



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**FACULTAD DE QUÍMICA**

**EFFECTO DE LA CORRIENTE Y LA LONGITUD DEL ARCO SOBRE LAS  
CARACTERÍSTICAS DEL ARCO EN SOLDADURA ARDIENDO EN CO<sub>2</sub>**

**TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE**

**INGENIERA QUÍMICA METALÚRGICA**

**PRESENTA**

**ANA MARLENE MORALES RAMÍREZ**

**DIRECTOR DE TESIS**

**MARCO AURELIO RAMÍREZ ARGÁEZ**



**Ciudad Universitaria, CD. MX., 2019**



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: ARTURO ALEJANDRO SANCHEZ SANTIAGO

**VOCAL:** Profesor: MARCO AURELIO RAMIREZ ARGAEZ

**SECRETARIO:** Profesor: EUDOXIO ALBERTO RAMOS GOMEZ

**1er. SUPLENTE:** Profesor: GERARDO SANJUAN SANJUAN

**2° SUPLENTE:** Profesor: DIEGO ALBERTO ABREU LOPEZ

**SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA: LABORATORIO 203, 1ER PISO,  
EDIFICIO D, FACULTAD DE QUIMICA.**

**ASESOR DEL TEMA:**

MARCO AURELIO RAMIREZ ARGAEZ

**SUSTENTANTE:**

ANA MARLENE MORALES RAMIREZ

## **Agradecimientos.**

Investigación realizada gracias al Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT) de la UNAM, con el proyecto clave IN115617, titulado “Determinación de las características magneto hidrodinámicas de plasmas de soldadura mediante simulación numérica y teoría de escalamiento”, al cual agradezco por la beca recibida.







# Índice.

CAPÍTULO 1: Introducción. ....	9
¿Qué es la soldadura? .....	9
Tipos de soldadura.....	9
Proceso de soldadura de arco eléctrico.....	10
Tipos de electrodos.....	12
Clasificación de electrodos. ....	14
Elección del tipo de electrodo.....	16
Selección del diámetro. ....	17
Punta del electrodo. ....	17
Geometría de la punta. ....	18
Aplicaciones para la soldadura GTAW. ....	19
Posiciones para soldar. ....	19
Metal de aporte. ....	21
Gases de protección. ....	22
Soldadura de arco de tungsteno y gas (GTAW).....	23
Tipo de corriente y polaridad. ....	24
La física de la energía de soldadura o fuentes de poder. ....	26
Electricidad para soldar. ....	27
Plasma. ....	28
Revisión bibliográfica. ....	33
Hipótesis. ....	39
Objetivo. ....	39
CAPÍTULO 2: Metodología de trabajo. ....	41
Suposiciones. ....	41
Región del charco de soldadura. ....	45
Condensación de electrones. ....	45
Transferencia de calor por convección. ....	46
Transferencia de calor por radiación. ....	46
Efecto Thompson. ....	47
Condiciones de Frontera. ....	47
Técnica de solución. ....	49



<i>Software utilizado</i> .....	49
<i>Archivo Q1</i> .....	50
<i>Archivo Ground.for</i> .....	50
<i>Diseño de experimentos</i> .....	50
<i>Propiedades de los gases</i> .....	51
<i>Propiedades termofísicas</i> .....	51
<i>Coefficientes de transporte</i> .....	53
<i>Coefficiente de emisión de radiación</i> .....	55
CAPÍTULO 3: Resultados y discusión de resultados.....	56
<i>Diseño factorial de experimentos en computadora</i> .....	69
<i>Comparación del CO<sub>2</sub> y Ar como gas de cobertura</i> .....	73
CAPÍTULO 4: Conclusiones.....	78
Bibliografía.....	80
CAPITULO 6: Apéndices.....	83
<i>Lista de símbolos</i> .....	83
<i>Índice de Figuras</i> .....	85
<i>Índice de Tablas</i> .....	88
<i>Anexo A</i> .....	89

## **CAPÍTULO 1: Introducción.**

### ***¿Qué es la soldadura?***

La soldadura es un proceso de unión de dos o más materiales, que pueden ser metales o termoplásticos. La unión se da de forma interatómica en los bordes de estos y durante este proceso se puede utilizar diversos tipos de dispositivos para obtener el calor necesario, con o sin ayuda de presión, o bien la presión necesaria, con o sin ayuda de calor, para fundir los bordes del metal en forma controlada.

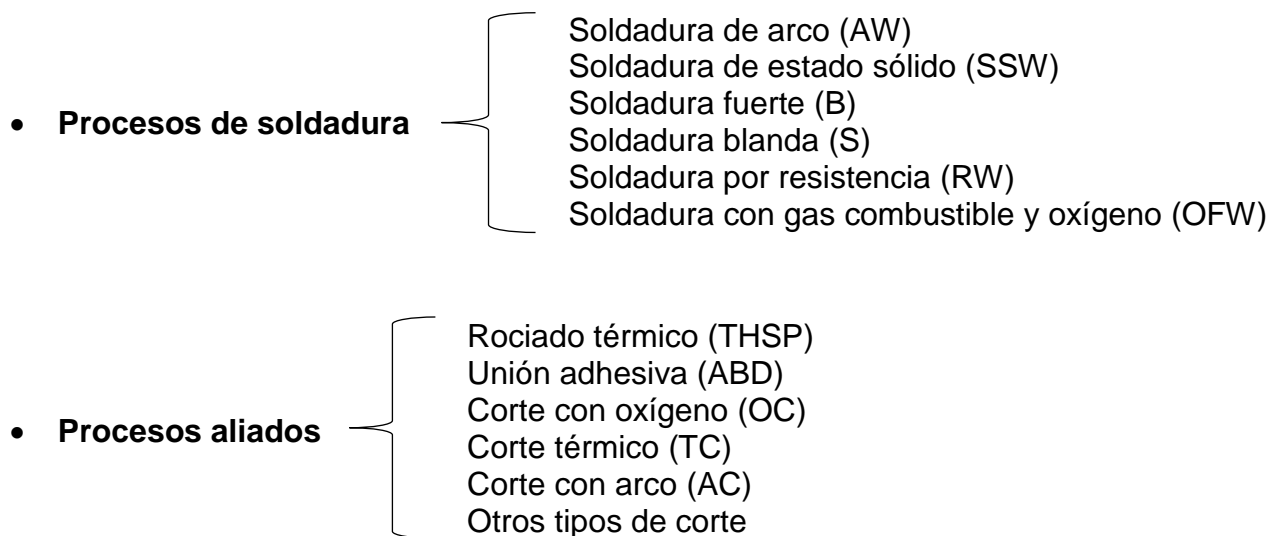
En la mayoría de los procesos de soldadura se utiliza el calor como medio para aumentar la cercanía de los átomos y lograr la unión interatómica, esto logrado por medio de la fusión del material base y/o de un material de aporte realizando el empalme de las piezas al solidificarse.

### ***Tipos de soldadura.***

En los procesos de soldadura más comunes, hay varias fuentes diferentes de calor y diversos métodos para controlarlo y enfocarlo. Se han desarrollado, de hecho, más de 40 procedimientos diferentes de soldadura basados en el calor. Sin embargo, estos distintos procesos pueden agruparse en tres categorías:

- El proceso de soldadura de arco, que obtiene calor de un arco eléctrico y lo mantiene entre dos electrodos o entre un electrodo y la pieza de trabajo.
- El proceso de soldadura de gas que obtiene el calor en forma de una llama, mediante la mezcla de oxígeno y algún otro gas combustible, que generalmente es acetileno.
- El proceso de soldadura por resistencia, que obtiene el calor de la resistencia que ofrece la pieza de trabajo al paso de una corriente eléctrica.

En el esquema de la Figura 1 se presentan los procesos de soldadura comunes y los procesos relacionados.



**Figura 1. Esquema de los procesos de soldadura y procesos aliados.**

**Proceso de soldadura de arco eléctrico.**

El término de soldadura por arco eléctrico aplica a un gran y diverso grupo de procesos de soldadura que utilizan un arco eléctrico como fuente de calor. La formación del arco eléctrico depende del paso de corriente eléctrica entre dos electrodos, uno en el metal base a unir (ánodo) y otro en el electrodo consumible en forma de alambre (cátodo) que también sirve como material de aporte a la soldadura, formando un plasma por medio de la ionización de un gas.

La energía se puede obtener de una fuente eléctrica o electromagnética de tres maneras distintas:

- Un arco eléctrico.
- Resistencia al flujo directo de corriente en un circuito o a las corrientes inducidas en la pieza de trabajo.
- Energía radiante de alta intensidad o rayos en los cuales la energía cinética de las partículas en el campo o haz de irradiación se convierte en calor por colisiones con átomos en la pieza de trabajo.

Los procesos de soldadura de fusión que emplean un arco eléctrico como fuente de calor se denominan procesos de soldadura por arco (ver Tabla 1). Más procesos utilizan esta fuente que cualquier otra fuente, principalmente porque el calor para la fusión puede generarse, concentrarse y controlarse efectivamente.

**Tabla 1. Algunos procesos de soldadura de arco con fusión.**

Tipo de soldadura en español	En inglés y sus iniciales
Soldadura de hidrógeno atómico (arco)	Atomic hydrogen (arc) welding AHW
Soldadura por arco de carbono	Carbon arc welding CAW
Soldadura por electro gas	Electro gas welding EGW
Soldadura por electro escoria	Electroslag welding ESW
Soldadura por arco con núcleo de fundente	Flux-cored arc welding FCAW
Soldadura por arco de gas y metal	Gas metal arc welding GMAW
Soldadura de arco y tungsteno y gas	Gas tungsten arc welding GTAW
Impulso magnético a tope de arco	Magnetically impelled arc butt welding MIAB
Soldadura por arco de plasma	Plasma arc welding PAW
Soldadura por arco de metal blindado	Shielded metal arc welding SMAW
Soldadura por arco de prueba	Stud arc welding SW
Soldadura por arco sumergido	Submerged arc welding SAW

El arco en la soldadura de arco, se crea entre un electrodo y una pieza de trabajo o una pieza soldada, cada uno a diferentes polaridades. El arco en sí consiste en electrones emitidos térmicamente junto con iones positivos de un gas que coexisten entre el electrodo y la pieza de trabajo. Estos iones positivos y electrones son acelerados por el potencial del campo (voltaje) entre la fuente (un electrodo) y el electrodo de trabajo (el electrodo cargado opuesto), y producen calor cuando convierten su energía cinética por colisión con el elemento cargado opuesto. Aunque los electrones son mucho menos masivos que todos los iones positivos

(aproximadamente 1/1850 de la masa de un protón o ion de hidrógeno positivo), tienen una energía cinética mucho mayor porque pueden acelerarse a velocidades mucho más altas bajo la influencia de un campo eléctrico dado.

El electrodo en el circuito puede ser permanente, sirviendo únicamente como fuente de electrones o iones positivos, o consumido, en cuyo caso sirve como fuente de energía para soldar desde estas partículas y como relleno a la junta de soldadura. Si el electrodo está destinado a ser permanente, los procesos se denominan procesos de soldadura por arco con electrodos permanentes o, más comúnmente, procesos de soldadura por arco de electrodos no consumibles. Si el electrodo está destinado a ser consumido, los procesos se denominan procesos de soldadura por arco de electrodos consumibles.

### ***Tipos de electrodos.***

En la soldadura GTAW se emplea un electrodo de tungsteno, debido a sus altas temperaturas de fusión (3410°C), pero debe estar protegido de la oxidación con la ayuda de un gas inerte.

Existen diferentes tipos de aleaciones para obtener el resultado óptimo en el encendido del arco, la estabilidad del arco y la disminución de la erosión de la punta. Las clasificaciones ISO 6848 y AWS 5.12 de los electrodos de tungsteno se basan en la composición química del electrodo, como se indica en la Tabla 2. La tabla reporta además, el sistema de identificación por colores para las diferentes clases de electrodos de tungsteno (ver Figura 2). Los electrodos deben estar libres de todo tipo de contaminación como polvo o grasa, libre de humedad así como las superficies a soldar e imperfecciones en la superficie del electrodo; por ello, se tienen que producir ya sea con un acabado químico de limpieza, en el cual las impurezas sean removidas después de la operación de moldeado, o con un acabado de lijado sin centro, en el cual las imperfecciones de la superficie sean removidas al lijarse.



Figura 2. Imagen que muestra los diferentes electrodos de Tungsteno.

Tabla 2. Codificación por color y elementos de amalgama para varias aleaciones para electrodos de tungsteno.

(a) El color puede estar aplicado en forma de bandas, puntos, u otros, en cualquier punto de la superficie del electrodo (ver Figura 2).

(b) El fabricante debe identificar el tipo y el contenido nominal de la tierra rara u otros agregados de óxido.

Clasificación de la AWS A5.12	Clasificación de la ISO 6848	Elemento aleado	Oxido amalgamante	% del óxido	% de impurezas	% de W
EWP	WP	-	-	-	<0.2	x>99.8
EWCe-2	WC20	Cerio	CeO <sub>2</sub>	1.8 - 2.2	<0.2	97.8<x<98
EWLa-1	WL10	Lantano	La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.8 - 1.2	<0.2	98.8<x<99
EWLa-1.5	WL15	Lantano	La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.4 - 1.6	<0.2	X=98.4
EWLa-2	WL20	Lantano	La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.9 - 2.1	<0.2	X=97.
EWZr-3	WZ3	Zirconio	ZrO <sub>2</sub>	0.2 - 0.4	<0.2	X=99.6
EWZr-8	WZ8	Zirconio	ZrO <sub>2</sub>	0.7 - 0.9	<0.2	X=99.1
EWG	WY20	Itrio	YO <sub>2</sub>	1.8 - 2.2	<0.2	97.8<x<98
EWTh-2	WT20	Torio	ThO <sub>2</sub>	1.7 - 2.2	<0.2	97.8<x<98.1
EWG		No especificado (b)	-	-	-	-

### ***Clasificación de electrodos.***

A continuación, se encuentran algunas descripciones breves de las clasificaciones de los electrodos.

Clasificación de electrodos EWP. Los electrodos de tungsteno puro (EWP) contienen un mínimo de 99.5% de tungsteno, sin elementos de aleación intencionales. Se consideran electrodos de bajo costo y normalmente se usan para soldar aleaciones de magnesio y aluminio. La capacidad de transporte de corriente de los electrodos de tungsteno puro es más baja que aquella de los electrodos de aleaciones. Proporcionan buena estabilidad de arco cuando se usan con corriente alterna, ya sea de frecuencia de onda balanceada o alta continua. La punta del electrodo EWP conserva un extremo limpio y redondeado que facilita la buena estabilidad de arco. Los electrodos EWP pueden usarse con DC (corriente directa por sus siglas en inglés), pero no proporcionan las características de iniciación y estabilidad de arco que ofrecen los electrodos toriados, ceriados, o lantanados.

Clasificación de electrodos EWTh. En estos electrodos, la emisión termoiónica de tungsteno puede mejorarse con la aleación del tungsteno con óxidos de metal que tengan muy bajas funciones de trabajo. Como resultado, estos electrodos pueden usarse con corrientes de soldadura más elevadas. El óxido de torio ( $\text{ThO}_2$ ), llamado toria, es uno de estos aditivos. Se encuentran disponibles dos tipos de electrodos de tungsteno toriado. Los electrodos EWTh-1 y EWTh-2 contienen 1% y 2% de toria, respectivamente, disperso de manera regular a lo largo de todo el electrodo. Cuando se comparan con electrodos de tungsteno puro (EWP), los electrodos de tungsteno toriado proporcionan una capacidad de transporte de corriente 20% más alta, generalmente tienen una vida más larga, y presentan mayor resistencia a la contaminación de la soldadura. El inicio del arco es más sencillo y el arco es más estable que con electrodos de tungsteno puro o zirconiado. Los electrodos EWTh-1 y EWTh-2 fueron diseñados para aplicaciones de DCEN (Electrodo de corriente continua negativo por sus siglas en inglés) ya que mantienen una configuración de punta afilada durante la soldadura, la geometría deseada para operaciones de

soldadura. Aunque el torio es un material de bajo nivel radioactivo, si la soldadura se va a realizar en espacios confinados por un período de tiempo prolongado, o si se corriera el riesgo de ingerir el polvo de las limaduras del electrodo, se deben tener en consideración precauciones especiales de ventilación.

Clasificación de electrodos EWCe. Introducidos por primera vez al mercado norteamericano a principio de los 1980s, estos electrodos se desarrollaron como posibles reemplazos para los electrodos toriados ya que el cerio no es un elemento radioactivo. Los electrodos EWCe-2 contienen 2% de óxido de cerio ( $\text{CeO}_2$ ), al que se le da el nombre de ceria. Comparados con los de tungsteno puro, los electrodos ceriados facilitan el inicio del arco, mejoran la estabilidad del arco, y reducen la tasa de vaporización o consumo. Las ventajas de los electrodos ceriados mejoran en proporción al incremento en el contenido de ceria. Los electrodos EWCe-2 operan con éxito con AC (corriente alterna por sus siglas en inglés) o DC de cualquier polaridad.

