolla más, provocando un aumento en la sección transversal y a su vez, como hay una mayor área se presenta un decremento de la densidad de corriente, generando menores campos eléctricos y paralelamente la disminución en la velocidad del plasma, aunado al efecto de estancamiento.

La Figura 7 presenta un gráfico de la velocidad del plasma en función de la posición axial a lo largo del eje de simetría, para arcos con longitud constante de 0.01 m y variando la corriente de 100 a 300 A.

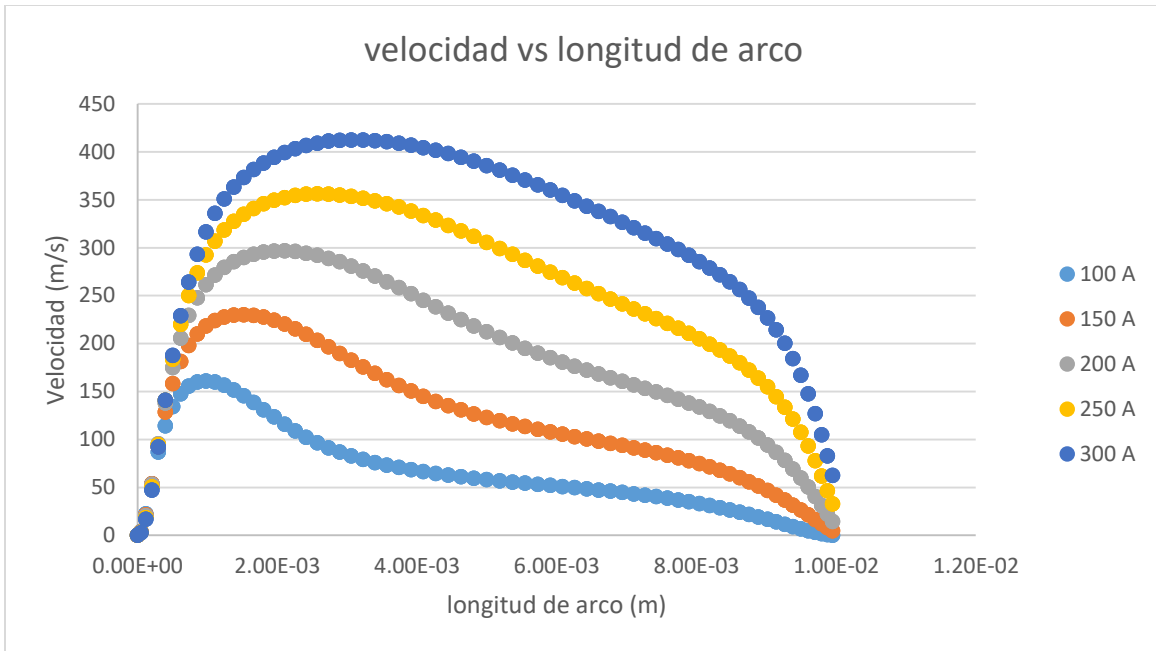


Figura 7. Efecto de la velocidad en función de la longitud de arco para distancia fija de 0.01 m.

En la Figura 7 se observa la variación de la velocidad de plasma en el eje axial, se hace evidente el aumento en las velocidades entre la curva con corriente de 100 A y la curva con corriente de 300 A, debido al aumento de las fuerzas de Lorentz. A mayores corrientes del arco, hay una distribución de velocidades más uniforme a lo largo del eje axial; en cambio con corrientes bajas las velocidades varían mucho a lo largo del eje axial. También se observa que las velocidades del jet de plasma alcanzan sus valores máximos en las cercanías al cátodo (aproximadamente a 0.002 m) y disminuyen conforme el jet de plasma se acerca a la superficie anódica por el freno que se asocia a la presión de estancamiento sobre el ánodo.

En la Figura 8 se presentan patrones de flujo para casos de soldadura de arco con una corriente de 300 A variando la longitud de arco de (a) 0.003 m, (b) 0.005 m, (c) 0.007 m y (d) 0.01 m. Los patrones de flujo no cambian mucho en cuanto a las velocidades máximas, excepto para el caso de 0.003 m en el cual la velocidad máxima es de 350 m/s en comparación con los aproximadamente 410 m/s de velocidad máxima que presentan el resto de los casos. Esto se puede explicar porque con 0.003 m el jet no alcanzó a desarrollar su máxima velocidad por estar tan cerca el ánodo del cátodo.

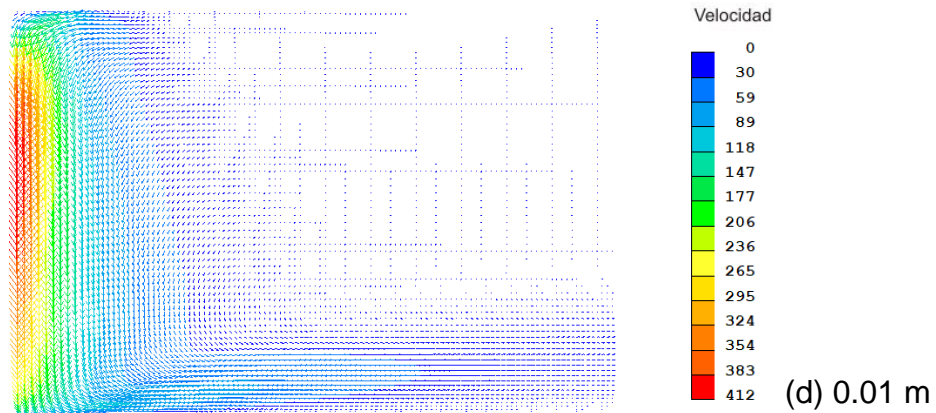
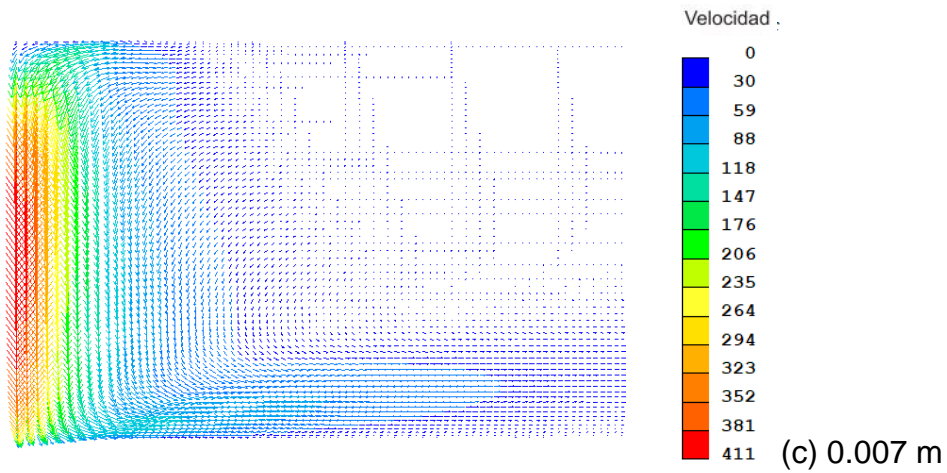
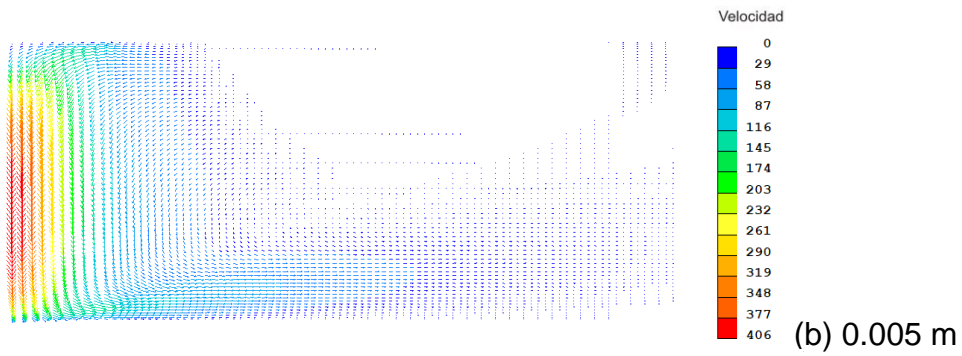
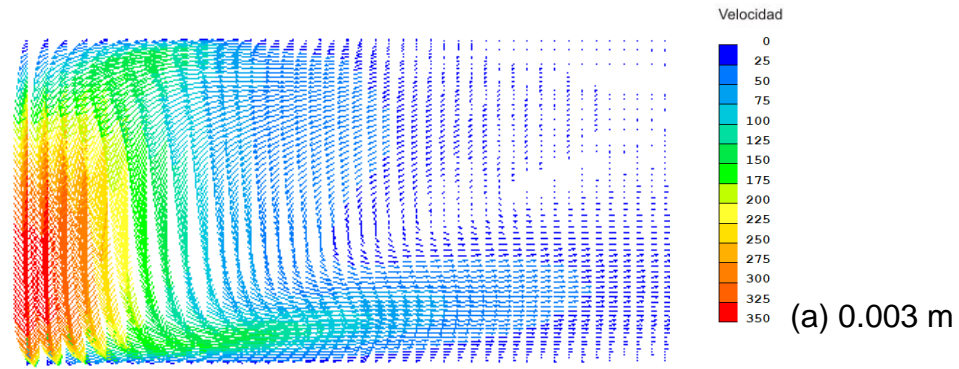


Figura 8. Perfil de velocidades con corriente constante (300 A) a diferentes longitudes de arco (a) 0.003 m, (b) 0.005 m, (c) 0.007 m y (d) 0.01 m.

Lo que si cambia es la distribución de velocidades cerca del ánodo, en donde se nota que a valores pequeños de la longitud de arco el jet impacta con más velocidad sobre el ánodo en contraste con arcos largos en donde el jet choca con el ánodo a menor velocidad.

En la Tabla 6 se resumen los valores de velocidad máxima para cada caso tomados de la Figura 9.

Tabla 6. Valores máximos alcanzados por los perfiles de velocidad.

Longitud del arco (m)	0.003	0.005	0.007	0.01
Velocidad máxima (m/s)	350.52	405.87	410.73	412.31

Es notorio que la velocidad del jet de plasma presenta disminución en dirección axial una vez pasada la zona de máxima velocidad, cercana al cátodo, y presenta valores aún menores cerca de la superficie anódica; debido a que el plasma presenta una redirección radial por la interacción con el charco de soldadura.