Clasificación de electrodos EWLa. Los electrodos con agregados de óxido de lantano se desarrollaron aproximadamente al mismo tiempo que los electrodos ceriados y por la misma razón. El lantano no es radioactivo. Las ventajas y características de operación son similares a aquellas de los electrodos EWCe-2. Están disponibles en tres tipos: EWLa-1, EWLa-1.5, y EWLa2. Los electrodos EWLa-1 contienen 1% de óxido de lantano ( $\text{La}_2\text{O}_3$ ) al que se le refiere como lantana. Las ventajas y características de estos electrodos son muy similares a las de los electrodos de tungsteno ceriado, lo cual facilita el inicio y la estabilidad del arco, reduce la tasa de erosión de la punta, y extiende el rango de corriente de operación. Los electrodos EWLa-2 contienen 2% de óxido de lantano disperso; este es el volumen más alto de óxido de cualquiera de los tipos específicos de electrodos señalados por la AWS de un solo aditivo. El alto contenido de óxido mejora el inicio y la estabilidad del arco, reduce la tasa de erosión de la punta, y extiende el rango de corriente de operación. Están particularmente recomendados para la soldadura de materiales puros o de aleaciones de aluminio, titanio, níquel, cobre y magnesio.



Clasificación de electrodos EWZr. Los electrodos de tungsteno zirconiado (EWZr) contienen 0.25% de óxido de zirconio ( $ZrO_2$ ). Tienen las características de soldadura que por lo general caen entre aquellas de los electrodos de tungsteno puro y las de los electrodos de tungsteno toriado. Con la soldadura AC, EWZr combina las características deseables de estabilidad de arco y un extremo redondeado típico del tungsteno puro, con la capacidad de corriente y las características de inicio del tungsteno toriado. Tienen más alta resistencia a la contaminación que el tungsteno puro y son preferibles para las aplicaciones de soldadura de calidad radiográfica donde la contaminación del tungsteno de la soldadura se debe reducir al mínimo.

Clasificación de electrodos EWG. Esta clasificación se asigna a las aleaciones que no se cubren en las clases anteriores. Estos electrodos contienen un agregado no especificado de un óxido no especificado o combinación de óxidos. El propósito del agregado es mejorar la naturaleza o las características del arco, como lo define el fabricante. Muchos electrodos EWG están comercialmente disponibles o están en desarrollo. Estos incluyen electrodos con agregados de óxido de ltrio u óxido de magnesio. Esta clasificación incluye además a los electrodos ceriados o lantanados que contienen estos óxidos en cantidades distintas a aquellas enlistadas, o en combinación con otros óxidos.

### ***Elección del tipo de electrodo.***

La elección del tipo de electrodo va a depender en gran medida del tipo de material que se quiere soldar, del tipo de corriente con que se va a trabajar ya que debe ser compatible con el diámetro y tipo de clasificación del electrodo, cabe mencionar que los electrodos de tungsteno deben cumplir con la AWS A5.12, Specification for tungsten alloy electrodes for arc welding and cutting (Especificación para electrodos de aleación de tungsteno para soldadura de arco y corte) [29], así como de las características operativas, sin embargo, si se selecciona un electrodo incorrecto o

se aplica un amperaje demasiado alto algunas partículas del electrodo pueden transferirse a través del arco.

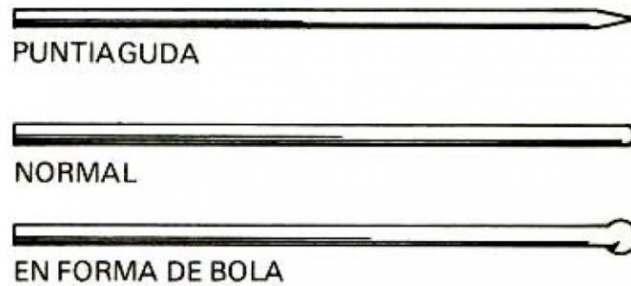
### ***Selección del diámetro.***

La selección del diámetro del electrodo se deberá efectuar teniendo en cuenta que no debe ser muy pequeño para que no se corra el riesgo de fundir el extremo, ni muy grande para que conduzca a una inestabilidad del arco como consecuencia de la disminución de la emisión electrónica debido al bajo calentamiento del electrodo, es decir, está directamente relacionado con el amperaje a utilizar. Comercialmente se fabrican en diámetros desde 0.5 mm hasta 6 mm. Se debe tomar en cuenta que:

- Un electrodo de diámetro fino inicia el arco más fácilmente que uno grueso.
- Si el diámetro es demasiado grande para un amperaje determinado es probable que el arco se torne inestable.
- Si el diámetro es demasiado pequeño para un amperaje determinado es probable que la punta se erosione demasiado rápido.

### ***Punta del electrodo.***

La punta de los electrodos inicialmente no tiene forma, la misma se le debe de dar antes de ser usados, ya sea por maquinado, desbaste o fundiéndolos y dependerán del uso que se le dé a las mismas. Las formas pueden ser de tres tipos básicos: en punta, media caña y bola (ver Figura 3), el afilado se debe realizar en sentido longitudinal al electrodo de forma que se favorezca el paso de la corriente (ver Tabla 3) y generalmente entre 15 grados y 60 grados.



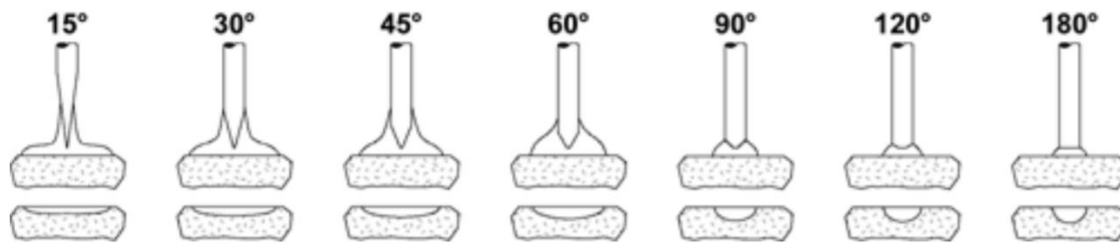
**Figura 3. Imagen que muestra la posible forma de la punta de los electrodos.**

**Tabla 3. Diferencias en los arcos según el afilado del electrodo.**

Electrodos muy afilados	Electrodos poco afilados
Inicio del arco fácil	Generalmente más difícil para iniciar el arco
Manejo de corrientes bajas	Manejo de corrientes altas
Arco más amplio	Arco más estrecho
Buena estabilidad del arco	Potencia la pérdida del arco
Menos penetración	Mejor penetración
Menor vida útil	Mayor vida útil

### **Geometría de la punta.**

La selección de la geometría de la punta del electrodo en DC, afectara el tamaño del arco de soldadura y la cantidad de penetración. La Figura 4 muestra las representaciones típicas de la forma del arco y del perfil resultante de la soldadura para diversos ángulos. Mientras que en la soldadura con AC la punta se redondea sola, producto del cambio de polaridad constante.



**Figura 4. Forma del arco y perfil de la zona de fusión en función del ángulo del electrodo.**

### ***Aplicaciones para la soldadura GTAW.***

La aplicación industrial de la soldadura GTAW es extensa aplicándose a todos los metales ligeros tales como Aluminio, Magnesio y aleaciones. Aceros inoxidables (Cromo, Níquel, y aleaciones). Cobre y sus aleaciones. Plomo, Plata, Oro, Aceros al Carbono, Metales diferentes entre sí, etc.

### ***Posiciones para soldar.***

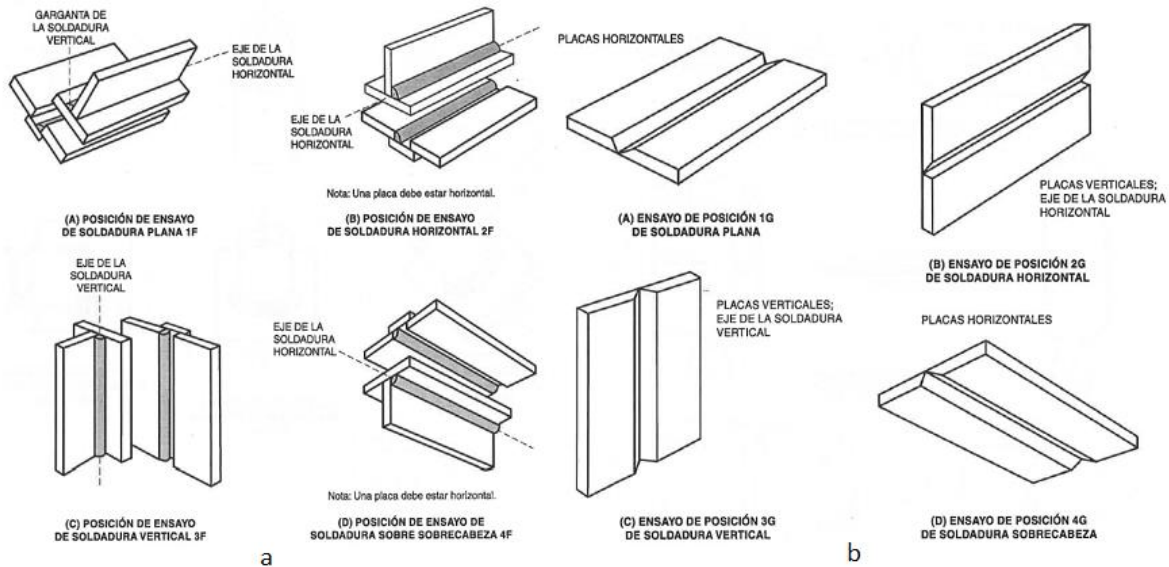
En la ejecución del cordón de soldadura, aparecen piezas que no pueden ser colocadas en posición cómoda, según el plano de referencia fueron establecidas las cuatro posiciones siguientes:

- Posición plana o de nivel.
- Posición horizontal.
- Posición vertical.
- Posición sobre cabeza.

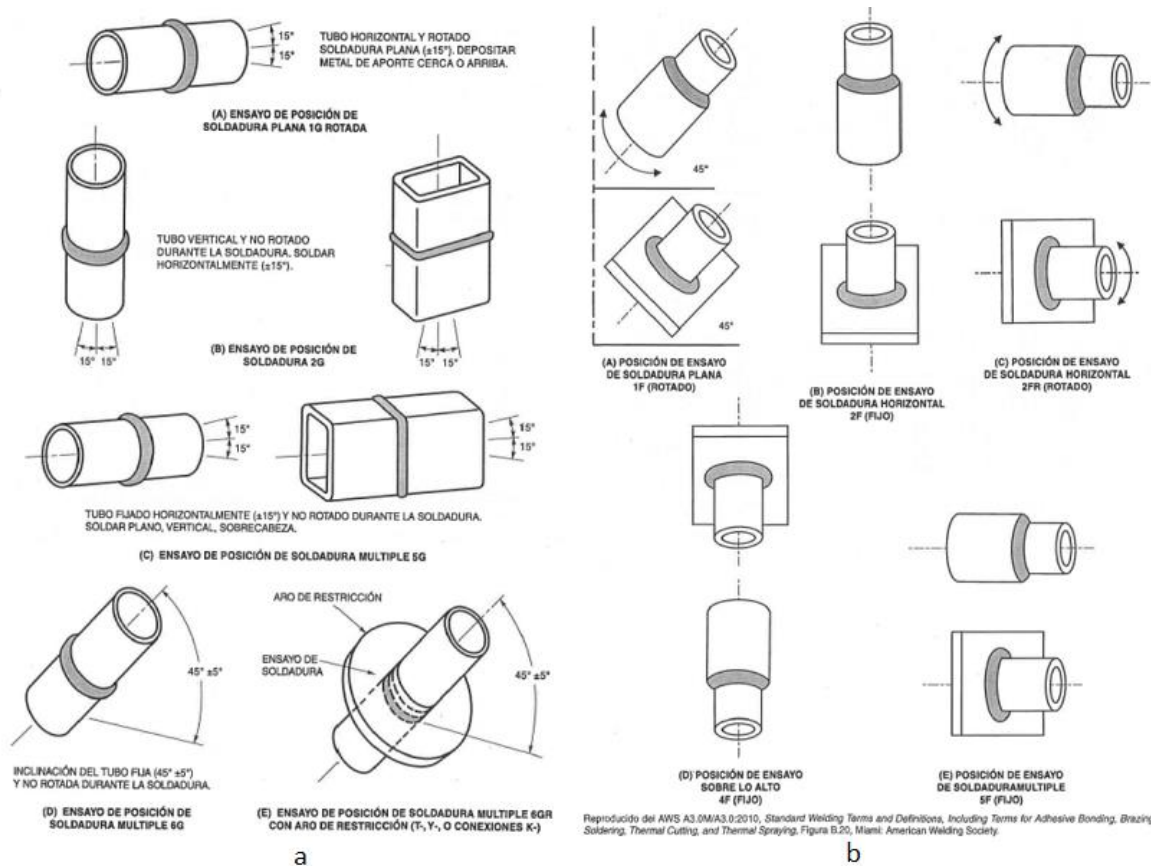
Generalmente en soldadura existen distintas posiciones de soldeo (ver Figuras 5 y 6), tanto en ángulo o de rincón designada con la letra **F** y la soldadura a tope designada con la letra **G** según la normativa americana (AWS).

Los movimientos del electrodo se realizan con el electrodo a medida que se avanza en una soldadura; estos movimientos se llaman de oscilación, son diversos y están determinados principalmente por la clase del electrodo y la posición de la unión. Los cuales pueden ser:

- Movimiento de Zig-Zag longitudinal.
- Movimiento circular.
- Movimiento semicircular.
- Movimiento Zig-Zag transversal.
- Movimiento entrelazado.



**Figura 5. Posiciones de placa de ensayo para soldaduras de filete (a) y canal (b).**



**Figura 6. Posiciones de tubos o tuberías de ensayo para soldaduras de canal (a) y filete (b).**

### ***Metal de aporte.***

El proceso GTAW es muy versátil puede o no usar material de aporte, el aporte puede ser el mismo metal base o pieza a soldar adecuadamente preparada o varillas de aporte estandarizadas, dependiendo del tipo de material base a soldar. Se deberá seleccionar la varilla adecuada que reúna las propiedades físicas y químicas para realizar una buena soldadura en la mayoría de los casos se usan varillas, o se puede usar los mismos electrodos del proceso GMAW los que son alambres sólidos son proveídos en rollos de distintos tamaños.

El metal de aporte deberá estar en conformidad con todos los requerimientos de la última edición de AWS A5.18 o AWS A5.28 y AWS A5.30, specification for consumable inerts (Especificación para inertes consumibles), según aplique.

### ***Gases de protección.***

Los gases de protección son materiales consumibles que se utilizan en los procesos de soldadura con arco eléctrico, ya sea con electrodos consumibles o no consumibles. Aunque en teoría puede usarse cualquiera de los gases inertes, helio, argón, neón, xenón o kriptón, los únicos de los que puede disponerse en volumen suficiente para los usos prácticos en la soldadura son el helio y el argón. Estos gases dan resultados satisfactorios de protección para los metales más reactivos, tales como el aluminio, el magnesio, el berilio, el columbio, el tántalo, el titanio y el circonio.

El propósito principal de un gas de protección, es el de proteger el metal fundido contra la contaminación de oxígeno, nitrógeno e hidrogeno, gases que existen en el aire y evitar la oxidación del metal de soldadura fundido altamente reactivo durante su transferencia a la pieza de trabajo. Los gases protectores (de cualquier fuente) también ayudan a estabilizar el arco proporcionando un suministro adicional de iones positivos y electrones.

Procesos de soldadura por arco de electrodos no consumibles.

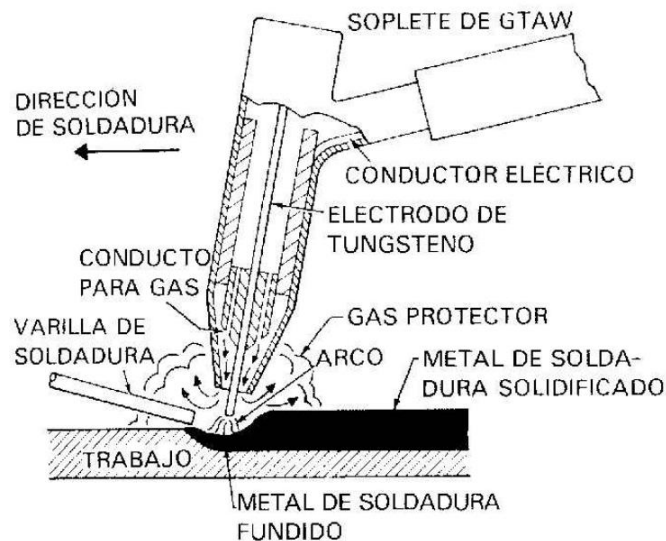
Existen seis procesos de soldadura por arco que emplean electrodos no consumibles:

- Soldadura por arco de gas y tungsteno (GTAW).
- Soldadura de arco de plasma (PAW).
- Soldadura de arco de carbono (CAW).
- Soldadura por arco (SW) o soldadura de pernos de arco.
- Soldadura de hidrógeno atómico (AHW).

- Soldadura de tope de arco impulsado magnéticamente (MIAB).

### **Soldadura de arco de tungsteno y gas (GTAW)**

La soldadura de arco de tungsteno y gas (GTAW) utiliza un electrodo de tungsteno no consumible permanente para crear un arco en una pieza de trabajo. Este electrodo está protegido por un gas inerte tal como argón o helio (o una mezcla de los dos), para evitar la degradación del electrodo; de ahí el antiguo nombre de gas inerte de tungsteno (TIG). Como se muestra en la Figura 7, la corriente de la fuente de alimentación pasa al electrodo de tungsteno a través de una antorcha a un tubo de contacto.

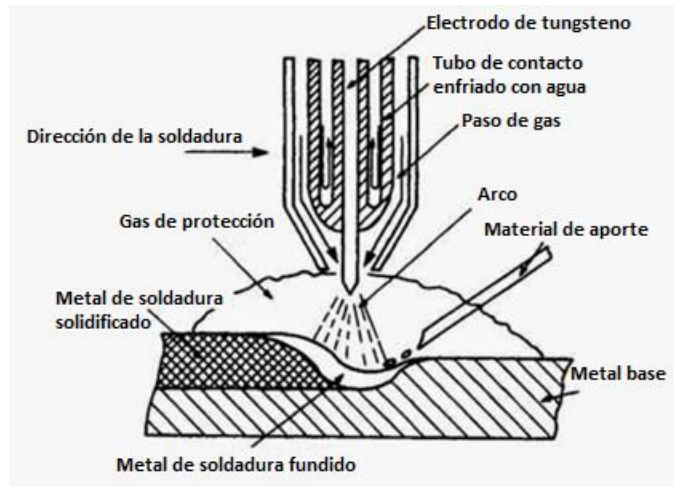


**Figura 7. Esquema que muestra la posición del conductor eléctrico para la inducción de la corriente eléctrica hacia el electrodo de tungsteno.**

Esta operación generalmente se realiza en presencia de un sistema de enfriamiento (pero no se puede calentar) para evitar el sobrecalentamiento, como se muestra en la Figura 8.



El proceso de soldadura por arco de gas-tungsteno se puede realizar con o sin relleno (autógenamente). Cuando no se emplea relleno, las juntas deben ser delgadas y tener una configuración ajustada de extremo cuadrado.



**Figura 8. Esquema del proceso de Soldadura de arco de tungsteno y gas, que muestra el sistema de enfriamiento.**

### ***Tipo de corriente y polaridad.***

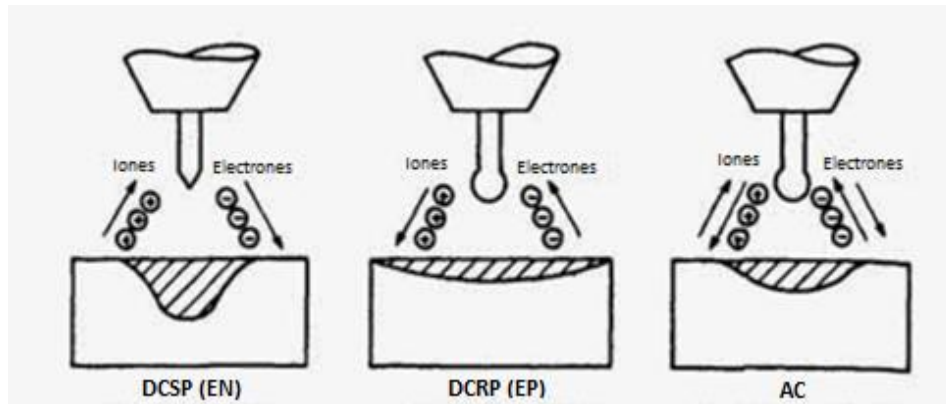
Cuando la pieza de trabajo o la pieza soldada está conectada al terminal positivo (+) de una fuente de alimentación de corriente continua, el modo de funcionamiento se denomina **polaridad directa de corriente continua (DCSP)** o electrodo de corriente continua negativo (DC- o DCEN). Cuando la pieza de trabajo está conectada al terminal negativo de una fuente de alimentación de corriente continua, el modo de funcionamiento se denomina **polaridad inversa de corriente continua (DCRP)** o electrodo de corriente continua positiva (DC + o DCEP)

En **DCSP**, los electrones se emiten desde el electrodo de tungsteno y se aceleran a velocidades y energías cinéticas muy altas, mientras se viaja a través del arco. Estos electrones de alta energía colisionan con la pieza de trabajo, renuncian a su energía cinética y generan un calor considerable en la pieza de trabajo. En consecuencia, DCSP da como resultado soldaduras angostas de penetración

profunda, pero con mayor entrada de calor a la pieza de trabajo. Alrededor de dos tercios del calor neto disponible del arco (después de las pérdidas de varias fuentes) ingresa a la masa de la pieza de trabajo.

En **DCRP**, por otro lado, el efecto de calentamiento de los electrones está en el electrodo de tungsteno en lugar de en la pieza de trabajo. En consecuencia, se requieren soportes de electrodos enfriados por agua más grandes, se producen soldaduras superficiales y la entrada de calor de la pieza de trabajo se puede mantener baja. Este modo de funcionamiento es bueno para soldar secciones finas o metales sensibles al calor. Este modo también da como resultado una acción de restregado en la pieza de trabajo por los iones positivos de gran tamaño que golpean su superficie, eliminando el óxido y limpiando la superficie. Por lo tanto, este modo se prefiere para soldar metales y aleaciones que se oxidan fácilmente, como el aluminio o el magnesio.

El modo DCSP es mucho más común con procesos de arco de electrodo no consumible que el modo DCRP. Sin embargo, hay un tercer modo, que emplea AC (ver Figura 9). El modo de AC tiende a dar lugar a algunas de las características de ambos modos de DC, durante los medios ciclos correspondientes, pero con cierto sesgo hacia el semi-ciclo de polaridad directa debido a la mayor inercia (es decir, menor movilidad) y, por lo tanto, mayor resistencia de grandes iones positivos. Durante este medio ciclo, la corriente tiende a ser más alta debido a la emisión extra de electrones desde el electrodo más pequeño y más caliente hasta la pieza de trabajo más grande y fría. En el modo AC, se obtiene una penetración razonablemente buena, junto con alguna acción de limpieza de óxido.



**Figura 9. Resumen de las características de los diversos modos actuales y operativos del proceso GTAW.**

***La física de la energía de soldadura o fuentes de poder.***

La física de la soldadura se ocupa de los complejos fenómenos físicos asociados con el proceso, incluidos el calor, la electricidad, el magnetismo, la luz, el sonido y el trabajo mecánico. Todos los procesos de soldadura requieren alguna forma de energía para obtener continuidad entre los átomos, iones o moléculas de los materiales que se unen, es decir, para formar enlaces y producir una soldadura. Las fuentes alternativas de energía (o potencia) pueden incluir:

- Fuentes eléctricas, en las que el calor de un arco, un plasma o resistencia interna (o calentamiento de Joule) provoca fusión (al menos para soldadura de fusión) o ablandamiento o difusión en fase sólida (para soldadura sin fusión).
- Haces de electrones de alta densidad energética (para soldadura por haz de electrones) o luz (para soldadura por haz de láser).
- Fuentes químicas, en las que el calor de combustión o reacción provoca fusión (por ejemplo, en oxicorte y soldadura aluminotérmica, respectivamente).

- Fuentes mecánicas, en las que el trabajo mecánico se convierte en calor para facilitar la deformación plástica y la interdifusión (por ejemplo, en la soldadura por presión o por fricción).

### ***Electricidad para soldar.***

El circuito eléctrico que permite que se forme un arco eléctrico, o que el calor se genere por resistencia, es el mismo que cualquier circuito eléctrico y por lo tanto, consta de tres factores:

- Corriente, que es el flujo de electricidad.
- Voltaje, que es la fuerza o presión que hace que la corriente fluya.
- Resistencia, que es una fuerza que impide el flujo de corriente dentro de un material, o, alternativamente, permite que se regule el flujo de corriente.

La relación entre la corriente, el voltaje y la resistencia en este y en cualquier circuito eléctrico viene dada por la ley de Ohm:

$$\text{corriente } (I) = \frac{\text{voltaje } (E)}{\text{resistencia } (R)} \quad (\text{ec. 1})$$

Donde,  $I$  es la corriente en amperios,  $E$  es el voltaje en volts y  $R$  la resistencia en Ohms.

Para un típico circuito de soldadura simple, la batería se reemplaza por una fuente de alimentación de soldadura (por ejemplo, un generador o transformador) y la resistencia se reemplaza por un arco de soldadura eléctrica.

Un arco de soldadura presenta una resistencia al flujo de corriente debido a que el plasma no es un conductor eléctrico hábil.

El arco de soldadura eléctrica puede operarse de tres maneras:

- Con un flujo de corriente continua (DC) bajo la fuerza electromotriz (fem) de una fuente con polaridad fija, con el electrodo de soldadura hecho para ser negativo (-) y la pieza de trabajo hecha para ser positiva (+).
- Con una corriente continua con el electrodo de soldadura hecho para ser positivo (+) y la pieza de trabajo hecha para ser negativa (-).
- Con un flujo de corriente alterna (AC) bajo la fem de una fuente con inversión periódica o polaridad alterna, donde el electrodo de soldadura y la pieza de trabajo se alternan entre positivo y negativo.

### ***Plasma.***

La definición de plasma solo es válida para el estado del plasma restringido a plasma gaseoso, el cual consiste en una mezcla de electrones, iones y partículas neutras. Dado que la masa de los iones y partículas neutras es mucho mayor que la masa del electrón, los iones y partículas neutras se clasifican como partículas pesadas o los componentes pesados del plasma. Algunas de estas partículas pesadas pueden estar en un estado excitado debido al alto contenido de energía en el plasma; las partículas en un estado excitado pueden regresar a su estado basal por medio de emisión fotónica. Adicionalmente de estos componentes, el plasma contiene especies excitadas y fotones. Dentro de esta mezcla de partículas el plasma debe cumplir con un equilibrio de cargas por lo que eléctricamente debe de ser neutral, a esta propiedad se le conoce como “quasi neutral”.

Los plasmas son generados por el paso de corriente eléctrica a través de un gas. Debido a que los gases se encuentran a temperatura ambiente, son excelentes

aislantes, por lo que la cantidad de corriente eléctrica debe ser lo suficientemente elevada para hacer que un gas se vuelva un conductor eléctrico, este proceso se le conoce como “descomposición eléctrica” y hay muchas maneras de llevar a cabo esta descomposición.

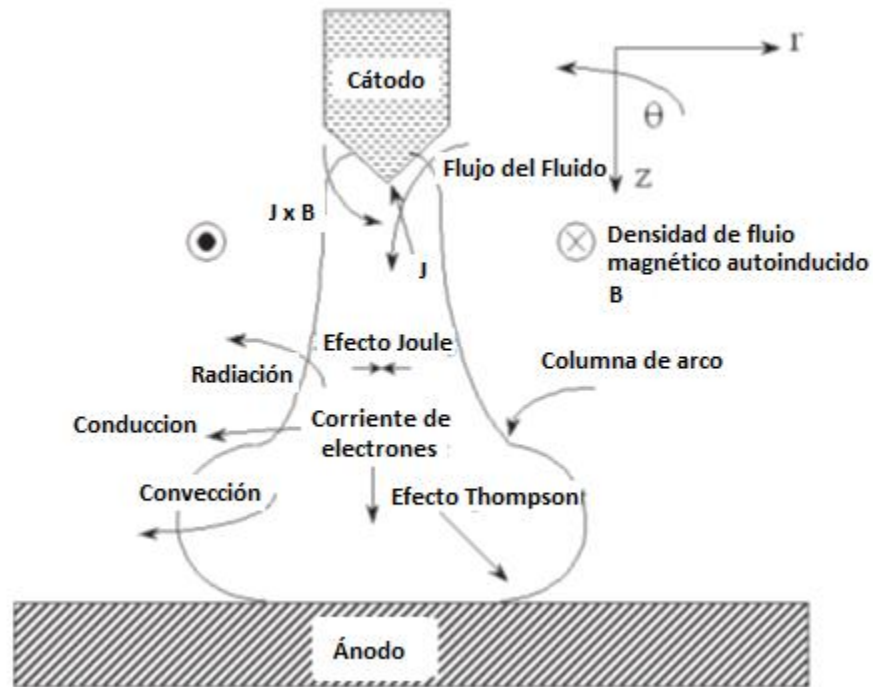
La descomposición original del gas no conductor establece una ruta conductiva entre el par de electrodos. El paso de la corriente eléctrica a través del gas ionizado conduce un fenómeno conocido como descargas gaseosas. Estas descargas son las más comunes, pero no las únicas para producir plasmas.

Los métodos más empleados para producir plasmas son los arcos de alta intensidad (ver Figura 10), descargas de pares inductivos de alta frecuencia y recientemente las descargas de microondas se han considerado para producir plasmas.



**Figura 10. Imagen que muestra el plasma formado en el proceso de GTAW.**

En la Figura 11 se muestra un esquema simplificado del proceso de soldadura con arco, el cual muestra la compleja fenomenología presente en un arco eléctrico.

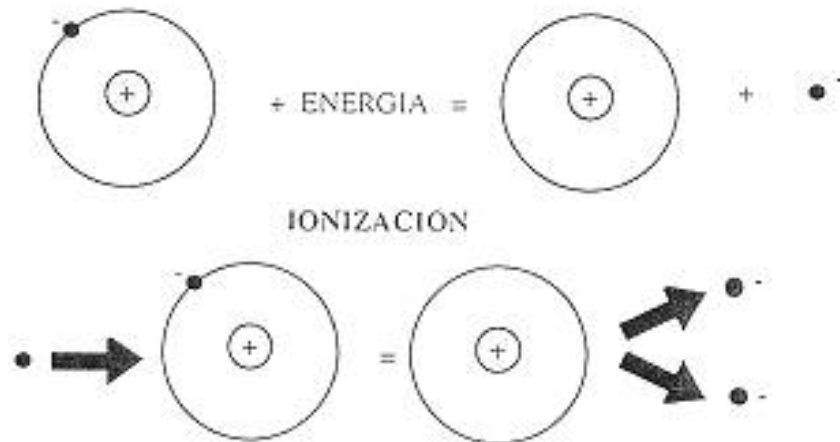


**Figura 11. Esquema simplificado del proceso de soldadura con arco eléctrico.**

El arco en la soldadura de arco, se crea entre un electrodo, en este caso un electrodo de tungsteno y una pieza de trabajo o una pieza soldada, por una diferencia de potencial. Esto se lleva a cabo de la siguiente manera:

Se induce una corriente eléctrica, que es el flujo de electrones entre dos puntos de un conductor, proveniente de la fuente de alimentación hacia el electrodo de tungsteno, esto a través de una antorcha a un tubo de contacto, posteriormente por una diferencia de potencial entre ambos electrodos, se ejerce una fuerza o presión que hace que los electrones se desplacen de las zonas de menor potencial a las de mayor potencial (del cátodo hacia el ánodo). Esto se debe al tipo de corriente y polaridad que se está utilizando, en este caso se usará polaridad directa de corriente continua (DCSP). Recordemos que, la corriente continua es el flujo continuo de carga eléctrica y la polaridad directa hace que la corriente fluya desde el electrodo de tungsteno hacia la superficie de la soldadura.

El electrodo de tungsteno es un material conductor que posee una gran cantidad de electrones libres, por lo que es posible el paso de la electricidad a través del mismo. Este material presenta un valor de resistencia muy pequeño y por ello se suele despreciar. La conducción de la corriente eléctrica se presentará a lo largo del arco cuando la carga neta se transporte a través de este material conductor y hacia la pieza de trabajo, pero esto no es así debido a que el gas de cobertura no conduce la electricidad, impidiendo así que se cierre el circuito. Por lo que a continuación se explicará de manera resumida que es lo que sucede dentro del electrodo.



**Figura 12. Imagen que muestra el efecto termiónico y la ionización.**

Parte de la energía cinética de los electrones se transforma en calor debido a los choques que sufren con los átomos del material conductor por el que circulan, elevando la temperatura del mismo. Estos electrones se acumulan y al alcanzar una temperatura de 4000K se vuelve insostenible mantener a los  $e^-$  por lo tanto se emiten (emisión termiónica) con alta energía. El arco en sí consiste en electrones emitidos térmicamente junto con iones positivos de este electrodo y la pieza de trabajo (ver Figura 12).