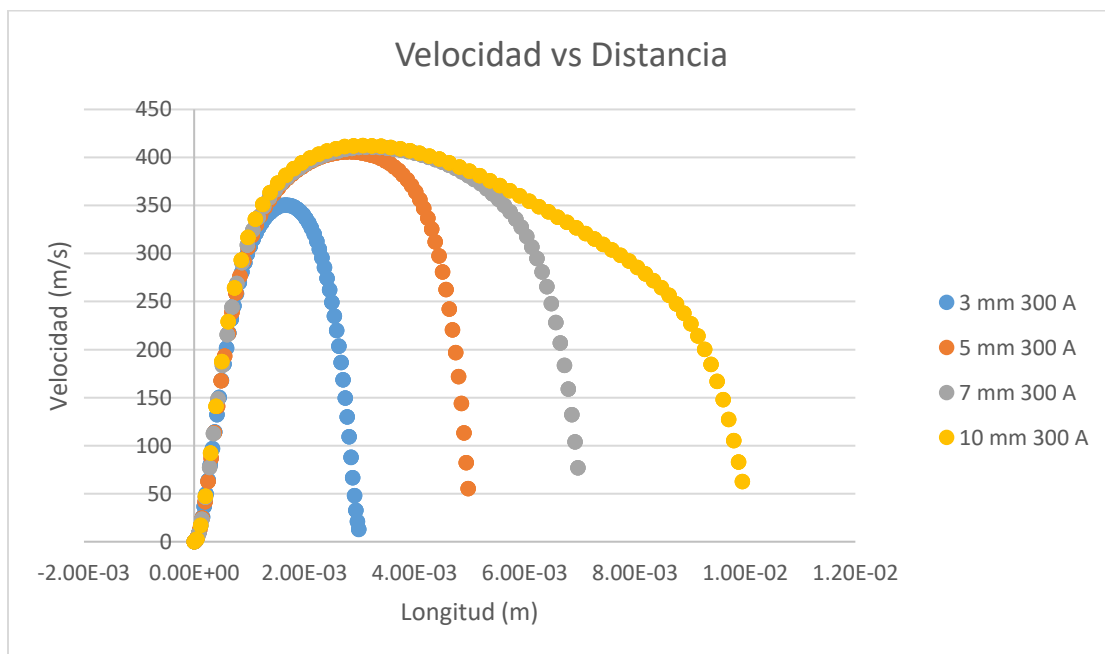


Figura 9. Velocidades en función de la distancia entre electrodos variable con una corriente aplicada constante de 300 A.

En la Figura 9, se muestra la velocidad del jet sobre el eje de simetría desde el cátodo al ánodo para soldaduras con corriente de 300 A variando la longitud del arco, Se aprecia que la distancia entre los electrodos no afecta el valor de la velocidad máxima alcanzada; a pesar de que existe un comportamiento relativamente diferente para el caso de  $L=0.003$  m, se observa que el comportamiento es similar, es decir, a medida que la longitud del arco aumenta sólo provoca que el jet de plasma se desarrolle de mejor manera generando velocidades uniformes en la columna del arco sobre el eje de simetría, el decremento de velocidad para la curva con la condición  $L=0.01$  m (como se ha explicado anteriormente y en trabajos previos) presenta disminución de densidad de corriente a lo largo de la longitud del arco generando un gradiente de velocidades; entonces, mientras más alejados estén los electrodos, mayor será la disminución de densidad de corriente y por lo tanto, menores valores de velocidad se presentarán en el jet de plasma.

### 3.2 Mapas de temperatura en el arco

En la Figura 10 se presentan los perfiles de temperatura (en grados Kelvin) en arcos manteniendo una longitud del arco fija de 0.003 m con diferentes corrientes. Se usa la misma escala de temperaturas en todos los mapas para compararlos entre ellos.

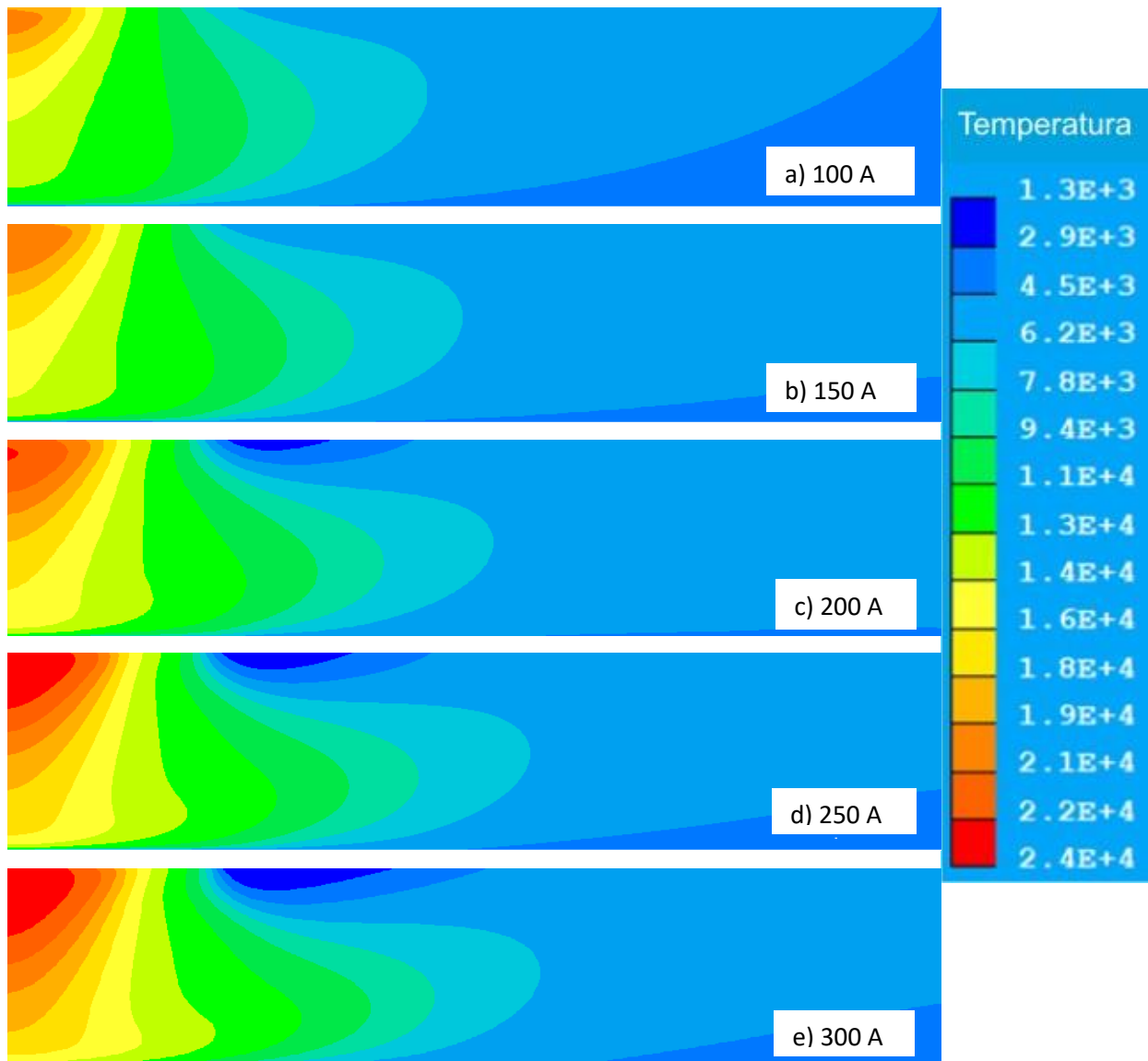


Figura 10. Perfil de temperaturas para condiciones de longitud entre electrodos fija  $L=0.003$  m y diferentes corrientes de arco a) 100 A, b) 150 A, c) 200 A, d) 250 A, e) 300 A.

En la Figura 10, se observa que, al aumentar la corriente, las temperaturas aumentan de manera proporcional y también se aprecian arcos más anchos al aumentar la corriente.



En todas las figuras se aprecia que las zonas calientes están cerca del cátodo y conforme se acerca el ánodo se disminuye la temperatura. Estos gradientes de temperatura están asociados a la expansión del arco que provoca una disminución de las densidades de corriente. Esto implica que el efecto Joule es el mecanismo que provoca el calentamiento del plasma. El perfil de velocidades está asociado a la disposición de las isotermas de la Figura 10, ya que el jet de plasma arrastra las isotermas hacia abajo y radialmente sobre el ánodo, debido al mecanismo de convección en el eje de simetría.

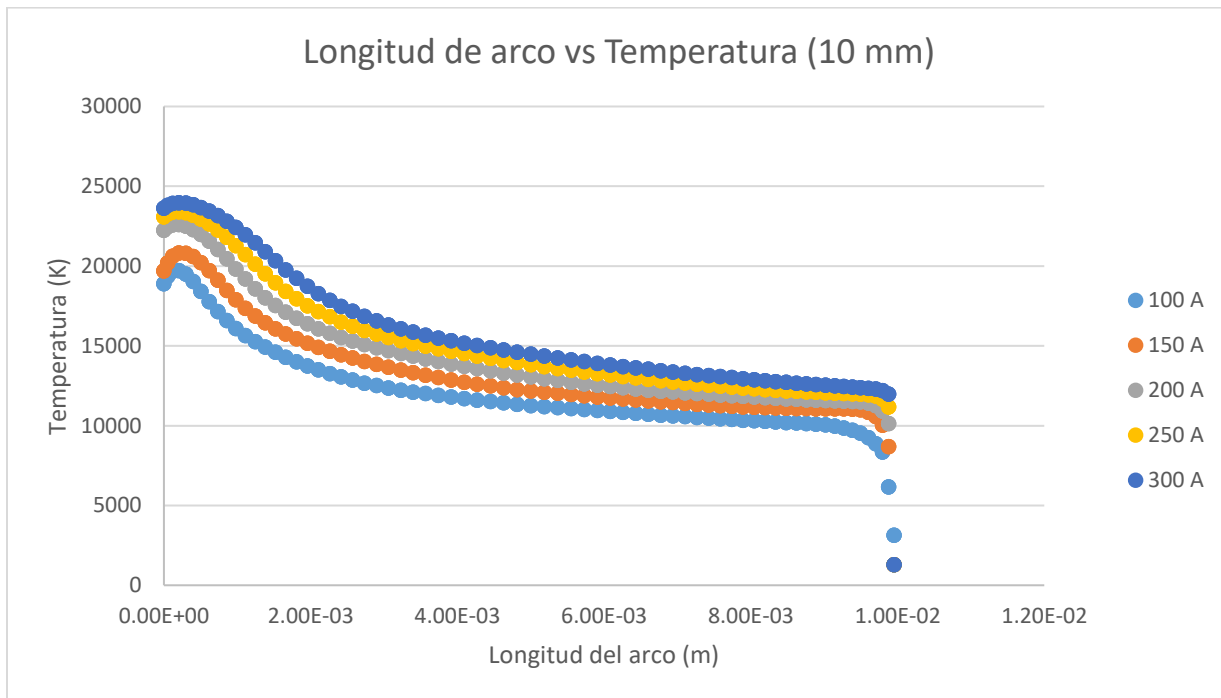


Figura 11. Gráfico donde se presentan diferentes Corrientes aplicadas cuando  $L= 0.01$  m.