A continuación se explicará de forma breve lo que sucede con estos electrones altamente energéticos al ser emitidos desde el cátodo hacia el ánodo. Esta emisión llamada termiónica causa colisiones con las moléculas de gas neutral que provocan la ionización de estas, formándose así el plasma. En este momento la corriente eléctrica comienza a fluir a través del gas de cobertura ionizado aunque es un conductor moderado permite el paso de una elevada densidad de corriente del orden de  $1 \times 10^7 \text{ A/m}^2$  lo cual genera un enorme calor Joule provocado por el paso de tal cantidad de flux de carga, en donde los electrones comienzan a aceptar la energía del campo eléctrico aplicado y llegan a una mayor temperatura que los iones y partículas neutras.

Los procesos de colisión a alta presión (1 atm) actúan para equilibrar la temperatura de todas las especies presentes entre los electrodos de tal manera que la suposición de Equilibrio Termodinámico Local (LTE por sus siglas en inglés) es válida en la mayor parte del arco.

El paso de la corriente eléctrica entre los electrodos induce un campo magnético azimutal, y el flux de campo magnético interactúa con la densidad de corriente para producir fuerzas de cuerpo electromagnéticas (fuerzas de Lorentz), dadas por el producto cruz de estos dos vectores (campo magnético y densidad de corriente). Estas fuerzas predominantemente son alineadas radialmente y apuntan hacia abajo en el eje axisimétrico del arco. Las fuerzas electromagnéticas decrecen en intensidad conforme la distancia desde el arco se incrementa debido a la dispersión o ensanchamiento del arco. Esta gran variación en la magnitud de las fuerzas de cuerpo produce grandes diferencias de presión justo debajo del cátodo. El resultado es un bombeo fluido dinámico que genera la formación de un jet de plasma caliente de alta velocidad dirigido hacia la pieza de trabajo. Cuando este jet alcanza al ánodo, es desviado produciendo una alta presión de estancamiento que deforma la superficie libre del charco de soldadura y puede ser el origen de defectos. Entonces, el jet se desvía radialmente desde el eje de simetría sobre el ánodo lo que produce la forma característica de “campana” de los arcos de alta intensidad. El paso de corriente a través del arco genera calor por efecto Joule y se alcanzan temperaturas

altas por arriba de los 10,000K (temperatura a la cual la conductividad eléctrica del gas de cobertura empieza a ser significativa para conducir corriente) y hasta 30,000K, así como elevados gradientes de temperaturas entre los electrodos fríos y la columna del arco caliente. El transporte de energía por medio de los electrones y radiación son mecanismos de transferencia de calor adicionales que deben ser considerados en el balance de energía. Estas variaciones abruptas de temperatura significan que las propiedades del arco son una fuerte función de la temperatura.

Las fuerzas de Lorentz que actúan como fuerzas de cuerpo sobre el fluido, creando movimiento de fluidos que se conoce como un jet de plasma caliente de alta velocidad que va desde el cátodo hacia el ánodo y que calienta al charco de soldadura por un mecanismo que se conoce como convección. Los electrones calientes entran al charco de soldadura que presenta baja temperatura comparada con la del arco, y al entrar al metal soldado calienta al charco de soldadura por dos mecanismos, uno de ellos llamado efecto Thompson que es la energía que traen los electrones y por la condensación de electrones que es el calor liberado por los electrones al pasar del plasma a la soldadura metálica y esta se conoce como función trabajo.

El arco es un proceso que involucra los fenómenos de flujo de fluidos promovidos por campos magnéticos, lo que se denomina magnetohidrodinámica, acoplados a la transferencia de energía y fenómenos electromagnéticos. En cuanto a la transferencia de calor desde el arco al charco de soldadura podemos decir que hay cuatro mecanismos participantes que son: convección, radiación, efecto Thompson y condensación de electrones o función trabajo.

### ***Revisión bibliográfica.***

Hay en la literatura descripciones simplificadas basadas en soluciones asintóticas de la magnetohidrodinámica con muchas simplificaciones [2,3]. La principal ventaja de estas representaciones es que son relaciones algebraicas simples que son prácticas para el técnico en soldadura y para ingenieros.

También se han reportado modelos matemáticos diversos que describen de una manera mucho más realista la operación de un arco [4,5].

La comprensión del proceso de soldadura con arco eléctrico puede lograrse usando simulaciones numéricas, expresiones analíticas y mediciones experimentales. En la actualidad existe una gran variedad de trabajos de modelado matemático para entender la compleja fenomenología presente en un arco eléctrico, como las investigaciones realizadas por Lowke y Ludwig [6], Ramakrishnan y Nuon [7] y Allum [8] en donde el objetivo fue derivar expresiones analíticas para relacionar todos los fenómenos presentes en el arco, como son 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 de cobertura. 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 del arco.

A medida que las capacidades de cómputo aumentaron, las soluciones numéricas para describir un arco eléctrico de forma realista fueron posibles a través de, Hsu y colaboradores [9], McKelliget y Szekely [10], y Kim y colaboradores [11], por mencionar algunos. Estos trabajos lograron simular 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 Nestor [12], y Hsu y colaboradores [9].

Posteriormente se intentó modelar el plasma de arco combinado y los fenómenos del baño de soldadura estacionaria, pero los resultados calculados se realizaron por separado, sin interacción entre el plasma y el baño de soldadura.

Posteriormente se realizó una investigación en donde se utilizó un modelo numérico unificado de soldadura de arco TIG estacionaria. El modelo y procedimiento básico es el de Sansonnens y colaboradores [6] pero se amplía para incluir la fusión del ánodo, con inclusión de efectos convectivos en el baño de soldadura. En este

trabajo se dieron predicciones de las distribuciones bidimensionales de temperatura y velocidad en toda la región del proceso de soldadura TIG y también el perfil predicho de la penetración de la soldadura. Aunque no tomaron en consideración el fenómeno del vapor de metal y la depresión de la superficie del baño de soldadura Manabu y colaboradores [14].

Posteriormente Ramírez y colaboradores desarrollaron un modelo matemático para simular soldadura de arco eléctrico con cátodo de tungsteno a fin de comparar dos formulaciones numéricas distintas para representar el problema electromagnético en arcos de soldadura, es decir la formulación del potencial y la formulación magnética. Ambas formulaciones, representan la misma física pero son matemáticamente y numéricamente diferentes, por lo que se probaron una contra la otra y contra algunas mediciones experimentales disponibles y otros estudios numéricos reportados en la literatura. Se encontró que las diferencias principales entre las dos formulaciones son la predicción del campo magnético y el campo de densidad de corriente y se concluyó que, en general el enfoque magnético parecer ser más sencillo de implementar, pero el enfoque del potencial demuestra superioridad en la predicción de las isoterms, densidad de corriente y flujo de calor en el ánodo, ya que muestran una mejor concordancia con las mediciones experimentales [1].

Para poder predecir las propiedades (como voltaje de arco total, temperaturas de electrodos, temperaturas de arcos y perfiles radiales de densidad de flujo de calor y densidad de corriente en el ánodo) de los arcos eléctricos Lowke y Tanaka propusieron el uso del equilibrio termodinámico local (**LTE**), en donde se supone un tamaño de malla particular cerca de los electrodos. Esta aproximación supera el problema de que la conductividad eléctrica de equilibrio en el arco cerca de los electrodos es casi cero, lo que hace que los cálculos precisos usando LTE sean imposibles en el límite de tamaño de malla pequeña, ya que entonces los voltajes tenderían hacia infinito [15].

Conforme se fueron entendiendo algunos aspectos de la soldadura de arco otros cuestionamientos se generaron, enfocándose ahora en el gas de cobertura, para

conocer la efectividad de diferentes mezclas de gases de protección, por lo que se utilizó un código computacional para modelar el arco de soldadura de gas inerte de tungsteno de forma axisimétrica y bidimensional. Ambos electrodos (el cátodo de tungsteno y el ánodo metálico de la pieza de trabajo) y el plasma de arco se incluyen de forma autoconsistente en el dominio computacional. En el trabajo realizado por Murphy y colaboradores, se investigó la influencia de la adición de helio, hidrógeno y nitrógeno al gas de protección del argón. En donde se obtuvo que la adición de helio, hidrógeno y nitrógeno al arco conduce a una mayor densidad de flujo de calor al ánodo en las regiones centrales del arco, lo que favorece la mayor profundidad de la piscina de soldadura. El esfuerzo cortante y la presión del arco en la superficie del ánodo se incrementan al agregar hidrógeno o nitrógeno o hasta aproximadamente 50% en moles de helio, pero disminuyen cuando se agrega más helio [16].

Conforme se han ido integrando los conocimientos con respecto a los fenómenos de la soldadura de arco y su interés por incluir el plasma dentro del dominio computacional fue lo que llevó a Murphy y colaboradores a la siguiente investigación. En donde se demuestra que sería imposible estimar con precisión las condiciones de contorno en la superficie de la piscina de soldadura sin incluir el plasma de arco en el dominio computacional y que la composición del gas de protección afecta fuertemente las propiedades del arco que influyen en el conjunto de soldadura como son: densidad de flujo de calor, densidad de corriente, esfuerzo cortante y presión de arco en la superficie de la piscina de soldadura.

También se encuentra que la vaporización del metal del baño de soldadura y la difusión del vapor de metal en el plasma del arco disminuye la densidad del flujo de calor y la densidad de corriente al baño de soldadura. Y finalmente se mostró que la forma del electrodo de alambre en la soldadura de metal con gas inerte tiene una gran influencia en las velocidades del jet en el arco y la presión y el esfuerzo cortante en la superficie de la piscina de soldadura. En cada caso, se presentó evidencia de que la geometría y la profundidad del conjunto de soldadura dependen fuertemente de las propiedades del arco. [17].

Para poder entender más a fondo lo que ocurre cerca de la pieza de trabajo Schnick y colaboradores realizaron una investigación, en donde se presenta un modelo de una soldadura GMAW que tiene en cuenta el vapor de metal y que permite predecir el mínimo local central en las distribuciones radiales de temperatura y densidad de corriente eléctrica que es causado por una alta concentración de vapor de metal en el núcleo del arco y su alta emisión radiativa. Se examinó la influencia de diferentes valores para el coeficiente de emisión radiativa neta de vapor de hierro, que varían hasta un factor de cien. Se mostró que estos coeficientes de emisión neta causan diferencias en las magnitudes, pero no en las tendencias generales, de la distribución radial de la temperatura y la densidad de corriente. Además, se investigó la influencia de la velocidad de vaporización del metal. Presentaron pruebas de que, para velocidades de vaporización más altas, la velocidad de flujo central dentro del arco disminuye e incluso puede cambiar de dirección, de modo que se dirige desde la pieza de trabajo hacia el cable, aunque el flujo de plasma externo todavía se dirige hacia la pieza de trabajo.

Para la realización de esta investigación se utilizó el software de simulación comercial ANSYS CFX el cual se utiliza para un modelo axisimétrico de estado estacionario de un arco eléctrico. Se usaron las ecuaciones estándar de dinámica de fluidos computacional (conservación de masa, momento y energía) y agregaron los fenómenos electromagnéticos y radiativos que ocurren en los plasmas térmicos [18].

Ya que es importante conocer la interacción de todos los fenómenos que ocurren en la soldadura de arco, Mougnot y colaboradores desarrollaron un modelo transitorio 3D de todo el dominio teniendo en cuenta los efectos entre el plasma y el material asumiendo la continuidad actual y teniendo en cuenta la presencia de vapores en las propiedades y características del plasma. En donde finalmente, de acuerdo con algunos autores, se mostró que con este modelo tridimensional global transitorio no es necesario incluir la caída de voltaje en el balance de energía [19].

Ya que una comprensión profunda del arco es importante en la investigación y el desarrollo de la soldadura, y tomando en cuenta que hay preguntas sin resolver, se

han discutido tanto el diagnóstico como el modelado, en donde el enfoque está en el plasma de arco aunque se extiende a la influencia del plasma de arco en el metal, y sus interacciones con el electrodo y la pieza de trabajo, en la soldadura de gas inerte de tungsteno y soldadura de gas inerte de metal. Las áreas en las que se identifica la necesidad de más trabajo incluyen el desarrollo de técnicas para medir la distribución de densidad de corriente, el cálculo de la distribución de diferentes gases en el plasma de arco (por ejemplo, vapores de diferentes elementos metálicos al soldar aleaciones), métodos computacionales para modelar transferencia de metal y tratamientos de esas capas.

El modelado de un arco de soldadura requiere la solución de ecuaciones acopladas de dinámica de fluidos y electrodinámica, en donde el fluido puede tratarse como incompresible y el régimen de flujo como laminar, ya que tanto el número de Mach como el número de Reynolds son bajos. Es habitual asumir el equilibrio termodinámico local (LTE), aunque algunos enfoques prescinden de esta suposición.

La mayoría de las dificultades en los modelos surgen de las interacciones entre el arco y el electrodo y la pieza de trabajo. Estos incluyen la vaporización del alambre y la pieza de trabajo, la formación de gotitas en el caso de la soldadura MIG / MAG, la deformación de la superficie del baño de soldadura y el tratamiento de las regiones límite entre el arco y el alambre y la pieza de trabajo.

En los últimos años se han producido avances significativos tanto en el diagnóstico como en el modelado de soldadura por arco. Las mediciones de la temperatura del arco en presencia de vapor de metal, y de las propiedades del electrodo, gotitas y el baño de soldadura, han mejorado nuestra comprensión del proceso de soldadura por arco. Los modelos computacionales más completos incluyen el electrodo, el arco y la pieza de trabajo de forma auto consistente [20].

Es importante describir las características magnetohidrodinámicas y eléctricas del arco que afectan la calidad de la soldadura ya que muchos defectos de soldadura se explican por la operación del arco.

Este trabajo se basa en el modelo matemático teórico previamente desarrollado [1] el cual se empleará para determinar el efecto de la corriente y la longitud de arco sobre las características de arcos eléctricos usados en soldadura pero esta vez ardiendo en un gas como el CO<sub>2</sub> que es muy diferente al gas de cobertura con que se han realizado la mayoría de trabajos reportados. Para ello se mantendrá el gas de cobertura fijo (CO<sub>2</sub>) y se variará tanto la corriente como la longitud del arco. Es deseable incorporar la metodología del diseño de experimentos para dilucidar de manera cuantitativa y dar certeza estadística del efecto de estas dos variables sobre las características de los arcos ardiendo en CO<sub>2</sub>.

### **Hipótesis.**

La corriente en conjunto con la longitud del arco, definen el aporte de calor que el arco proporciona a la pieza soldada, así como su ancho y su profundidad. Se espera que al incrementar la intensidad de corriente se aumente linealmente el aporte de calor, aumente la penetración y que al aumentar la longitud del arco el calor aportado afecte a una mayor área de la soldadura con menor penetración. Asimismo, cambiar el gas de cobertura de argón a CO<sub>2</sub> será una variable más significativa que la corriente y la longitud del arco.

### **Objetivo.**

Simular arcos eléctricos de soldadura variando la corriente y la longitud del arco usando como gas de cobertura al CO<sub>2</sub>, usando un modelo matemático basado en la magnetohidrodinámica del proceso a través de resolver las ecuaciones de conservación de masa, cantidad de movimiento, leyes de Maxwell, ley de Ohm y ley de conservación de carga resueltas numéricamente con software de dinámica de fluidos computacional (CFD por sus siglas en Inglés).



Realizar un análisis estadístico del efecto de la longitud de arco, corriente de arco y gas de cobertura sobre las características del arco y los flujos de carga y de calor sobre el ánodo.

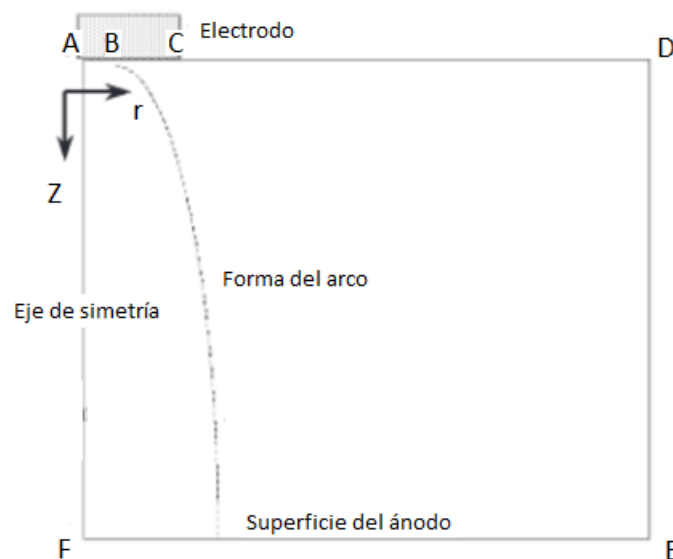
## **CAPÍTULO 2: Metodología de trabajo.**

Se empleó un modelo matemático basado en los principios fundamentales de flujos de fluidos, conservación de energía, conservación de masa, conservación de carga eléctrica, así como las leyes que rigen el electromagnetismo, es decir, el modelo incluye las ecuaciones de continuidad, de Navier-Stokes, de conservación de energía, la ecuación de conservación de carga eléctrica, la ley de Ohm y las leyes de Maxwell. El conjunto de ecuaciones gobernantes sujeto a condiciones de frontera se resolvieron de manera numérica empleando la técnica conocida como volumen de control e implementada en código de dinámica de fluidos computacional (CFD) PHOENICS versión 2017.