La Figura 11, muestra los perfiles de temperatura del arco en el eje de simetría, para arcos con una longitud de 0.01 m, variando la corriente de 100 a 300 A. Se observan comportamientos muy similares y que la temperatura máxima se presenta cerca del cátodo, a medida que la distancia axial se acerca al ánodo existe un decremento de temperatura, al alcanzar la superficie anódica se aprecia, en todos los casos, una caída de temperatura debido a la presencia de la pieza de soldadura fría y a la pérdida de energía del arco a través de todos los mecanismos de transferencia de energía presentes en el sistema. Se nota que el incremento de la corriente solo provoca que aumente la temperatura pero el gradiente se mantiene con la misma tendencia; esto nuevamente se

explica por el hecho de que al existir mayor corriente hay más calor Joule generado y por ende mayores temperaturas en el plasma.

La Figura 12, muestra mapas térmicos del arco manteniendo la corriente constante a 300 A y variando la longitud de arco de 0.003 a 0.01 m.

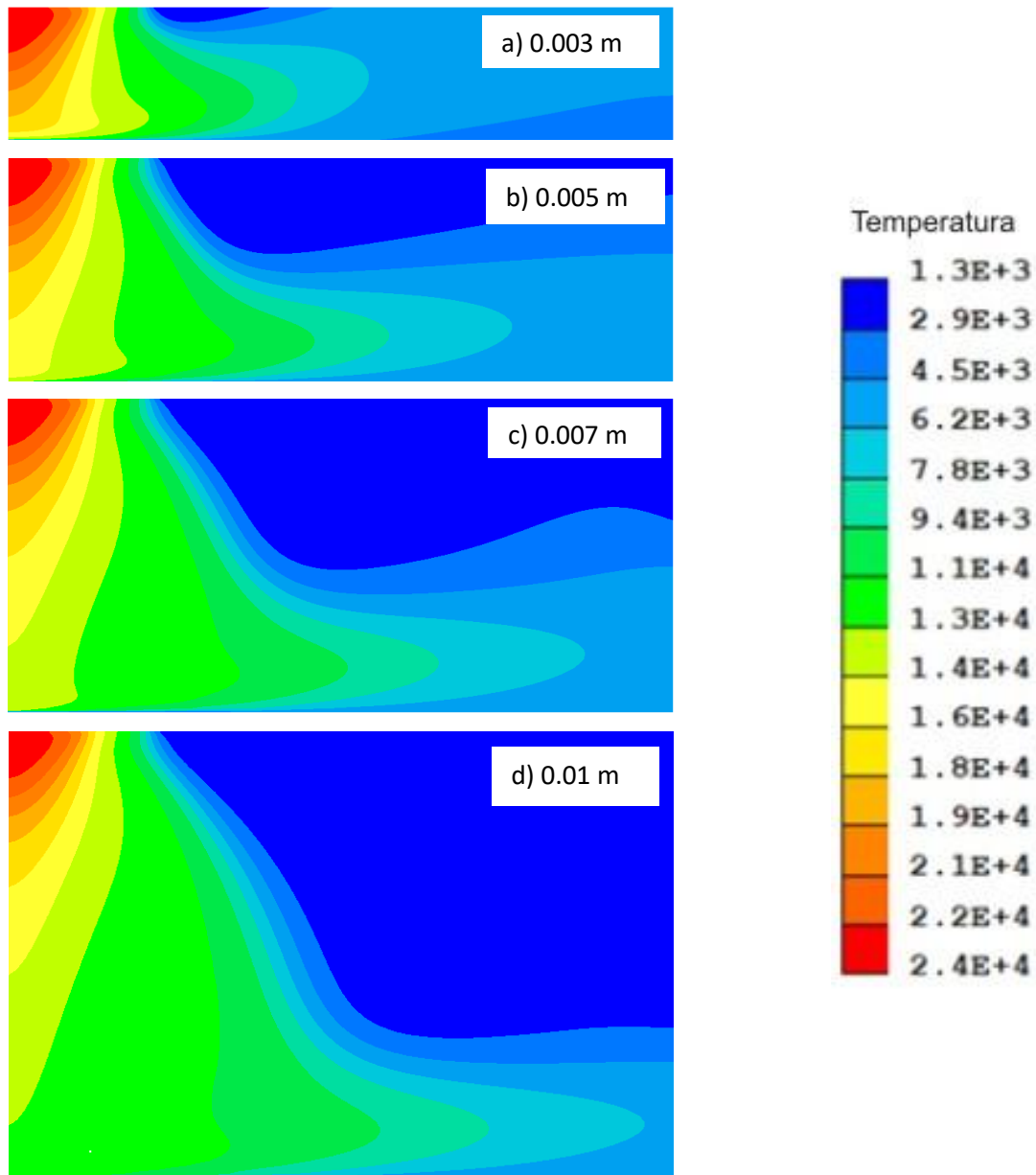


Figura 12. Contornos de temperatura para variable de corriente fija  $A= 300 A$  a diferentes longitudes de arco a) 0.003 m, b) 0.005 m, c) 0.007 m, d) 0.01 m.

En la Figura 12 se aprecia que el aumento de longitud de arco no genera grandes cambios en los valores máximos de temperatura cerca del cátodo. Cerca del ánodo, sin embargo, si se aprecian diferencias notables, ya que el arco se desarrolla y expande más al aumentar la longitud del arco, esto provoca que al aumentar la distancia entre electrodos se aumenta el tamaño de la campana del jet lo que hace que incremente el área de contacto arco-soldadura y la transferencia de calor con los alrededores provocando así zonas que presentan temperaturas relativamente bajas cerca del ánodo, además de que al expandirse más el arco hace que las densidades de corriente con arcos largos sean menores cerca del ánodo lo que explica aún más esas bajas temperaturas por tener menor efecto Joule en esa zona.

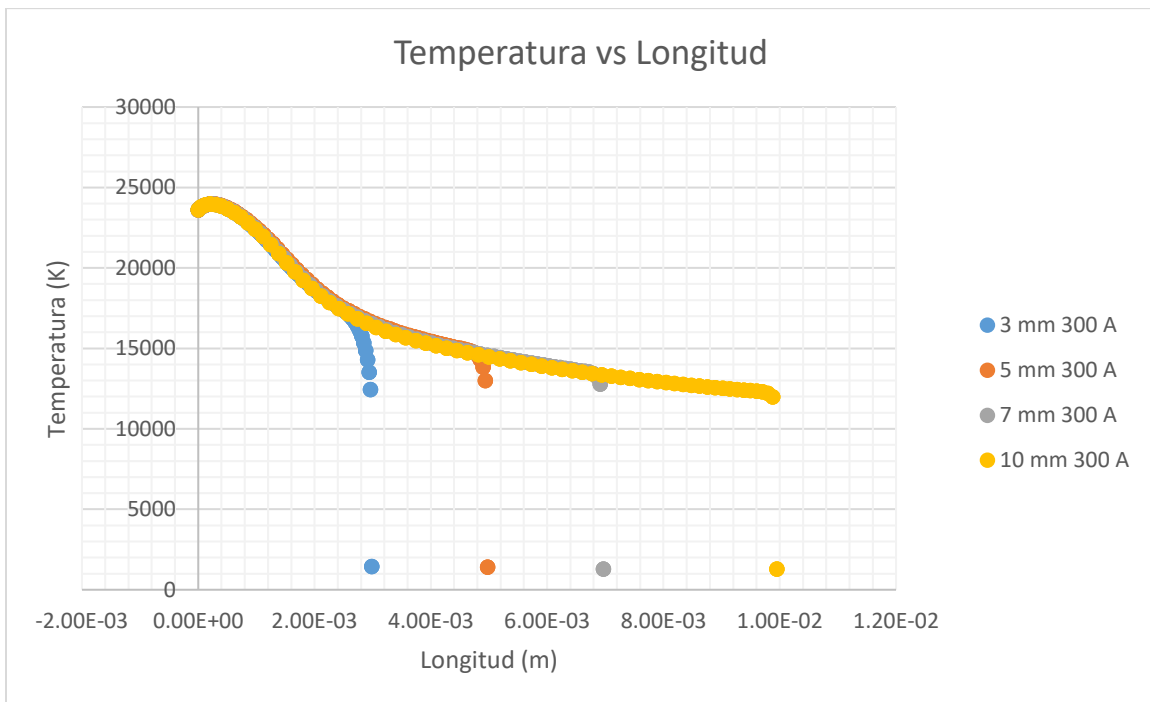


Figura 13. Perfil de temperaturas a 300 A para diferentes longitudes de arco.

En la Figura 13, que presenta perfiles de temperatura a lo largo del eje de simetría para arcos con 300 A y distintas longitudes de arco de 0.003, 0.005, 0.007 y 0.01 m, se observa que las temperaturas alcanzadas a lo largo del eje de simetría desarrollan perfiles de temperatura idénticos, esto indica que la longitud del arco no afecta de manera significativa el perfil de temperaturas que se alcanzan en el arco; la temperatura máxima

alcanzada por el jet tiene un valor máximo de 24 000 K aproximadamente para todos los casos. Se ve que un aumento en la longitud del arco en lo único que afecta es que la temperatura siga disminuyendo al expandirse más el arco a longitudes mayores.

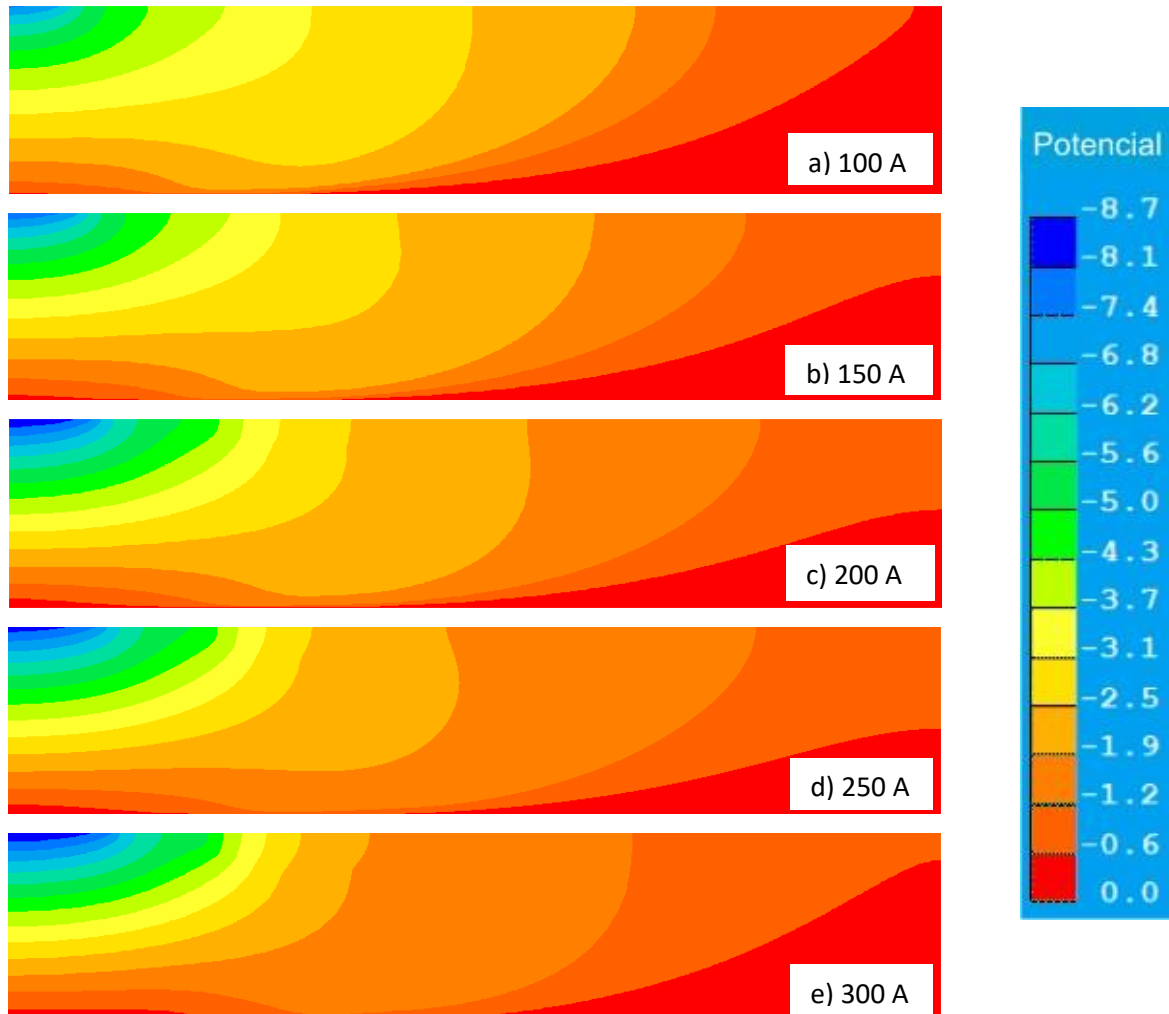


Figura 14. Contornos de potencial para diferentes corrientes a) 100 A, b) 150 A, c) 200 A, d) 250 A, e) 300 A en una longitud de arco de 0.003 m.

En la Figura 14, se presentan mapas de potencial eléctrico para arcos de soldadura en el caso de mantener una longitud del arco constante en 0.003 m y variando la corriente de 100 a 300 A, en ella se observa que el voltaje aumenta al aumentar la corriente del arco. Esto se puede explicar con la ley de Ohm, que plantea que el voltaje aumenta de manera lineal con un aumento en la corriente, si se mantiene la resistencia eléctrica constante (misma longitud del arco). La presencia de altos voltajes (altos gradientes de potencial) cerca del cátodo y bajos gradientes de potencial en la zona cercana al charco

de soldadura van asociados a las magnitudes de las densidades de corriente presente en el arco en dichas zonas, se sabe que cerca del cátodo la densidad de corriente es alta y que cerca del ánodo el plasma aumenta el área de conducción de corriente (expansión del arco) y como consecuencia la densidad de corriente disminuye, generando así los gradientes de potencial ya mencionados.

En la Figura 15, se presentan contornos de potencial eléctrico para arcos de soldadura con corriente fija de 300 A, variando la longitud del arco en 0.003, 0.005, 0.007 y 0.01 m, se observa que la variación del voltaje del arco con el aumento en la longitud de arco es lineal y van desde aproximadamente 9 V hasta 18 voltios al pasar de 0.003 a 0.01 m la longitud del arco.

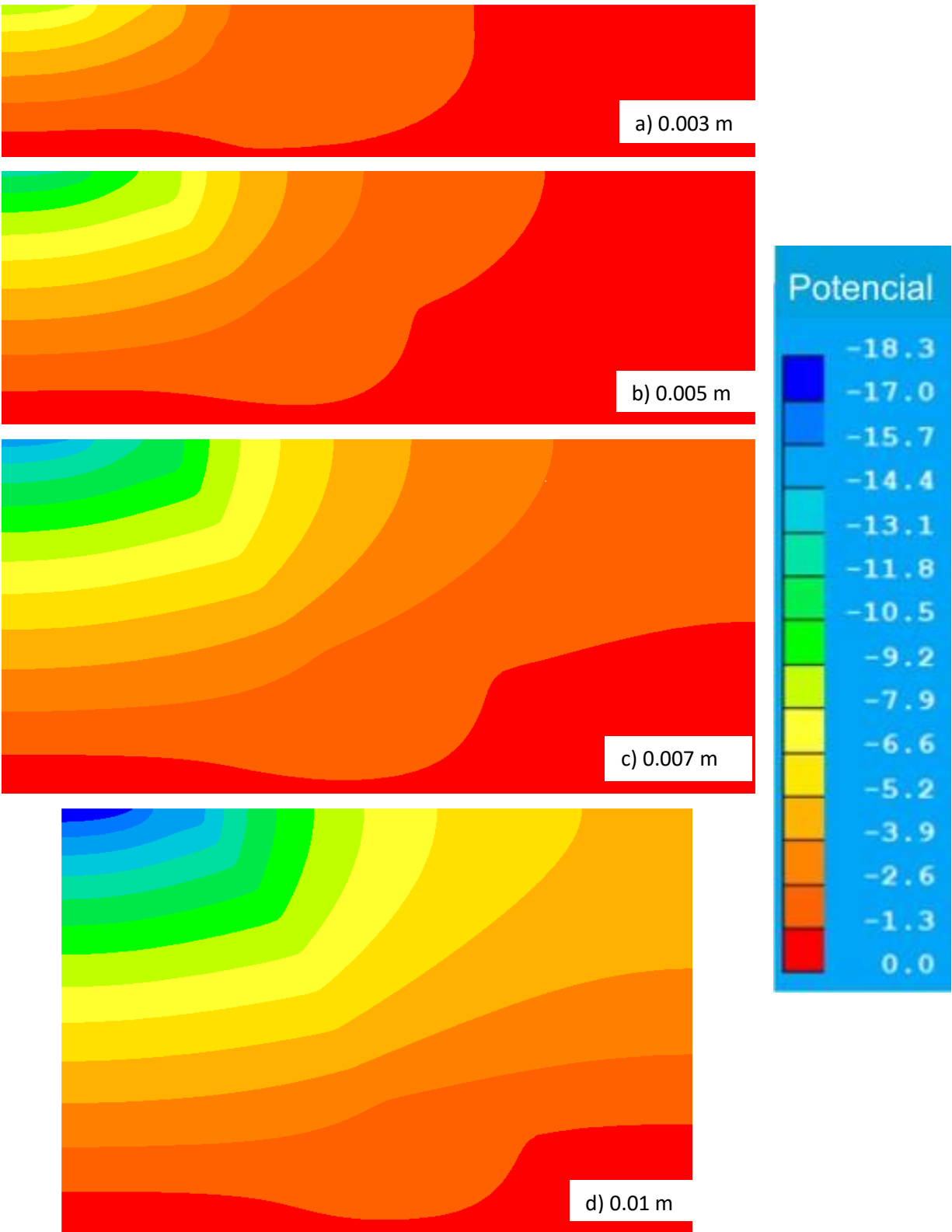


Figura 15. Potencial a diferentes longitudes de arco de: a) 0.003 m, b) 0.005 m, c) 0.007 m y d) 0.01 m con una corriente de  $A= 300$  A para todos los casos.

Además, en la Figura 15 se aprecia que independientemente de la longitud del arco, el gradiente se presenta de manera axial, lo que implica que la componente de la densidad de corriente predominante es también axial. De igual manera con la ley de Ohm se puede explicar que el voltaje sea proporcional a la resistencia del arco (longitud del arco) manteniendo constante la corriente.

### 3.3 Presiones del arco

En la Figura 16, se presentan los perfiles de presión para arcos de soldadura en los que se mantiene una distancia constante entre electrodos de  $L=0.01$  m a diferentes corrientes de 100, 150, 200, 250 y 300 A.

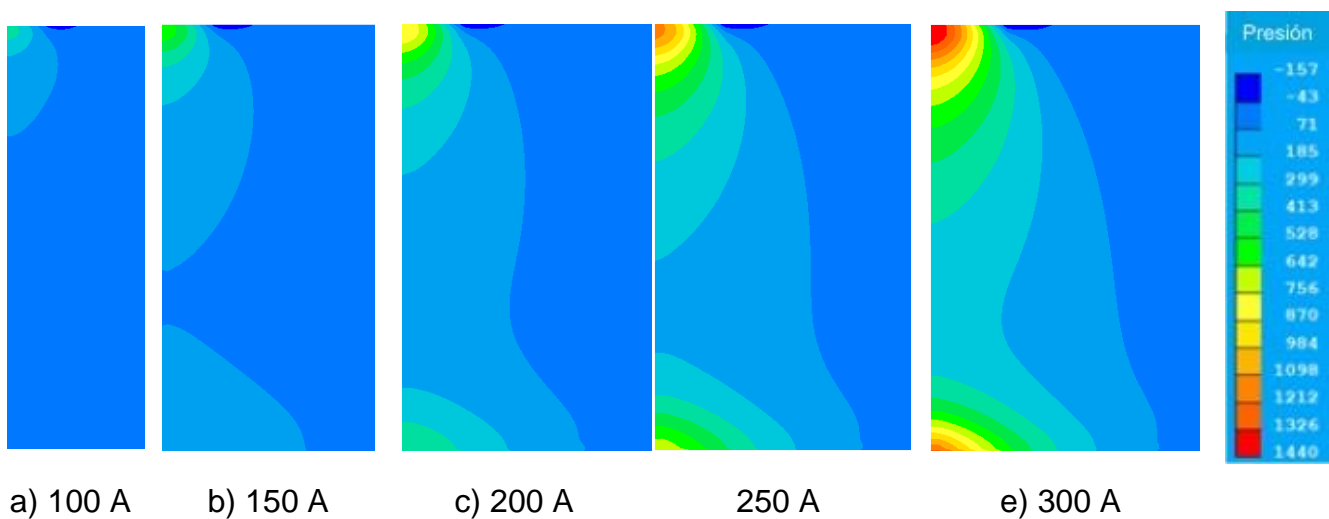


Figura 16. Se presentan diferentes presiones para una fija de 0.01 m y una corrida desde 100 hasta 300 A en intervalos de 50 A.