### ***Suposiciones.***

1. El plasma se encuentra en equilibrio termodinámico local (LTE). El equilibrio termodinámico local significa que todas las especies presentes en el plasma tienen la misma temperatura, es decir, tanto electrones pequeños como partículas ionizadas grandes poseen la misma temperatura.
2. Coordenadas cilíndricas, y problema en 2 dimensiones (radial y axial) al considerar simetría alrededor del eje axi-simétrico, dando lugar a eliminar los componentes angulares y derivadas angulares en todas las ecuaciones gobernantes (ver Figura 13).
3. Flujo de gas laminar. La suposición de flujo laminar se justifica porque los números de Reynolds típicos están entre 500 a 2000 en este proceso, en un jet libre la transición de laminar a turbulento se da alrededor de un Reynolds de 100,000, por lo que es buena esta suposición.
4. Estado estacionario.
5. Propiedades físicas en función de la temperatura.

6. Los efectos de gravedad y disipación de calor debido a la viscosidad son despreciables.
7. Presión atmosférica y condiciones normales en soldadura.
8. El gas de cobertura del arco simulado fue  $\text{CO}_2$
9. Superficie del ánodo plana, lo cual indica que no se considera la superficie deformada del charco de soldadura.
10. Sistema de corriente directa, además electrodo estático.
11. El plasma es ópticamente delgado, no se lleva a cabo la absorción de radiación dentro del arco, la radiación puede ser modelada en una forma aproximada, definiendo las pérdidas de radiación por unidad de volumen.



**Figura 13. Imagen en la cual se presenta el dominio de cómputo a resolver en dos dimensiones en coordenadas cilíndricas polares, mostrando las fronteras del sistema.**

### ***Ecuaciones gobernantes.***

Las ecuaciones por resolver para el sistema en coordenadas cilíndricas en 2D, involucran la conservación de masa, de flujo de cantidad de movimiento y de energía así como las ecuaciones de Maxwell, la ley de Ohm y la conservación de carga, tal y como se presentan a continuación:

Ecuación de continuidad:

$$\frac{\partial}{\partial z}(\rho v_z) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\rho r v_r) = 0 \quad (\text{ec.2})$$

Ecuación de conservación de momentum axial (Navier-Stokes z):

$$\frac{\partial}{\partial z}(\rho v_z^2) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\rho r v_r v_z) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \frac{2\partial}{\partial z} \left( \mu \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \mu \left( \frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial z} \right) \right) - B_\theta J_r \quad (\text{ec.3})$$

Ecuación de conservación de momentum radial (Navier-Stokes r):

$$\frac{\partial}{\partial z}(\rho v_r v_z) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\rho r v_r^2) = -\frac{\partial P}{\partial r} + \frac{2\partial}{r \partial r} \left( \mu \frac{r \partial v_r}{\partial r} \right) - \frac{2v_r}{r^2} \mu + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu \left( \frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial z} \right) \right) + B_\theta J_z \quad (\text{ec.4})$$

Donde  $v_r$  y  $v_z$  son los componentes de velocidad radial y axial respectivamente,  $P$  es la presión,  $\rho$  es la densidad,  $J_z$  y  $J_r$  son los componentes de densidad de corriente axial y radial respectivamente,  $B_\theta$  es la densidad de flux magnético azimutal, y  $\mu$  es la viscosidad.

Ecuación de conservación de energía:

$$\frac{\partial}{\partial z}(\rho v_z h) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\rho r v_r h) = \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{k}{c_p} \frac{\partial h}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{kr}{c_p} \frac{\partial h}{\partial r} \right) + S_t \quad (\text{ec.5})$$

El término fuente  $S_t$  se representa por:

$$S_t = \left( \frac{J_z^2 + J_r^2}{\sigma} \right) - S_r + \frac{5}{2} \frac{k_B}{e} \left( \frac{J_z}{c_p} \frac{\partial h}{\partial z} + \frac{J_r}{c_p} \frac{\partial h}{\partial r} \right) \quad (\text{ec.6})$$

Donde,  $h$  es la entalpía,  $C_p$  es el calor específico,  $k$  es la conductividad térmica y  $\sigma$  es la conductividad eléctrica. El primer término del lado derecho de la ecuación 6 es el efecto Joule,  $S_r$  son las pérdidas de radiación por unidad de volumen y el último término representa el efecto Thompson.

Ecuaciones de Maxwell:

$$\bar{\nabla} \times \bar{E} = 0 \quad (\text{ec.7})$$

$$\bar{\nabla} \times \bar{H} = \bar{J} \quad (\text{ec.8})$$

$$\bar{\nabla} \cdot \bar{B} = 0 \quad (\text{ec.9})$$

$E$  es el campo eléctrico y  $H$  es el campo magnético.

Ecuación de conservación de carga:

$$\bar{\nabla} \cdot \bar{J} = 0 \quad (\text{ec.10})$$

Ley de Ohm:

$$\bar{J} = \sigma(\bar{E}) \quad (\text{ec.11})$$

A partir de las ecuaciones de Maxwell, la conservación de carga y la ley de Ohm, es posible determinar las características eléctricas del arco. Sin embargo, es conveniente expresar el problema eléctrico en términos de potencial eléctrico combinando las ecuaciones 10 y 11.

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \sigma r \frac{\partial \phi}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \sigma \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) = 0 \quad (\text{ec.12})$$

Donde  $\phi$  es el potencial eléctrico relacionado al campo eléctrico a través de la siguiente ecuación:

$$\bar{E} = -\nabla \phi \quad (\text{ec.13})$$

Resolviendo ecuación 12 es posible obtener los componentes de la densidad de corriente con la ayuda de la ley de Ohm:

$$J_r = -\sigma \left( \frac{\partial \phi}{\partial r} \right) \quad (\text{ec.14})$$

$$J_z = -\sigma \left( \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) \quad (\text{ec.15})$$

Finalmente, debido al hecho de que la mayoría de la corriente es axialmente directa, la densidad del flux del campo magnético puede ser integrada a partir de la ley de Ampere (ec.8):

$$B_\theta = \frac{\mu_0}{r} \int_0^r J_z r dr \quad (\text{ec.16})$$

Las ecuaciones 12 a 16 describen enteramente el problema electromagnético, y son derivadas combinando las leyes de Maxwell, Ohm y la conservación de carga.

### ***Región del charco de soldadura.***

Diversos mecanismos de transferencia de calor son importantes para representar la transferencia de calor del arco al charco de soldadura. Los mecanismos considerados son:

- Condensación de electrones
- Transferencia de calor por convección
- Transferencia de calor por radiación
- Energía transportada por electrones

### ***Condensación de electrones.***

Este mecanismo de transferencia de calor es resultado de la condensación de los electrones al moverse del arco al charco de soldadura. El proceso de condensación

genera un flux de calor proporcional a la función trabajo (work function) del charco de soldadura:

$$Q_{conden} = J_a V_\phi \quad (\text{ec.17})$$

Donde  $J_a$  es la densidad de corriente en el ánodo, la cual depende de las condiciones del arco dadas para la solución del modelo del arco.  $V_\phi$  Es la función trabajo del charco de soldadura.

### ***Transferencia de calor por convección.***

La alta velocidad del jet incidiendo en la superficie del ánodo calienta el charco de soldadura por convección y este calor es calculado asumiendo que el calor transferido es gobernado por una correlación empírica:

$$Q_{conv} = \frac{0.915}{\sigma_{Hw}} \left( \frac{\rho_b \mu_b}{\rho_w \mu_w} \right)^{0.43} \left( \rho_w \mu_w \frac{v_r}{r} \right)^{0.5} (h_b - h_w) \quad (\text{ec.18})$$

Donde  $\sigma_{Hw}$  es la entalpía y número de Prandtl y los sufijos  $b$  denotan la posición en el borde de la capa límite mientras  $w$  representa la posición en la superficie del charco.

### ***Transferencia de calor por radiación.***

La radiación proveniente del arco a la superficie del charco es calculada por la aproximación de factores descritos en por la siguiente ecuación:

$$Q_{rad} = \int_{V_j} \frac{S_r}{4\pi r_{i,j}} \cos \Psi dV_j \quad (\text{ec.19})$$

Donde  $r_{i,j}$  es el vector que une la superficie de cada elemento en la superficie del charco con cada volumen en el arco,  $V_j$ ,  $\Psi$  es el ángulo formado entre  $r_{i,j}$  y el vector normal de la superficie del charco.

### **Efecto Thompson.**

Transporte de energía térmica por medio de electrones calientes, el cual es descrito por la ecuación:

$$Q_{Tho} = \frac{5J_a}{2e} k_b (\alpha T_b - T_w) \quad (\text{ec.20})$$

Donde el parámetro  $\alpha$  representa el rango entre la temperatura del electrón y la temperatura del plasma en la caída del ánodo. Para los cálculos un valor de 1.2 fue establecido para  $\alpha$ .

El flux de calor total es calculado por medio de la suma aritmética de todas las contribuciones de calor:

$$Q_{Total} = Q_{Tho} + Q_{conden} + Q_{conv} + Q_{rad} \quad (\text{ec.21})$$

### **Condiciones de Frontera.**

En la Tabla 4 se muestran las condiciones a la frontera de todas las variables. Las fronteras son las líneas que están marcadas con letras mayúsculas en la Figura 13. La condición de frontera crítica es para  $\phi$  en la región catódica, y para la densidad de corriente en la misma se supone que existe un pequeño círculo en el cátodo "spot", con radio  $R_c$ , con un valor constante de densidad de corriente  $J_c$   $6.5 \times 10^7 \text{ A/m}^2$ , fue usada como flux para el campo eléctrico  $\phi$ . En las superficies anódica y catódica se establecen velocidades iguales a cero. Las condiciones en el eje de simetría son de cero flujo. En las fronteras abiertas a la atmósfera se deja escapar gas que se lleva energía por convección. Finalmente, en la superficie del ánodo se



aplica la condición de no deslizamiento para el plasma, se aplican las ecuaciones correspondientes a los 4 mecanismos de transferencia de calor (ecuaciones 17, 18, 19 y 20). En especial destaca la convección en la que se emplea una correlación de jets calientes verticales incidiendo en una superficie plana con un punto de estancamiento (ecuación 18). En esa misma frontera se pone el potencial eléctrico con valor arbitrario de cero y se fija la temperatura (o entalpía) a un valor constante que corresponda al punto de ebullición del material a soldar. En este trabajo tanto la función trabajo como el punto de ebullición se han considerado de hierro.

**Tabla 4. Tabla con las condiciones de frontera del sistema, de todas las variables (ver Figura 13).**

	$V_r$	$V_z$	H	$\Phi$
AB	0	0	T=4000K ó h=7.2x10 <sup>6</sup> J/Kg $Q_{cf} =  J_z  J_c$	$\frac{\partial \Phi}{\partial z} = -\frac{J_c}{\sigma}$
BC	0	0	T=4000K ó h=7.2x10 <sup>6</sup> J/Kg	$\frac{\partial \Phi}{\partial z} = 0$
CD	0	$\frac{\partial V_z}{\partial z} = 0$	T=1000K ó h=5.2x10 <sup>5</sup> J/Kg	$\frac{\partial \Phi}{\partial z} = 0$
DE	$\frac{\partial V_r}{\partial r} = 0$	$\frac{\partial V_z}{\partial r} = 0$	T=1000K ó h=5.2x10 <sup>5</sup> J/Kg	$\frac{\partial \Phi}{\partial r} = 0$
EF	0	0	T=4000K ó h=7.2x10 <sup>5</sup> J/Kg $Q_a = ec. 21$	$\frac{\partial \Phi}{\partial r} = 0$
AF	0	$\frac{\partial V_z}{\partial r} = 0$	$\frac{\partial h}{\partial r} = 0$	$\Phi = 0$

### ***Técnica de solución.***

La codificación de la resolución numérica se basa en el método numérico Volumen de Control. En esta técnica se divide al sistema en un número finito de pequeños volúmenes sin traslape, de tal manera que hay sólo un volumen de control rodeando a cada nodo. También el tiempo se divide o discretiza en pequeños segmentos. Todas las ecuaciones de conservación que gobiernan al problema se integran sobre cada volumen. El resultado de tal integración es la transformación de un sistema de ecuaciones diferenciales parciales a varios sistemas lineales de ecuaciones algebraicas, los cuales pueden resolverse por medio de técnicas numéricas iterativas. Cuando los sistemas de ecuaciones lineales son resueltos, la solución consiste en obtener los valores de las variables dependientes en los nodos. La característica más atractiva de esta técnica es que la solución resultante implica la conservación integral de la cantidad conservada dentro del volumen de control y por lo tanto en todo el dominio.

El poder de la técnica radica en el hecho de que todas las ecuaciones de conservación pueden escribirse de una manera similar en su forma, y por lo tanto la técnica de resolución puede ser la misma sin importar el fenómeno de transporte a describir.

### ***Software utilizado.***

El método numérico resuelve simultáneamente todas las ecuaciones gobernantes en conjunto con las condiciones de frontera establecidas y sus propiedades físicas aplicando la técnica de volumen de control.

Posteriormente, se implementa en el software PHOENICS, el cual consta de tres programas principales (Satellite, Earth, Photon). Donde el usuario plantea el problema por medio de la manipulación de dos archivos, Q1 y Ground.for, escritos en lenguaje PIL (Phoenix Input Language) y el segundo en lenguaje de

programación FORTRAN, los cuales los compila "Satellite", resuelve el problema numérico "earth" y presenta los resultados en forma de archivo phi y result, y finalmente, la visualización de manera gráfica de los resultados en "Photon".

### ***Archivo Q1.***

El Q1 es un archivo de texto que usa comandos PIL y su función es definir el problema físico a resolver. Es decir, se establecen las ecuaciones gobernantes, las condiciones a la frontera, condiciones iniciales, la geometría empleada, la malla, propiedades de los materiales y parámetros numéricos. El Q1 es donde se alimenta la formulación matemática del fenómeno físico a resolver.

### ***Archivo Ground.for***

Archivo fuente de FORTRAN, en el cual se introducen condiciones no lineales y funciones complejas que ayudan a complementar al Q1 y le dan robustez y flexibilidad al paquete en su conjunto.

### ***Diseño de experimentos.***

Se realizaron simulaciones de cómputo para CO<sub>2</sub>, con una longitud de arco de 3 mm, 5 mm, 7 mm y 10 mm, y una intensidad de corriente de 100 A, 150 A, 200 A, 250 A y 300 A, para ver el efecto la corriente y la longitud del arco sobre las características del arco.

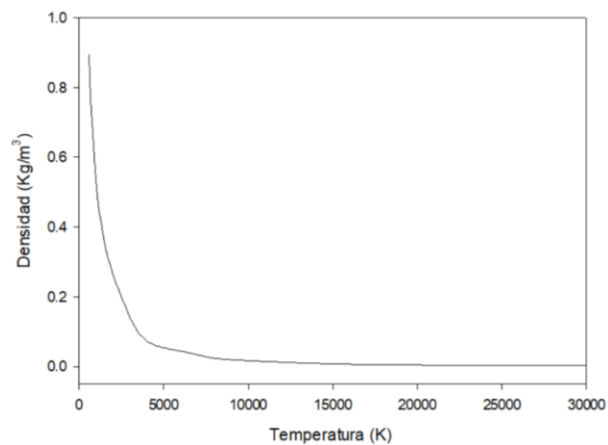
Para esto se realizó la captura de las propiedades en función de la temperatura (densidad, viscosidad, calor específico, entalpía, conductividad eléctrica y radiación) del gas en el archivo Ground.for.