Se sabe que la presencia de presiones altas cercanas al electrodo de tungsteno están asociadas a un balance entre fuerzas electromagnéticas (de Lorentz) y a los gradientes de presión, de hecho a esta presión en el cátodo se le llama en la literatura presión de Macker, quien fue el primer investigador que explicó, con este balance de fuerzas, la generación del jet de plasma que nace debajo del cátodo. La presión cerca del cátodo es mayor a mayor corriente del arco (mayores fuerzas electromagnéticas), esta presión provoca que el plasma sea direccionado hacia la superficie anódica con alta velocidad; lo que implica que mientras más corriente se aplique al sistema, mayores serán las

fuerzas electromagnéticas que actúan sobre el gas expulsado hacia el charco de soldadura. Las presiones máximas tienen magnitudes que van desde aproximadamente 400 Pa, con una corriente de 100 A hasta 1 440 Pa con corrientes de 300 A.

Además, se observa que se generan zonas de baja presión (expresadas con números negativos aproximadamente de  $-157 \text{ N/cm}^2$ ) en la esquina superior derecha para el sistema  $L=0.01 \text{ m}$  y  $I= 300 \text{ A}$ , lo que explica de igual manera el flujo inducido de gas por efecto de las fuerzas electromagnéticas que puede asemejarse a un bombeo de fluido que provoca que el jet de plasma vaya del cátodo al ánodo.

Por otro lado, también se observa una zona de alta presión cerca de la superficie anódica, que se asocia con el hecho de que el jet dirigido del cátodo al ánodo choca contra el charco de soldadura generando presión sobre el ánodo en el punto de estancamiento, por lo que el jet se ve desviado en dirección radial. A mayor corriente, mayor velocidad del plasma y por lo tanto mayor presión de estancamiento sobre el ánodo.

En la Figura 17 se muestra una gráfica de la presión del arco en función de la coordenada axial, manteniendo fija la longitud del arco en  $0.003 \text{ m}$  y variando la corriente del arco de 100, 150, 200, 250 y 300 A.



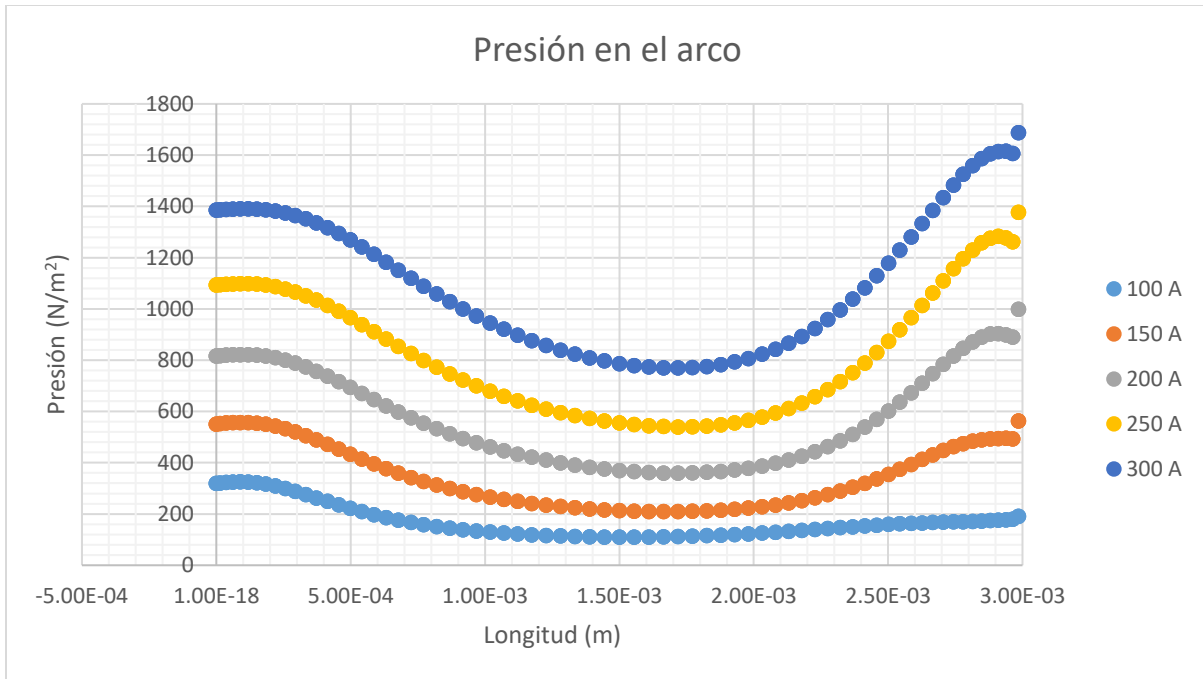


Figura 17. Gráfico de diferentes presiones de arco en el eje simétrico a una distancia  $L=0.003$  m, para diferentes corrientes.

Como se puede observar en la Figura 17, se presenta una alta presión cerca de la superficie catódica; conforme el jet se acerca al ánodo se nota un decremento aproximadamente a la mitad de la longitud del arco y posteriormente se presenta un aumento de presión cerca de la superficie anódica; la diferencia entre la presión presente en la cercanía de los electrodos y la que se genera aproximadamente a la mitad de la longitud del arco se hace más crítica con el aumento de la corriente. El aumento de la corriente provoca un aumento proporcional tanto en la presión de Maecker en el cátodo como en la presión de estancamiento en el ánodo.

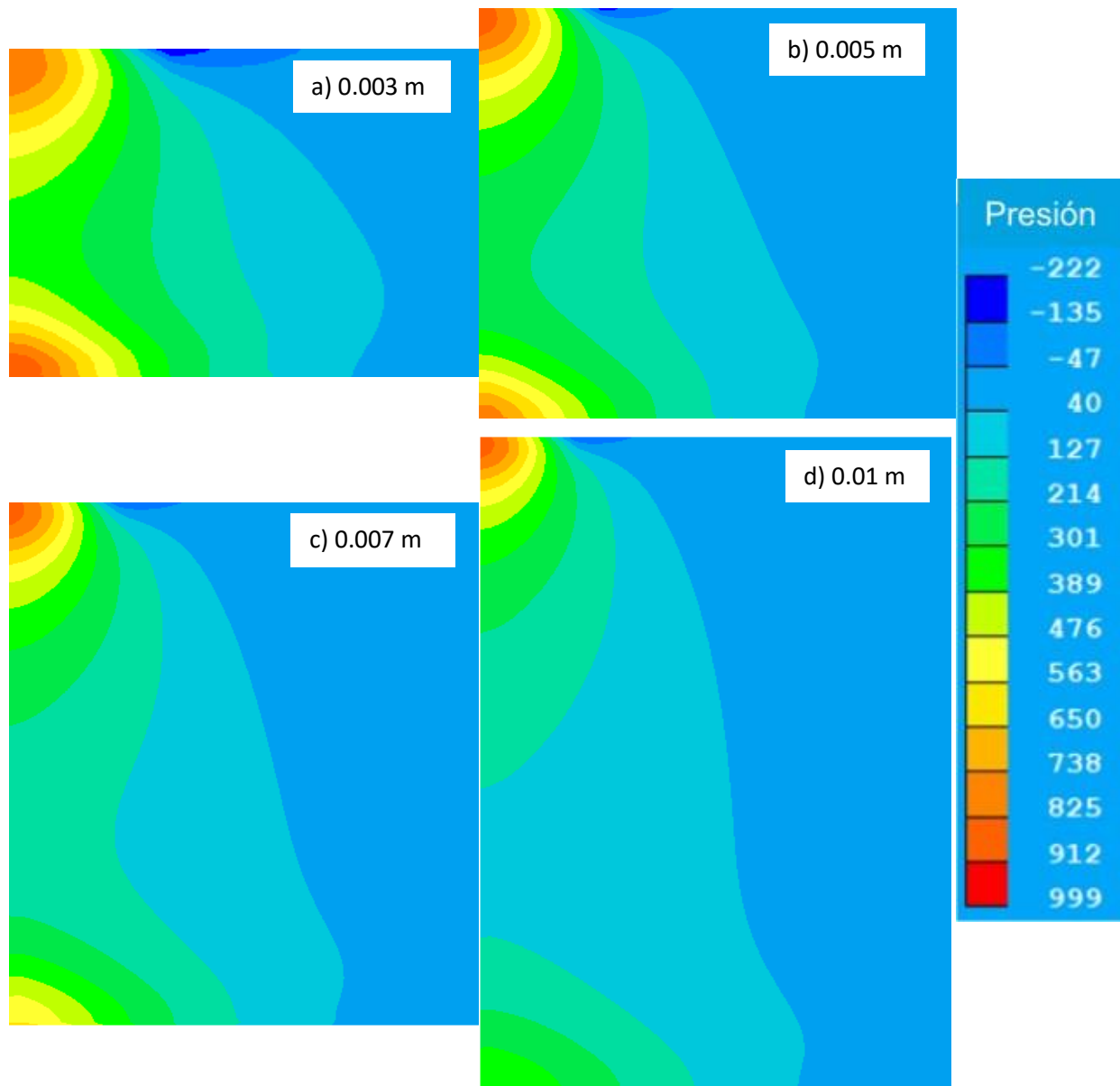


Figura 18. Diferentes perfiles de presión a una corriente  $I = 200$  A a diferentes longitudes de arco: a) 0.003 m, b) 0.005 m, c) 0.007 m y d) 0.01 m.

En la Figura 18, se muestran mapas de presión en arcos con una corriente de 200 A, variando la longitud de 0.003, 0.005, 0.007 y 0.01 m. En esta figura se observa que la presión de Maecker cerca del cátodo no varía en función de la longitud del arco, también se observa que la presión de estancamiento en el ánodo disminuye a medida que aumenta la longitud del arco, esto se explica debido a que el jet de plasma, que se origina con la misma intensidad en el cátodo, va perdiendo momentum al aumentar la distancia entre electrodos, es decir, choca con menor velocidad si el jet recorre mayor distancia.

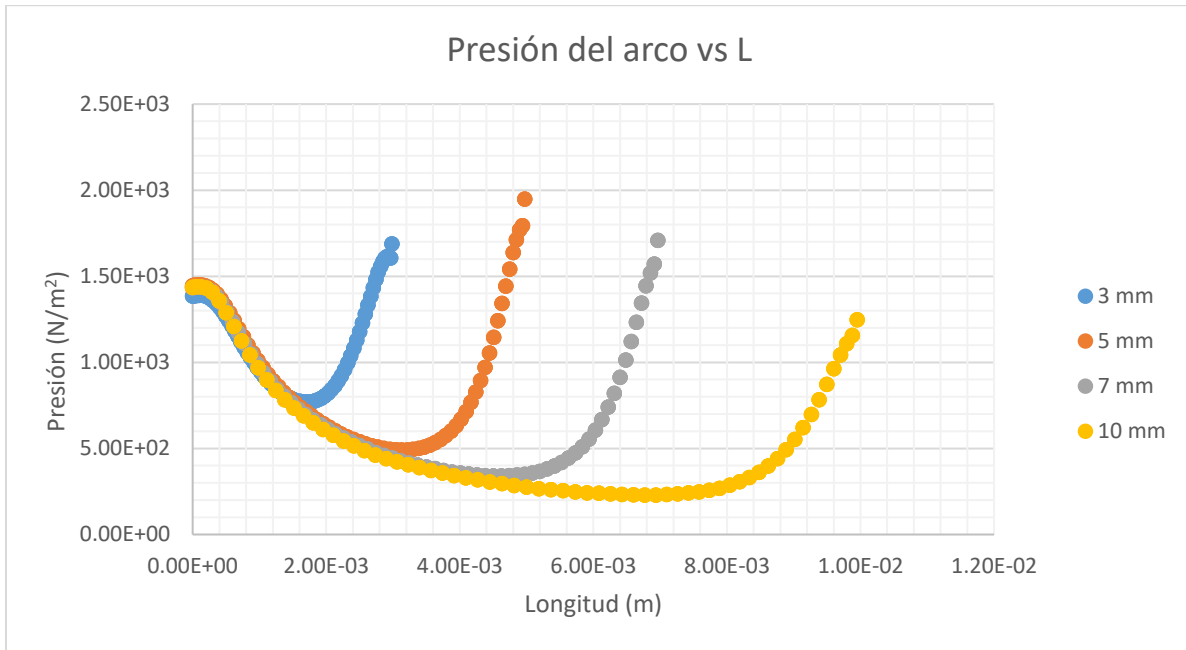


Figura 19. Presiones obtenidas en el eje axial con una corriente constante de 300 A para diferentes longitudes de arco.

En la Figura 19, se presentan perfiles axiales de presión a lo largo del eje de simetría manteniendo la corriente en 300 A y variando la longitud del arco de 0.003, 0.005, 0.007 y 0.01 m, se confirma que la presión cercana al cátodo es muy parecida al variar la longitud manteniendo la misma corriente del arco, es decir, que la presión de Maecker cerca del cátodo solo depende de la corriente. Todos los perfiles presentan prácticamente la misma pendiente del gradiente de presión a lo largo del eje de simetría, hasta que en un punto cercano al charco de soldadura comienza a existir un aumento de presión generado por la interacción que tiene el jet de plasma con la superficie anódica. También se confirma que la longitud del arco si afecta la presión de estancamiento sobre el ánodo y que esta presión crece a medida que disminuye la longitud del arco, ya que este jet choca con mayor inercia sobre el ánodo, a diferencia de un jet asociado a una longitud de arco grande, de menor inercia.

### 3.4 Mecanismos de transferencia de calor

El calor aportado por el arco eléctrico al charco de soldadura está en función de diferentes mecanismos de transferencia de calor: convección, radiación, función trabajo, y efecto Thomson.

En la Figura 20 se presenta un gráfico con las aportaciones de cada uno de los mecanismos de transferencia de calor sobre la soldadura o ánodo para un arco de soldadura con longitud de 0.005 m y corriente de 300 A. Los máximos fluxes de calor están en el centro del sistema (eje de simetría) y conforme se aleja del centro la coordenada radial baja el flux de calor, de todos los mecanismos, con una tendencia gaussiana. Esta forma de los perfiles se asocia a la forma de los perfiles de temperatura, velocidad y presión que tienen relación directa con los perfiles radiales de densidades de corriente que también es gaussiana.

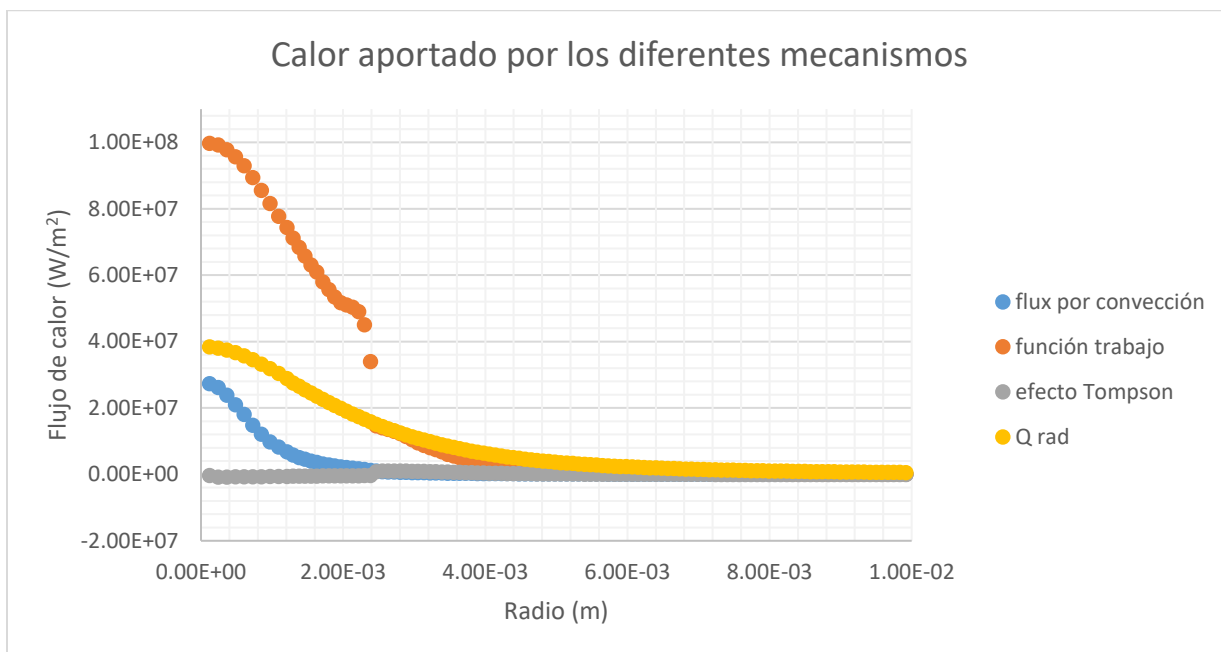


Figura 20. Mecanismos de aportación de calor para la condición de  $L= 0.005$  me  $I= 300$  A.

En la Figura 20 se aprecia que el mecanismo que mayor aportación de calor presenta es la función trabajo. Es pertinente recordar que este mecanismo está asociado a la densidad de corriente sobre el ánodo, que se explica por la condensación de electrones

en dicha superficie, es decir, pasar electrones del plasma al metal libera calor, esto se denomina función trabajo.

A continuación, en orden de importancia, se encuentran el calor transmitido por radiación, flux de calor por convección y efecto Thomson respectivamente.

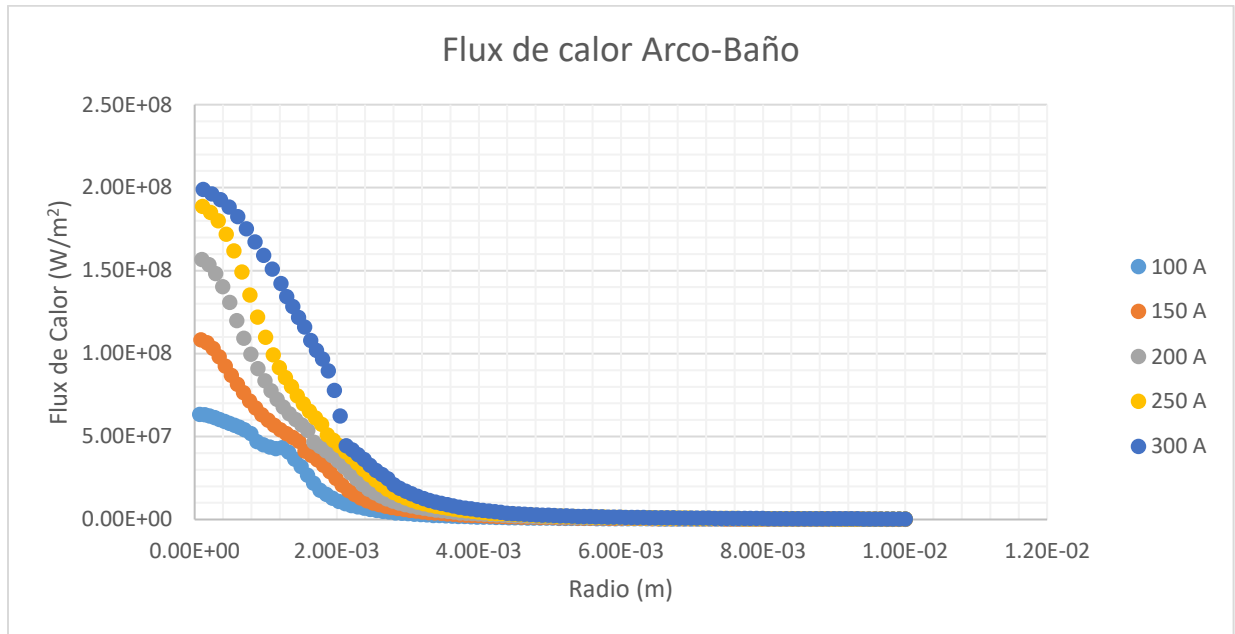
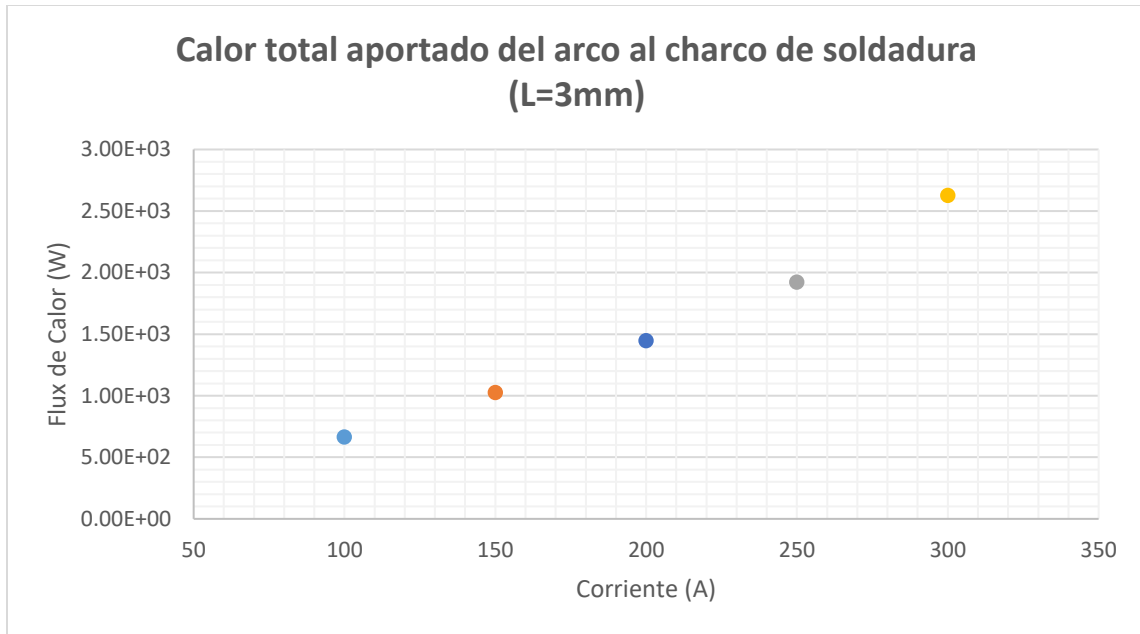