### ***Propiedades de los gases.***

Las propiedades de los gases cuando se utiliza un gas en específico, son determinadas por las propiedades termofísicas (densidad, entalpía y calor específico), los coeficientes de transporte (viscosidad, conductividad térmica y conductividad eléctrica) y el coeficiente de emisión de radiación del gas utilizado. En este trabajo se utilizó como gas de protección al  $\text{CO}_2$  completamente puro, por lo que se presenta a continuación las propiedades que posee. [15]

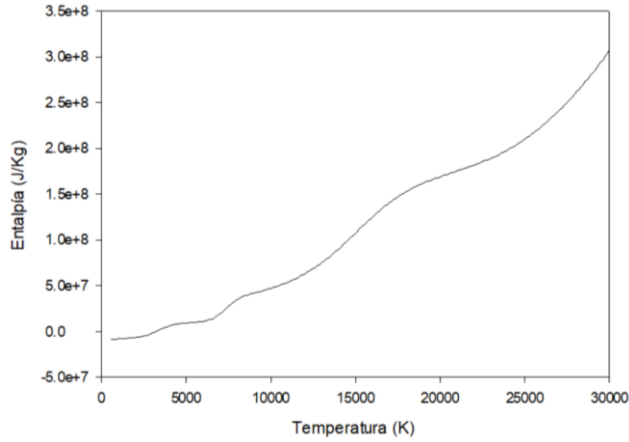
### ***Propiedades termofísicas.***

De la Figuras 14 a la 16 se presentan las propiedades termofísicas en función de la temperatura como son la densidad, la entalpía y el calor específico a presión constante de 1 atm respectivamente para el  $\text{CO}_2$ .



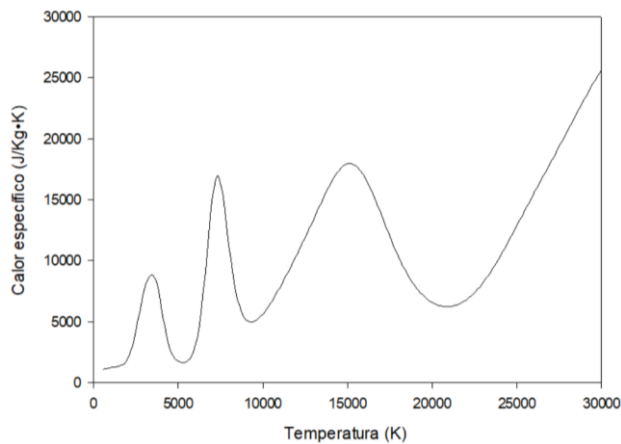
**Figura 14. Densidad del  $\text{CO}_2$  en función de la temperatura.**

La densidad varía cuando cambia la presión o la temperatura de una sustancia gaseosa. En la Figura 14 se observa la variación de la densidad del  $\text{CO}_2$  con respecto a la temperatura, en donde se tiene que, al aumentar la temperatura la densidad disminuye, manteniendo la presión constante a 1 atm.



**Figura 15. Entalpía del CO<sub>2</sub> en función de la temperatura.**

En la Figura 15 se presenta la variación de la entalpía del CO<sub>2</sub> con respecto a la temperatura, en donde se tiene que el valor de entalpía va aumentando conforme aumenta la temperatura del gas, esta variación expresa la cantidad de energía que este sistema termodinámico intercambia con su entorno para irse ionizando.



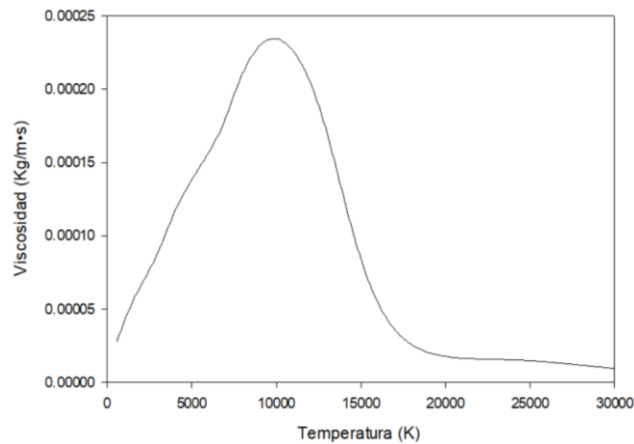
**Figura 16. Calor específico del CO<sub>2</sub> en función de la temperatura.**

En la Figura 16 se presenta la variación del calor específico del CO<sub>2</sub> con respecto a la temperatura, en donde se tiene que el valor de calor específico aumenta conforme aumenta la temperatura del gas y tiene una disminución al llegar a la temperatura

de 3500K y 7300K, debido a la liberación de energía por la disociación y ionización de la molécula de CO<sub>2</sub>. Cada pico expresa una ionización distinta.

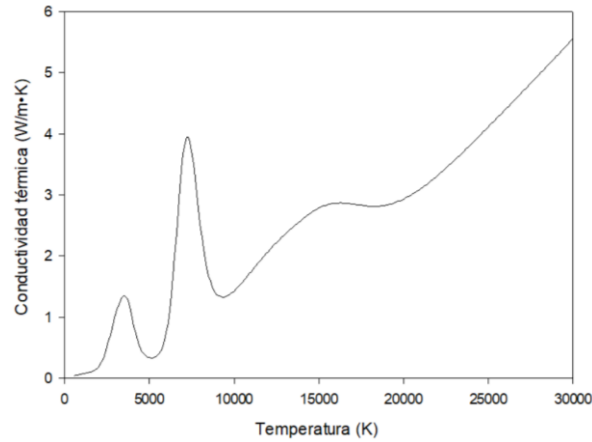
### ***Coefficientes de transporte.***

De la Figura 17 a la 19 se presentan los coeficientes de transporte en función de la temperatura como son la viscosidad, la conductividad térmica y la conductividad eléctrica a 1atm de presión, para el plasma de CO<sub>2</sub>.



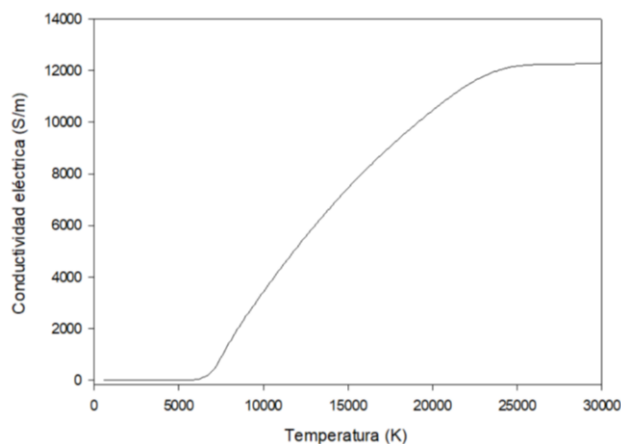
**Figura 17. Viscosidad del CO<sub>2</sub> en función de la temperatura.**

En la Figura 17 se presenta la variación de la viscosidad del CO<sub>2</sub> con respecto a la temperatura, en donde se tiene que los valores de viscosidad aumentan conforme aumenta la temperatura del gas hasta los 10,000K y posteriormente disminuyen.



**Figura 18. Conductividad térmica del CO<sub>2</sub> en función de la temperatura.**

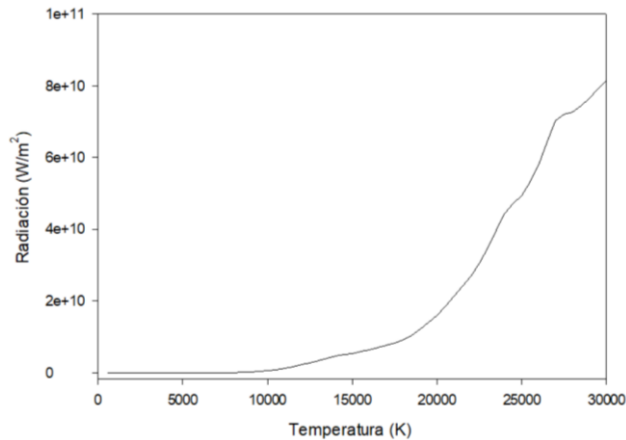
En la Figura 18 se presenta la variación de la conductividad térmica del CO<sub>2</sub> con respecto a la temperatura, en donde se tiene que el valor de conductividad térmica aumenta conforme aumenta la temperatura del gas y tiene una disminución al llegar a la temperatura de 3500K y 7300K, debido a la liberación de energía por la disociación e ionización de las moléculas de CO<sub>2</sub>, produciéndose así los picos de la conductividad térmica. La conductividad aumenta cuando el gas se transforma en plasma completamente ionizado al alcanzar los 18,000K de temperatura.



**Figura 19. Conductividad eléctrica del CO<sub>2</sub> en función de la temperatura.**

En la Figura 19 se presenta la variación de la conductividad eléctrica del CO<sub>2</sub> con respecto a la temperatura, en donde se tiene que el valor de conductividad eléctrica aumenta considerablemente cuando la temperatura del gas llega a 6,000K. Este aumento se debe a que en el gas existe un movimiento de partículas cargadas eléctricamente las cuales golpean a las moléculas de CO<sub>2</sub>, ionizando así este gas (aunque es considerado un conductor moderado), permitiendo que comience a conducir la electricidad y aumenta con respecto a la densidad de electrones presentes.

### ***Coefficiente de emisión de radiación.***



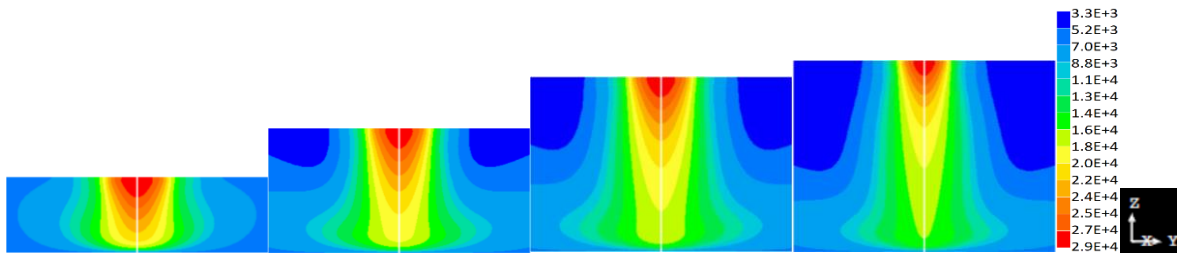
**Figura 20. Radiación del CO<sub>2</sub> en función de la temperatura.**

En la Figura 20 se presenta la variación de la radiación del CO<sub>2</sub> con respecto a la temperatura, en donde se tiene que el valor de radiación aumenta conforme se aumenta la temperatura.



### CAPÍTULO 3: Resultados y discusión de resultados.

En la Figura 21 se muestra el perfil de temperaturas para longitudes de arco de 3 mm, 5 mm, 7 mm y 10 mm, con una intensidad de corriente de 200 A. Para poder compararlos se realizó un cambio en los contornos, utilizando el mismo rango de temperaturas para los cuatro, que va desde los 3,300 K hasta los 29,000 K. Para una longitud de arco de 3 mm se tiene que el contorno está más deformado debido al poco espacio y a todos los fenómenos que se generan y conforme se incrementa la longitud del arco el contorno se va alargando, observándose de forma más simple la característica forma de campana.



**Figura 21. Contornos de temperatura para longitudes de arco de 3 mm, 5mm, 7 mm y 10 mm a 200 A.**

También se puede apreciar que la máxima temperatura alcanzada se presenta cerca del cátodo (electrodo de tungsteno) y disminuye conforme se avanza a lo largo del arco hasta llegar al ánodo (pieza de trabajo) que al inicio está a temperatura ambiente. La transferencia de calor responsable de la distribución de temperaturas a lo largo del arco (o eje de simetría) es la convección, esta transporta el calor por medio del movimiento del plasma, desde el cátodo hacia el ánodo, ya que estas dos se encuentran a diferentes temperaturas.

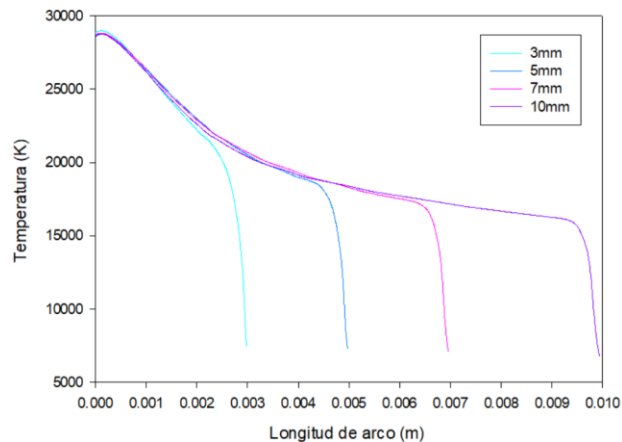
El gradiente de temperatura se debe a que el gas de cobertura ( $\text{CO}_2$ ) tiene una conductividad moderada lo que crea una resistencia al paso de corriente eléctrica, posteriormente se obtiene calor por efecto Joule debido a los choques que tienen

los electrones con las moléculas de gas dándose como resultado el calentamiento del mismo. Conforme los gases se calientan su conductividad eléctrica mejora.

La razón principal de que el plasma presente una mayor temperatura cerca del cátodo que del ánodo, se debe a que en el spot en el cátodo fluye una elevada densidad de corriente ( $1 \times 10^8 \text{ A/m}^2$ ) la cual disminuye debido a que crece el área de conducción, esto da una idea del porque conforme se aumenta la longitud del arco, las temperaturas disminuyen a lo largo del mismo, como se muestra en las Figuras 21 y 22.

Cuando el jet de plasma alcanza al ánodo, este choca y se desvía radialmente, por lo que el transporte de calor fluye radialmente hacia afuera generándose así la forma de campana que se muestra en los contornos de temperatura de la Figura 21.

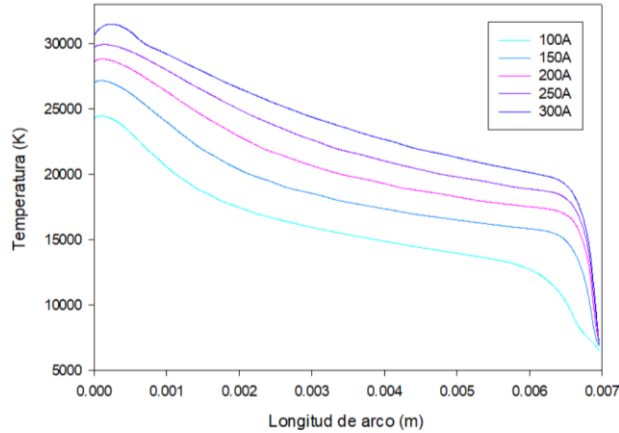
Los valores de temperatura se ven influenciados por las propiedades termofísicas del  $\text{CO}_2$ , como son el calor específico y entalpía.



**Figura 22. Efecto de la longitud de arco sobre la temperatura en el eje de simetría a 200 A.**

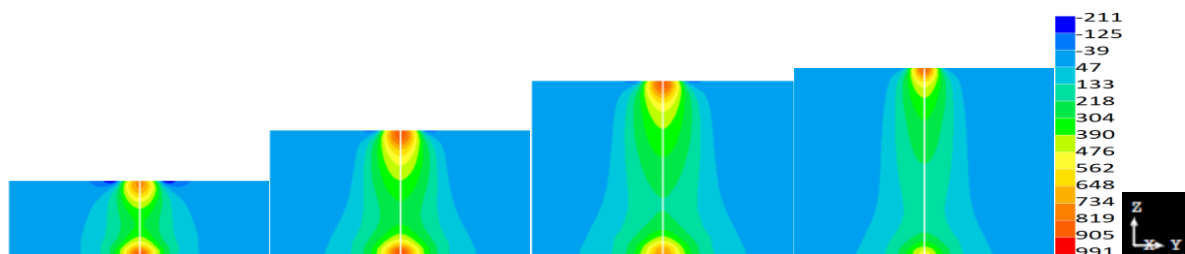
La Figura 22 revela que el aumento en la longitud del arco no influye en la temperatura del arco, tal y como se aprecia en las curvas casi idénticas de esta gráfica que presenta el perfil de temperaturas a 200 A en arcos de  $\text{CO}_2$  sobre el eje de simetría pero con distintas longitudes de arco de 3 mm, 5 mm, 7 mm y 10 mm.

Se aprecia que la única variación es la caída de temperatura sobre el charco de soldadura fría y cuya caída se da a diferentes longitudes de arco, pero la columna del arco permanece a las mismas temperaturas sin importar la longitud del arco.



**Figura 23. Efecto de la intensidad de corriente sobre la temperatura en el eje de simetría para una longitud constante de 7 mm.**

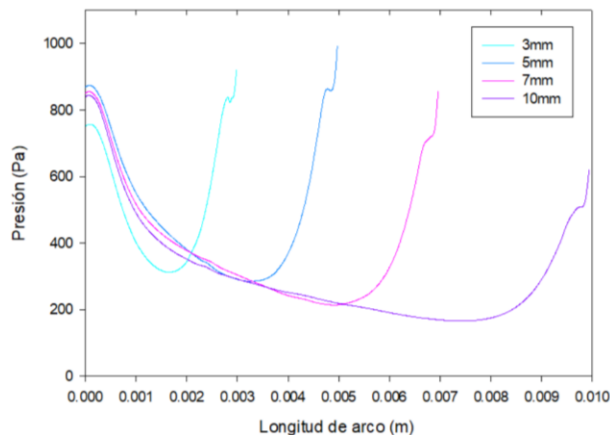
En la Figura 23 se muestra el efecto de la corriente a una misma longitud de arco sobre el perfil de temperaturas en el eje de simetría, en la cual se puede observar que conforme se aumenta la intensidad de la corriente aumenta la temperatura a lo largo del eje de simetría, esto se debe a que pasa una mayor cantidad de densidad de corriente la cual provoca el aumento de la temperatura del plasma por producirse más calor mediante efecto Joule que está relacionados con la densidad de corriente. También se aprecia que el aumento en la temperatura es proporcional al aumento de la corriente.



**Figura 24. Perfiles de presión en el eje de simetría para longitudes de arco de 3 mm, 5 mm, 7 mm y 10 mm a 200 A.**

En la Figura 24 se muestran los contornos de presión en el arco, para longitudes de 3 mm, 5 mm, 7 mm, y 10 mm, con una intensidad de corriente de 200 A. Para poder compararlos se realizó un cambio en los contornos, utilizando el mismo rango de presión para los cuatro, que va desde -211 Pa hasta 991 Pa. En esta figura se muestra que cerca del cátodo se tiene el valor máximo de presión, la cual disminuye conforme se avanza a lo largo del eje de simetría, y vuelve a aumentar justo antes del ánodo. Esto se debe a que cerca del cátodo, las fuerzas de cuerpo electromagnéticas aumentan las presiones justo por debajo y que de hecho son las fuerzas electromagnéticas las que generan esta alta presión debajo del cátodo y que a su vez genera el jet de plasma dirigido del cátodo al ánodo.

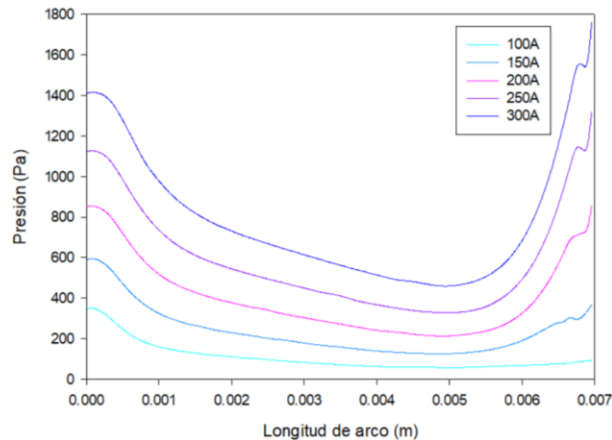
Cuando el jet de plasma choca con la pieza de trabajo se genera una presión de estancamiento, lo que genera también una elevada presión justo por encima del ánodo. Esta presión va disminuyendo conforme se incrementa la longitud del arco debido a que el jet de plasma se impacta con menor velocidad.



**Figura 25. Efecto de la longitud de arco sobre la presión en el eje de simetría a 200 A.**

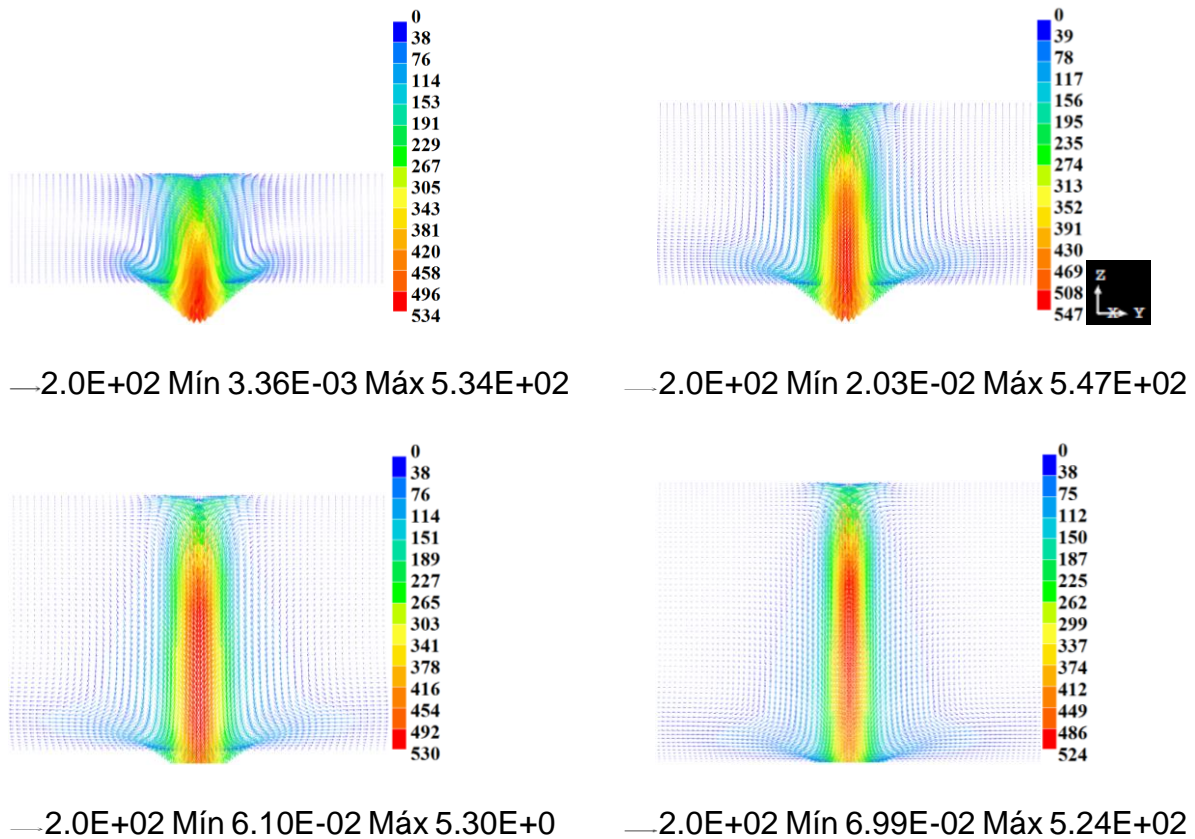
En la Figura 25 se muestra el efecto de la longitud de arco, a corriente constante de 200 A, sobre la presión en el eje de simetría, en donde se muestra que a longitudes de arco pequeños se obtienen presiones de estancamiento mayores debido a que el jet aún en desarrollo se estrella contra el ánodo provocando alta presión. Las

presiones son menores en el centro del arco y se vuelven a obtener elevados valores de presión justo por debajo del cátodo siendo este valor independiente de la longitud de arco a corriente constante, es decir no cambia la presión debajo del cátodo a corriente constante y esta es independiente de la longitud del arco.



**Figura 26. Efecto de la intensidad de corriente sobre la presión en el eje de simetría para una longitud constante de 7 mm.**

La Figura 26, muestra el efecto de la intensidad de corriente sobre la presión en el eje de simetría con una longitud constante de 7 mm, en donde se observa que entre mayor sea la corriente del arco, es más grande la presión por debajo del cátodo debido a que hay fuerzas de Lorentz mayores al aumentar la corriente porque aumenta tanto el campo magnético como la densidad de corriente cerca del cátodo. Del mismo modo, la presión de estancamiento aumenta con un aumento de la corriente debido a un aumento en la velocidad del jet de plasma.

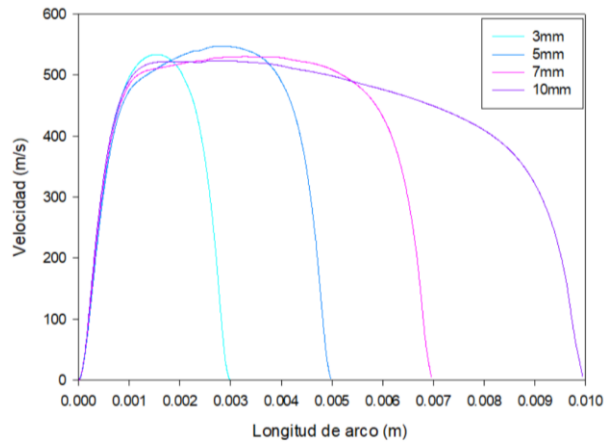


**Figura 27. Patrones de flujo para longitudes de arco de 3 mm, 5 mm, 7 mm y 10 mm a 200 A.**

En la Figura 27 se presenta el patrón de flujo de un arco ardiendo en  $\text{CO}_2$  con 3mm, 5 mm, 7 mm, y 10 mm, con una intensidad de corriente de 200 A. Para poder compararlos se colocó el mismo vector de referencia de  $2.0\text{E}+02$  m/s.

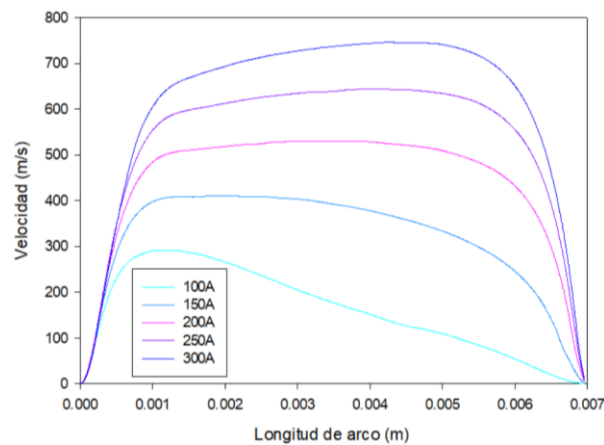
El patrón de flujo obedece a la fuerza motriz que genera el flujo y que son las fuerzas electromagnéticas que son grandes en el cátodo y que disminuyen en intensidad a medida que aumenta la distancia debido a la difusión del arco. Las fuerzas electromagnéticas generan una zona de alta presión en el cátodo que deriva en un jet de plasma dirigido del cátodo al ánodo y que a llegar al ánodo choca con éste y se desvía en forma radial. En la Figura 27 también se observa que a menor longitud de arco, el jet de plasma choca con mayor fuerza, la cual va disminuyendo al aumentarse ésta longitud debido a la expansión del arco que se tiene.

La velocidad máxima se alcanza en el desarrollo del jet sobre el eje de simetría.



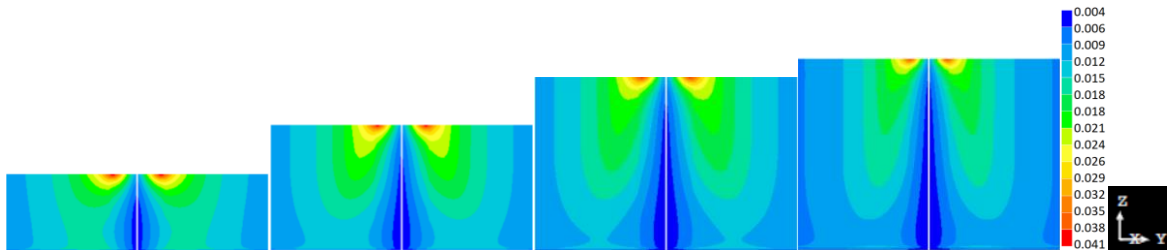
**Figura 28. Efecto de la longitud de arco sobre la velocidad en el eje de simetría a 200 A.**

En la Figura 28 se muestra el efecto de la longitud de arco sobre la velocidad en el eje de simetría a 200 A, en donde el jet de plasma se empieza a desarrollar en el cátodo y alcanzan su máxima velocidad a 1.5 mm, 3 mm, 4 mm y 1.5 mm por debajo del electrodo aproximadamente, para una longitud de arco de 3 mm, 5 mm, 7 mm y 10 mm respectivamente, donde decae la velocidad al acercarse al ánodo al cual impactan. La velocidad máxima del plasma es independiente de la longitud del arco, aunque se nota que la columna del arco tiene un plasma con velocidad que si se ve afectada por la longitud del arco, pudiéndose desarrollar más el jet con mayor longitud del arco.



**Figura 29. Efecto de la intensidad de corriente sobre la velocidad en el eje de simetría para una longitud constante de 7 mm.**

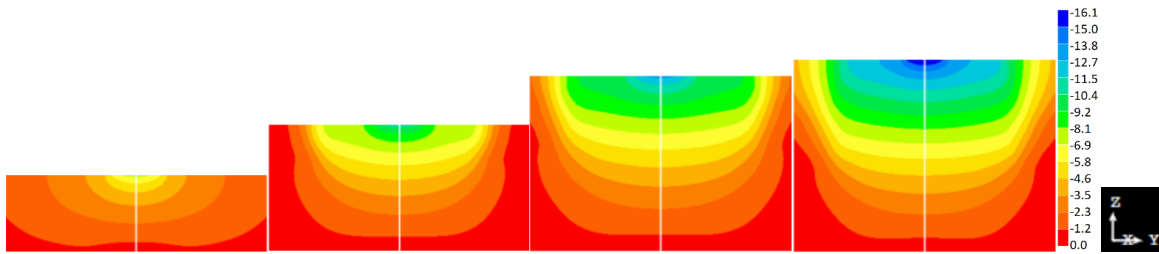
La Figura 29 muestra el efecto de la corriente con longitud constante de 7 mm sobre el eje de simetría. La presión que se genera por debajo del cátodo y la presión de estancamiento aumentan debido a un aumento de la corriente suministrada, generando aumento en la velocidad del chorro. En la Figura 29, claramente se ve que la máxima velocidad es función de la corriente del arco y que aumenta al aumentar la corriente.



**Figura 30. Perfil de densidad de campo magnético para longitudes de arco de 3 mm, 5 mm, 7 mm y 10 mm a 200 A.**

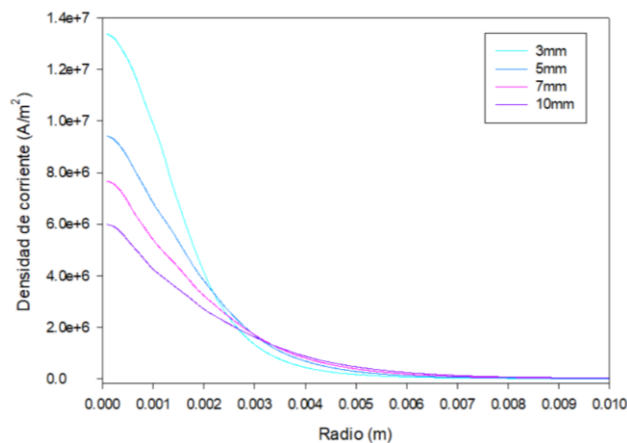
La Figura 30 muestra los perfiles de densidad de campo magnético para una longitud de arco de 3 mm, 5 mm, 7 mm y 10 mm a 200 A. Para poder compararlos se realizó un cambio en los contornos, utilizando el mismo rango de valores para los cuatro, que va desde 0.004 T hasta 0.041 T. En donde se confirma que el valor máximo de la densidad de campo magnético está por debajo de cátodo y se extiende a toda el área del arco, debido a que en este sistema que ahora es conductor de la electricidad, está pasando una determinada densidad de corriente la cual genera un campo magnético azimuthal en todo el arco, es por eso que se extiende más allá del spot, como se muestra en la Figura 30. Analizando la forma de los contornos de campo magnético se ve que dentro de la zona de conducción de carga eléctrica el campo magnético aumenta hasta alcanzar un máximo en la orilla del arco y que fuera de la zona de conducción el campo magnético disminuye siguiendo de este modo la ley de Ampere. Además, uniendo los máximos en cada distancia axial podría dibujarse la forma del arco en la columna de éste.





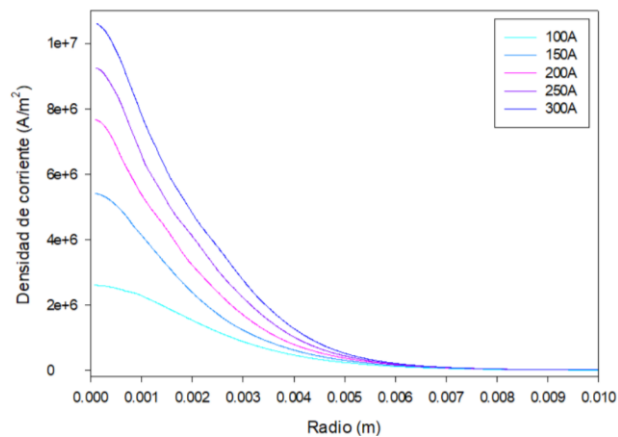
**Figura 31. Perfil del potencial eléctrico para longitudes de arco de 3 mm, 5mm, 7 mm y 10 mm a 200 A.**

En la Figura 31 se muestra el mapa del potencial eléctrico para una longitud de arco de 3 mm, 5 mm, 7 mm y 10 mm a 200 A. Para poder compararlos se realizó un cambio en los mapas, utilizando el mismo rango para los cuatro, que va desde 0 V hasta 16.1 V, en donde se observa que el voltaje para estos mapas, depende de la longitud del arco y que son de 7, 10, 13 y 16.1 volts para longitudes de 3 mm, 5 mm, 7mm y 10mm respectivamente, y que los gradientes de potencial en la zona del arco son axiales, estos son grandes en el cátodo y pequeños en el ánodo lo que indica que la densidad de corriente axial es alta en el cátodo y disminuye en dirección del ánodo de acuerdo a la ley de Ohm pero que la zona de conducción se agranda en esa misma dirección para satisfacer la ley de conservación de carga.