Figura 21. Aportación de calor del arco al baño de soldadura a una distancia de 0.003 m.

El calor aportado por los diferentes mecanismos se suma y se obtiene el flux de calor total aportado por el arco a la soldadura, y una vez sumados se grafican para obtener las curvas de la Figura 21, la cual presenta los fluxes de calor totales para soldaduras con 0.003 m de longitud variando las corrientes del arco, desde 100 hasta 300 A, en donde se aprecia que a mayor corriente aplicada, mayor será la transferencia de calor al charco de soldadura, lo cual es obvio ya que aumenta la densidad de corriente asociada a los mecanismos de función trabajo y efecto Thompson; también aumentan las temperaturas del arco (asociado a la radiación ) y las velocidades del plasma (asociadas a la convección), es decir, un aumento en la corriente del arco provoca un aumento de todos los mecanismos de transferencia de calor del arco a la soldadura.



*Figura 22. Flux de calor aportado del arco al charco de soldadura con longitud de arco de 0.003 m y corrientes de: 100, 150, 200, 250 y 300 A.*

En la Figura 22 se muestran las cantidades de calor aportado al charco de soldadura en una longitud de arco de 0.003 con corrientes aplicadas de 100, 150, 200, 250 y 300 A.

Se observa en la Figura 22 que a mayor corriente, el calor generado por el arco aumenta y se transfiere una parte significativa al charco de soldadura generando la tendencia lineal en congruencia con los fenómenos de transferencia de calor previamente discutidos.

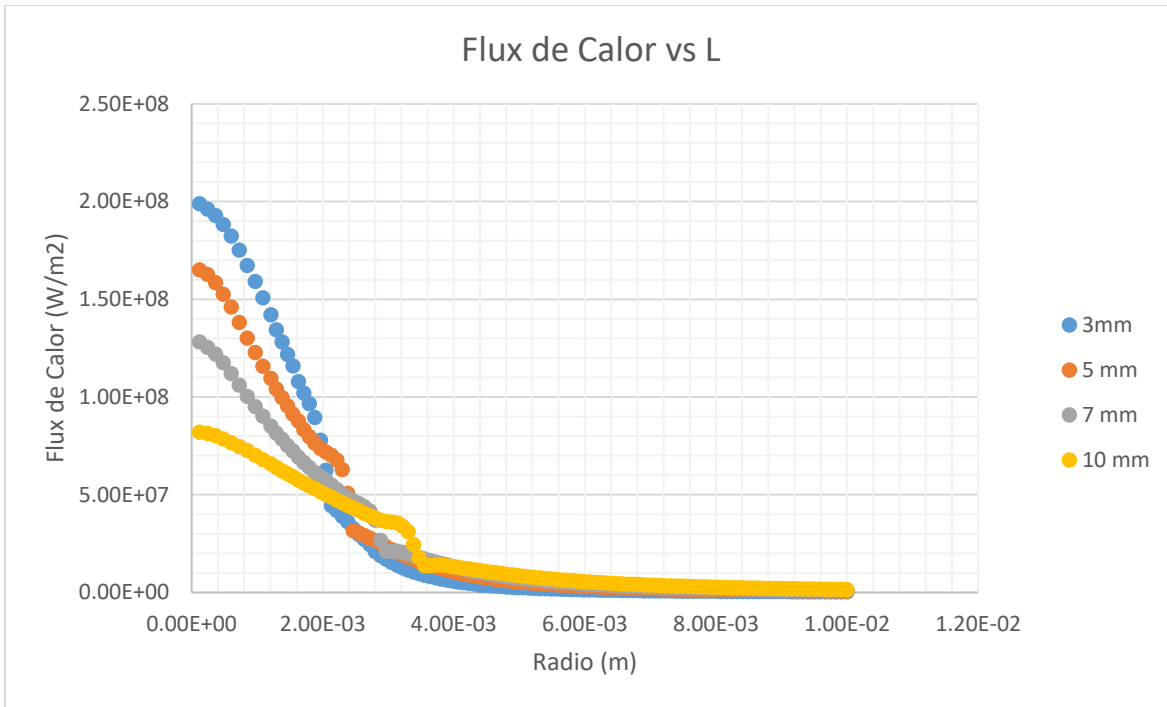


Figura 23. Flux de calor aportado por el arco al baño de soldadura a diferentes longitudes.

A diferencia del aumento de flux de calor asociado al aumento de la corriente aplicada, cuando se incrementa la distancia entre electrodos, el flux de calor disminuye como se observa en la Figura 23, que presenta fluxes de calor para soldaduras con corriente fija de 100 A y distintas longitudes de arco, y en donde se puede apreciar que a longitudes de arco pequeñas el flux de calor será mayor en el centro, esto puede ser debido a que cerca del electrodo se concentran las temperaturas y velocidades máximas. Aumentar la distancia provoca que exista mayor pérdida de energía al aumentar la superficie de contacto entre el arco y los alrededores. También se aprecia que al aumentar la longitud del arco el perfil de flux de calor se hace más ancho.

Las áreas anódicas cercanas al eje de simetría son pequeñas y lejos del eje de simetría son grandes, por lo que es más importante sacar el flujo de calor en watts aportados por unidad de área del ánodo. Por lo que se realizó la integración numérica del flux de calor en toda el área de la soldadura, obteniendo el calor total aportado por el arco sobre la superficie anódica. Un ejemplo ilustrativo de esta integración se muestra en la Tabla 7 para arcos con longitud constante de 0.003 m y varias corrientes de arco; 100, 150, 200, 250 y 300 A (Ver Figura 22 donde se grafican estos datos).

Tabla 7. Cantidad de calor total aportado al charco de soldadura para cada corriente aplicada para una longitud de arco de 0.003 m.

Corriente (A)	Flujo de calor total aportado por el arco al baño (W)
100	6.64E+02
150	1.03E+03
200	1.45E+03
250	1.92E+03
300	2.63E+03

### 3.5 Variable más significativa

Se realizó un análisis estadístico para determinar qué variable es la que presenta mayor efecto sobre la aportación de calor a la superficie anódica, para lo cual se realizó el cálculo del calor total aportado al charco de soldadura para los casos de: [L=0.003 m, I=100 A], [L=0.003 m, I=300 A], [L=0.01 m, I=100 A] y [L=0.01 m, I=300 A], los cuales surgen de proponer un diseño factorial de experimentos con dos variables (longitud de arco y corriente del arco) a dos niveles (para la corriente los niveles bajo de 100 A y alto de 300 A y para la longitud su nivel bajo es de 0.003 m y el alto de 0.01 m).

El efecto que tiene cada una de las variables se obtuvo a través del uso del programa Minitab cuyos resultados se resumen en la Tabla 8.

Tabla 8. Efectos de las variables corriente de arco (L) y corriente de arco (I) sobre el calor total aportado a la soldadura.

Término	Efecto	Coefficiente
I	2 144 W	1 072
L	221.5 W	1 072



El calor promedio aportado por el cambio de 100 A a 300 A es el más significativo ya que en la tabla anterior se observa que tiene un incremento de 2 144 W, mientras que el aporte de calor promedio que presenta el cambio de distancia entre electrodos desde 0.003 a 0.01 metros no es tan significativo ya que solo incrementa 221.5 W de calor aportado a la superficie anódica; de manera que se considera que la variable más significativa y con mayor aportación de calor al sistema es la corriente.

La longitud del arco no presenta variaciones significativas debido a que son las fuerzas de Lorenz, el efecto Joule y la distribución de densidades de corriente las que determinan las temperaturas, velocidades, presiones y flujos de calor al ánodo, las cuales dependen de la corriente más que la longitud del arco.

Como resultado del análisis se presenta la **(Ec 21)**, que se obtuvo por regresión lineal para la predicción del aporte de calor,  $Q$ , para cualquier par de variables de operación, es decir, cualquier corriente ( $I$ ) y longitud de arco ( $L$ ):

$$Q = -260.9 + 9.065 I - 19.36 L + 0.2250 I * L \quad \text{(Ec 21)}$$

El resultado del análisis tiene coherencia debido a que la ecuación de la potencia está representada por la **(Ec 22)**:

$$Potencia = I^2 R \quad \text{(Ec 22)}$$

La potencia está en función del cuadrado de la corriente aplicada, mientras que la resistencia es proporcional a la longitud de arco y la potencia solo varía de manera lineal con  $R$ , mientras que la dependencia con  $I$  (expresada en Amperes) es cuadrática.

## Conclusiones

- 1) Se logró obtener datos congruentes a los reportados en la literatura en cuanto a las características del arco eléctrico de soldadura como voltaje (V), temperatura (T), potencial eléctrico ( $\phi$ ) y presión (P) por medio del uso del software CFD usando un modelo matemático basado en la magnetohidrodinámica del proceso.
- 2) La variable más significativa en cuanto al calor aportado a la superficie anódica es, por mucho, la corriente aplicada, que supera en significancia casi 10 veces a la longitud de arco y que se debe a que la potencia emitida por el arco varía de acuerdo al cuadrado de la corriente de arco, pero solo varía linealmente con la longitud de arco (resistencia eléctrica).
- 3) La corriente es la variable más significativa y por tanto se concluye que a mayor corriente aplicada, mayores temperaturas, mayores velocidades, presiones, corrientes, campos magnéticos y voltajes estarán presentes en el arco, y por lo tanto el efecto que se tiene sobre el charco de soldadura será mayor.
- 4) La longitud no presenta cambios significativos en los fenómenos magnetohidrodinámicos del sistema ya que la temperatura máxima, velocidad máxima, presión máxima y flujo de calor al ánodo no se afectan con esta variable.

**Anexo A. Tabla de siglas de tipos de soldadura con nombre.**

<b>Siglas en inglés</b>	<b>Nombre</b>
FRW	Friction welding
USW	Ultrasonic welding
CW	Cold welding
FOW	Forge welding
ROW	Roll welding
HPW	Hot pressure welding
EXW	Explosion welding
OFW	Oxy fuel welding
PGW	Pressure gas welding
AHW	Atomic hydrogen welding
TW	Thermite welding
CAW	Carbon arc welding
SMAW	Shielded metal arc welding
FCAW	Flux cored arc welding
SW	Socket welding
GTAW	Gas tungsten arc welding
PAW	Plasma arc welding
GMAW	Gas metal arc welding
SAW	Submerged arc welding
EGW	Electrogas welding
MIAB	Magnetically impelled arc butt
RSW	Resistance spot welding
RSEW	Resistance seam welding
PW	Projection welding
PEW	Percussion welding
UW	Upset welding
FW	Flash welding
IW	Induction welding
ESW	Electroslag welding
EBW	Electron beam welding
LBW	Laser beam welding
IR	Infrared welding
DFW	Diffusion welding
DFB	Diffusion brazing

## Índice de Anexos

<i>Anexo A. Tabla de siglas de tipos de soldadura y nombre.....</i>	<i>58</i>
---	-----------

## Índice de Figuras

<b>Figura 1. Tipos de distribución de calor dependiendo de los tipos de corriente utilizada.....</b>	<b>9</b>
<b>Figura 2. Esquema de una soldadura GTAW con los procesos involucrados en la soldadura.....</b>	<b>12</b>
<b>Figura 3. Esquema del dominio de cómputo usado en la simulación CFD. ....</b>	<b>23</b>
<b>Figura 4. Dominio de cálculo mostrando una malla típica. ....</b>	<b>29</b>
<b>Figura 5. Perfil de velocidades para una distancia de 0.003 m y corriente de 300 A. ....</b>	<b>32</b>
<b>Figura 6. Perfiles de velocidad para diferentes corrientes aplicadas con longitud estática en 0.03m, (a) 100A, (b) 150A, (c) 200A, (d) 250 A y (e) 300A.....</b>	<b>33</b>
<b>Figura 7. Efecto de la velocidad en función de la longitud de arco para distancia fija de 0.01 m.....</b>	<b>35</b>
<b>Figura 8. Perfil de velocidades con corriente constante (300 A) a diferentes longitudes de arco (a) 0.003 m, (b) 0.005 m, (c) 0.007 m y (d) 0.01 m. ....</b>	<b>36</b>
<b>Figura 9. Velocidades en función de la distancia entre electrodos variable con una corriente aplicada constante de 300 A.....</b>	<b>37</b>

**Figura 10. Perfil de temperaturas para condiciones de longitud entre electrodos fija  $L=0.003$  m y diferentes corrientes de arco a) 100 A, b) 150 A, c) 200 A, d) 250 A, e) 300 A..... 39**

**Figura 11. Gráfico donde se presentan diferentes Corrientes aplicadas cuando  $L=0.01$  m..... 40**

**Figura 12. Contornos de temperatura para variable de corriente fina  $A= 300$  A a diferentes longitudes de arco a) 0.003 m, b) 0.005 m, c) 0.007 m, d) 0.01 m..... 41**

**Figura 13. Perfil de temperaturas a 300 A para diferentes longitudes de arco..... 42**

**Figura 14. Contornos de potencial para diferentes corrientes a) 100 A, b) 150 A, c) 200 A, d) 250 A, e) 300 A en una longitud de arco de 0.003 m..... 43**

**Figura 15. Potencial a diferentes longitudes de arco de: a) 0.003 m, b) 0.005 m, c) 0.007 m y d) 0.01 m con una corriente de  $A= 300$  A para todos los casos..... 45**

**Figura 16. Se presentan diferentes presiones para una fija de 0.01 m y una corrida desde 100 hasta 300 A en intervalos de 50 A. .... 46**

**Figura 17. Gráfico de diferentes presiones de arco en el eje simétrico a una distancia  $L=0.003$  m, para diferentes corrientes. .... 48**

**Figura 18. Diferentes perfiles de presión a una corriente  $I= 200$  A a diferentes longitudes de arco: a) 0.003 m, b) 0.005 m, c) 0.007 m y d) 0.01 m..... 49**

**Figura 19. Presiones obtenidas en el eje axial con una corriente constante de 300 A para diferentes longitudes de arco. .... 50**

**Figura 20. Mecanismos de aportación de calor para la condición de  $L= 0.005$  m e  $I= 300$  A. .... 51**

**Figura 21. Aportación de calor del arco al baño de soldadura a una distancia de 0.003 m. .... 52**

**Figura 22. Flux de calor aportado del arco al charco de soldadura con longitud de arco de 0.003 m y corrientes de: 100, 150, 200, 250 y 300 A. .... 53**

**Figura 23. Flux de calor aportado por el arco al baño de soldadura a diferentes longitudes. .... 54**

## Índice de Tablas

<b>Tabla 1. Ejemplos de procesos de soldadura con arco eléctrico. ....</b>	<b>7</b>
<b>Tabla 2. Lista de varias fuentes de energía fundamentales y específicas para los procesos de soldadura. ....</b>	<b>10</b>
<b>Tabla 3. Temperatura de arcos eléctricos para varios gases. [6] .....</b>	<b>12</b>
<b>Tabla 4. Resumen de condiciones a la frontera para el Sistema de estudio. ....</b>	<b>28</b>
<b>Tabla 5. Matriz experimental en computadora con los casos a correr en el simulador CFD.....</b>	<b>31</b>
<b>Tabla 6. Valores máximos alcanzados por los perfiles de velocidad. ....</b>	<b>37</b>
<b>Tabla 7. Cantidad de calor total aportado al charco de soldadura para cada corriente aplicada para una longitud de arco de 0.003 m.....</b>	<b>55</b>
<b>Tabla 8. Efectos de las variables corriente de arco (L) y corriente de arco (I) sobre el calor total aportado a la soldadura.....</b>	<b>55</b>



## Bibliografía

- [1] L. Jeffus, Soldadura: principios y aplicaciones., 5° Edición ed., España: Paraninfo, S. A. , 2009.
- [2] R. C. Grados, «Revista Cero Grados Celcius,» Noviembre 2017. [En línea]. Available: <https://www.0grados.com/soldadura-metodos-y-fundamentos/>.
- [3] R. W. MESSLER Jr., PRINCIPLES OF WELDING, Troy, NY: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 1999.
- [4] L. Jeffus, MANUAL DE SOLDADURA GTAW (TIG), 1° Edición ed., España: Paraninfo S. A., 2010, p. Pag. 2.
- [5] Welding Handbook, Seventh Edition ed., vol. Volume Three, Miami, FL: American Welding Society, 1980.
- [6] J. Lancaster, Metallurgy for Welding, 5th ed. ed., London: Chapman & Hall, 1993.
- [7] M. A. Ramirez, Mathematical Modeling of D.C. Electric Arc Furnace Operation, Massachusetts Institute of Technology, 2000, p. 245.
- [8] K. Hsu, K. Etemadi y E. Pfender, «Study of the free-burning high-intensity argon arc,» *Journal of Applied Physics*, p. 54, 16 August 1983.
- [9] J. Mc.KELLIGET y J. SZEKELY, «Heat Transfer and Fluid Flow in the Welding Arc,» *Metallurgical Transactions A.*, vol. VOLUME 17A, p. 1139, July 1986.
- [10] L. Sansonnens, J. Haidar y J. J. Lowke, «Prediction of properties of free burning arcs including effects of ambipolar diffusion,» *IOP Publishing Ltd*, pp. 148-157, 2000.
- [11] J. Lowke, R. Morrow y J. J Haidar, «A simplified unified theory of arcs and their electrodes,» *Phys. D: Appl. Phys.*, pp. 30 2033-42, 1997.
- [12] N. A. Sanders y E. Pfender, «Measurement of anode falls and anode heat transfer in atmospheric pressure high intensity arcs,» *J. Appl. Phys.*, pp. 795-801, 1984.
- [13] M. Tanaka, H. Terasaki, M. Ushio y J. J. Lowke, «A Unified Numerical Modeling of Stationary Tungsten-Inert-Gas Welding process,» *Metallurgical and Materials Transactions A*, vol. VOLUME 33A, pp. 2043-2052, July 2002.

- [14] CHAM, «ENCYCLOPEDIA CHAM,» 2017. [En línea]. Available: [http://www.cham.co.uk/phoenics/d\\_polis/d\\_docs/tr001/tr001.htm#what](http://www.cham.co.uk/phoenics/d_polis/d_docs/tr001/tr001.htm#what). [Último acceso: Diciembre 2017].
- [15] B. Spalding, «CONWIZ: The 'Convergence-Promoting Wizard' for PHOENICS,» 2017. [En línea]. Available: [http://www.cham.co.uk/phoenics/d\\_polis/d\\_lecs/conwiz/conwiz.htm#0](http://www.cham.co.uk/phoenics/d_polis/d_lecs/conwiz/conwiz.htm#0).