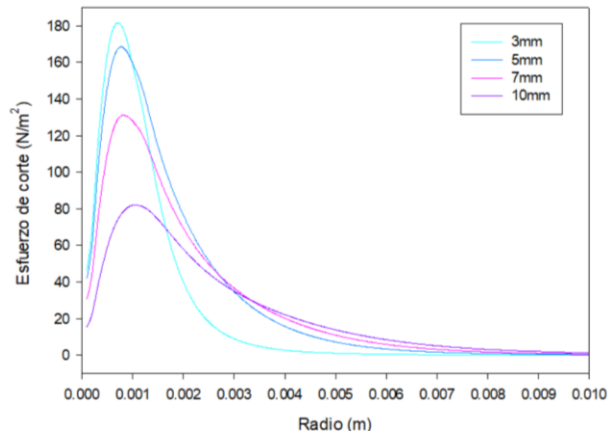
**Figura 32. Efecto de la longitud de arco sobre la densidad de corriente en el ánodo a 200 A.**

En la Figura 32 se muestra el efecto de la longitud de arco sobre la densidad de corriente en el ánodo a 200 A, en donde se muestra que en el centro se presenta una mayor densidad de corriente para todas las longitudes de arco, la cual va decreciendo conforme se avanza a lo largo de la dirección radial, con esto se explica la diferencia de temperaturas a lo largo de la campana (Ver Figura 21). La expansión del arco en dirección axial, promueve una caída en la densidad de corriente para satisfacer el principio de conservación de carga eléctrica y en consecuencia también afecta a la densidad de corriente en el ánodo.



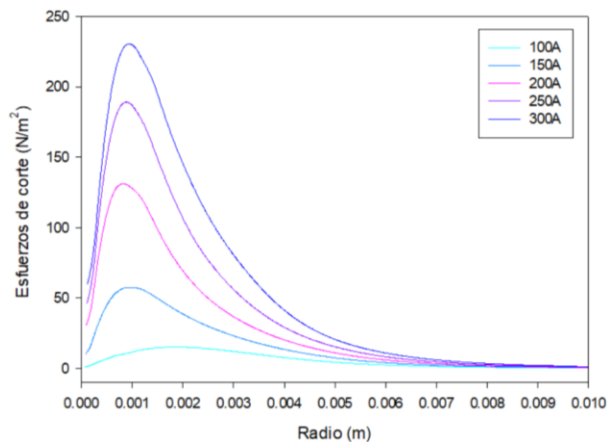
**Figura 33. Efecto de la intensidad de corriente sobre la densidad de corriente en el ánodo para una longitud constante de 7 mm.**

En la Figura 33 se muestra el aumento que se tiene de la densidad de corriente al aumentar la intensidad de corriente sobre el ánodo, para arcos de longitud constante de 7 mm. Esto se debe a que pasa una mayor cantidad de corriente por una misma área de transferencia lo cual genera que se aumente la densidad en cada caso.



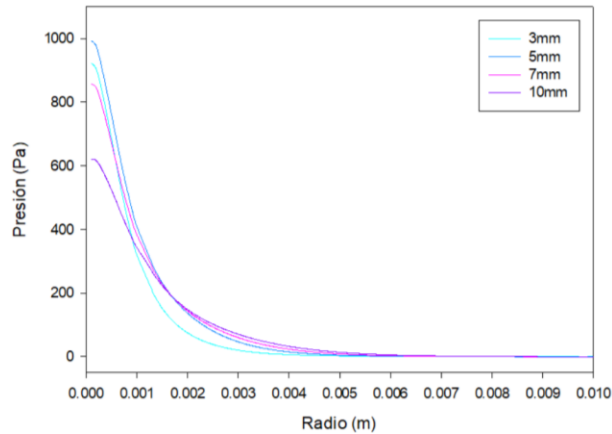
**Figura 34. Efecto de la longitud de arco sobre los esfuerzos de corte en el ánodo a 200 A.**

En la Figura 34 se muestra el efecto de la longitud de arco sobre los esfuerzos de corte en el ánodo a 200A, en donde se muestra que conforme se disminuye la longitud del arco, se incrementan los valores de esfuerzo cortante, esto se debe a que la presión de estancamiento aumenta al tener arcos cortos que no alcanzan a disipar la energía cinética del jet y chocan contra el ánodo con mayor inercia (ver Figura 36 para observar el aumento de presión en el ánodo para arcos más cortos). Este jet con más inercia es desviado en dirección radial y ejerce una mayor fricción o esfuerzo de corte con arcos cortos que con largos a la misma corriente de arco.



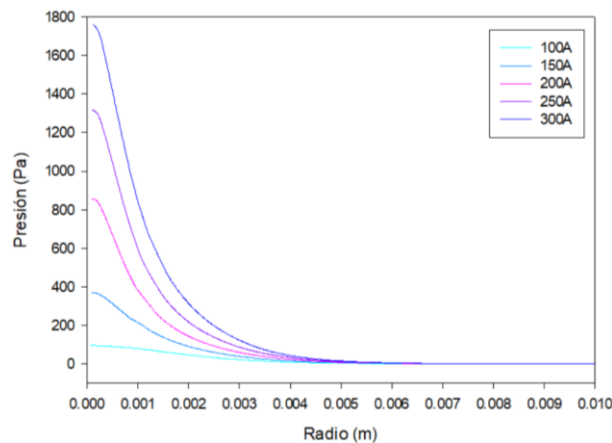
**Figura 35. Efecto de la intensidad de corriente sobre el esfuerzo de corte en el ánodo para una longitud constante de 7 mm.**

En la Figura 35 se muestra el efecto de la intensidad de corriente sobre el esfuerzo de corte en el ánodo para longitud constante de arco de 7 mm, en donde se observa que conforme se aumenta la intensidad de corriente se aumentan los valores de esfuerzo de corte, esto se debe a que conforme se aumenta la intensidad de corriente se aumenta la velocidad del jet de plasma, como se observa en la Figura 29, y esto provoca a su vez que el esfuerzo de corte se incremente.



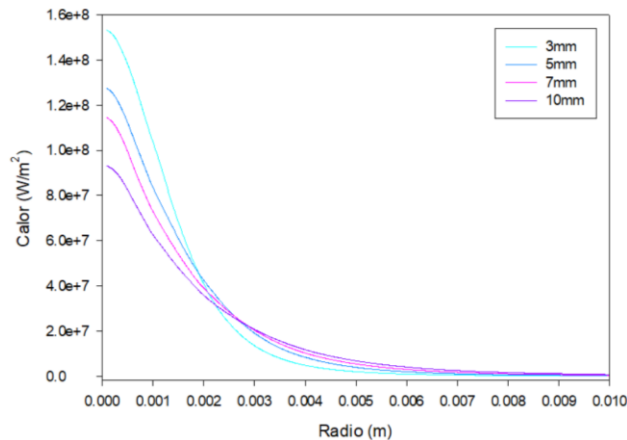
**Figura 36. Efecto de la longitud de arco sobre la presión en el ánodo a 200 A.**

En la Figura 36 se muestra el efecto de la longitud de arco sobre la presión en el ánodo a 200 A. Esta presión se genera debido al chorro que incide sobre el ánodo (con misma inercia ya que esta depende de la corriente del arco) y va a depender de que tan alejados esté el electrodo de la pieza de trabajo.



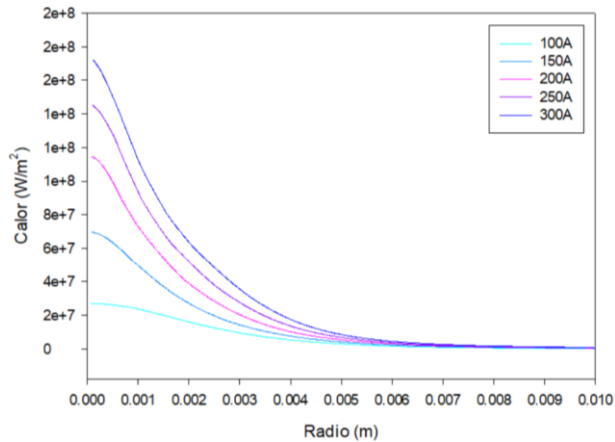
**Figura 37. Efecto de la intensidad de corriente sobre la presión en el ánodo para una longitud constante de 7 mm.**

En la Figura 37 se muestra el efecto de la intensidad de corriente sobre el perfil radial de la presión en el ánodo para arcos con longitud constante de 7 mm, en donde se observa que la presión aumenta al aumentar la intensidad de corriente. Se sabe que al aumentar la corriente aumentan las fuerzas de Lorentz y estas aumentan la presión y generan un jet más intenso con mayor velocidad e inercia, que por lo mismo va a chocar con mayor fuerza contra el ánodo provocando mayor presión.



**Figura 38. Efecto de la longitud de arco sobre el Flux de calor total en el ánodo a 200 A.**

En la Figura 38 se presenta el efecto de la longitud de arco sobre el flux de calor total en el ánodo a 200 A, en donde se muestra que a menor longitud de arco se obtiene una mayor cantidad de calor total en el centro debido a que cuando el jet de plasma incide sobre el ánodo este es reflejado con mayor fuerza ya que presenta mayor velocidad (ver Figura 28) y fluye radialmente hacia afuera con mayor intensidad, lo que provoca una mayor transferencia de calor por convección. También al ser la menor longitud del arco el ancho del arco es menor y la densidad de corriente está más concentrada cerca del centro, lo que promueve mayor calentamiento por efecto Thompson y función trabajo.



**Figura 39. Efecto de la intensidad de corriente sobre el calor total en el ánodo para una longitud constante de 7 mm.**

En la Figura 39 se muestra el efecto de la intensidad de corriente sobre el calor total en el ánodo para arcos con longitud constante de 7 mm, en donde se observa que el flux de calor total aumenta al aumentar la intensidad de corriente. El aumento en el flux de calor con el aumento en corriente, se debe a que se incrementa el flujo de electrones que generará mayor corriente que entra al ánodo por efecto Thompson y condensación de electrones, también la convección de calor se incrementa con la corriente y al tener un plasma más caliente se incrementa también la radiación, es decir, un aumento en corriente incrementa los diferentes mecanismos de transporte de calor desde el arco al ánodo.

### ***Diseño factorial de experimentos en computadora.***

Se realizó un diseño factorial de experimentos en computadora de  $2^n$ , en donde el 2 se refiere a que son dos niveles (bajo y alto, que en este trabajo se tomaron los extremos inferior y superior de ambas variables) y n es el número de variables o factores, en este caso las variables son la intensidad de corriente y la longitud de arco (Ver Tabla 5). Por lo que el diseño factorial de experimentos será de  $2^2$ , obteniéndose en total 4 experimentos en computadora (Ver Tabla 6).

**Tabla 5. Niveles de las variables.**

Variables	Bajo	Alto
Longitud de arco	3 mm	10 mm
Intensidad de corriente	100 A	300 A

**Tabla 6. Experimentos realizados en computadora.**

#Experimento	Longitud del arco	Intensidad de corriente
1	10 mm	300 A
2	10 mm	100 A
3	3 mm	300 A
4	3 mm	100 A

En la Tabla 7 se presentan los resultados del diseño factorial de experimentos utilizado, el cual nos indica cual es la variable más significativa para el proceso de soldadura GTAW en cuanto al aporte del calor total en W el cual se obtuvo integrando el flux de calor de cada caso sobre el área circular del ánodo haciendo una integración numérica por el método del trapecio. Se encontró que al aumentar de 100 A a 300 A sin importar la longitud del arco, el efecto que tiene esta variable es aumentar el calor aportado a la soldadura en 2369 W manteniendo el mismo ancho de la distribución en el radio del charco de soldadura, lo que implicaría una penetración mayor con un aumento en la corriente y un charco de igual ancho. Por su parte, al aumentar de 3 mm a 10 mm la longitud del arco, se aumenta en 504.5W el calor aportado, lo cual implicaría que prácticamente no hay cambio en cuanto al calor aportado, aunque la distribución de calor es más ancha a medida que aumenta la longitud dl arco, lo que a su vez indicaría menor penetración y mayor anchura del charco conforme aumenta la longitud del arco. Mientras que el efecto combinado de ambas variables produce un aumento de 376.5 W, que tampoco es significativa. Entonces, se puede decir que la intensidad de corriente es mucho más importante que la longitud del arco en cuanto al calor aportado a la soldadura.

De igual forma se obtuvo una ecuación (ec.22) de regresión que predice el calor aportado a la soldadura.

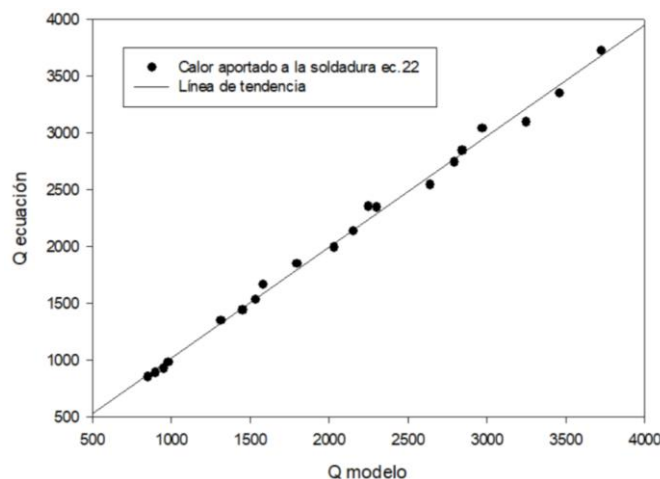
**Tabla 7. Coeficientes codificados.**

Término constante	Efecto (W)
I (corriente)	2369.0
L (longitud de arco)	504.5
I*L	376.5

Ecuación para obtener la curva de regresión de resultados:

$$Q = -36.50 + 8.346 A - 35.50 L + 0.5379 A * L \quad (\text{ec.22})$$

Para saber si este modelo de regresión predice fielmente los valores de calor aportado calculados para cualquier caso o con cualesquiera condiciones de operación, se realizó una gráfica (Figura 40) con los valores obtenidos por la ecuación 22 y los valores obtenidos de la realización de la integral del calor total en la parte del ánodo de cada caso. Cada punto de la gráfica, es el valor de cada caso convergido que se utilizó para la realización de este trabajo, cabe mencionar que son 20 casos en donde para cada longitud de arco (3 mm, 5 mm, 7 mm y 10 mm) se varió la intensidad de corriente de 100 A, 150 A, 200 A, 250 A y 300 A.



**Figura 40. Calor que se aporta a la soldadura en cada uno de los casos de estudio.**



En la Figura 40 se puede observar que la mayoría de los puntos están sobre la línea de tendencia (Ec. 22), por lo que se puede decir que es un muy buen modelo de regresión multilíneal, el cual predice fielmente el calor aportado.

**Tabla 8. Valores máximos para temperatura, potencial, presión, densidad de campo magnético y velocidad.**

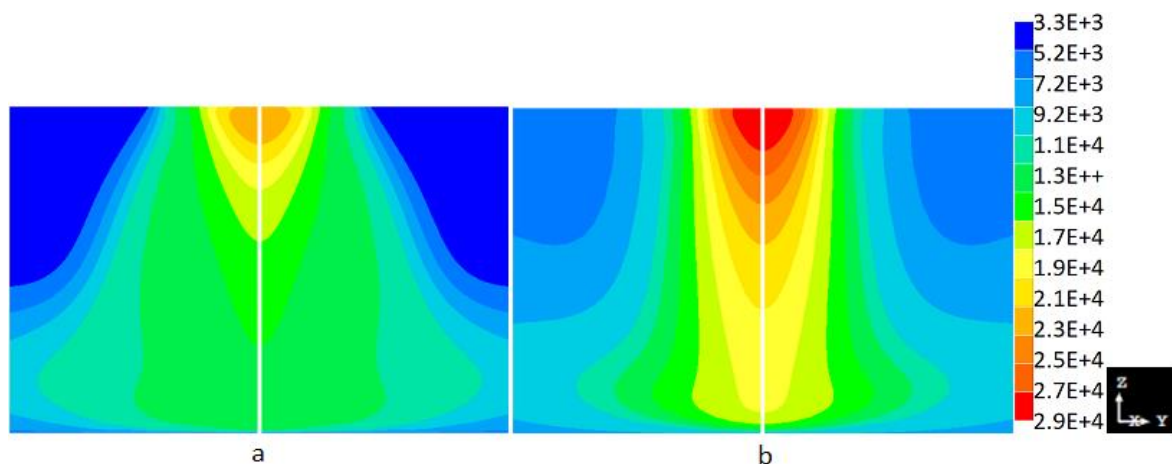
	Temperatura máxima del arco. (K)	Voltaje máximo del arco. (V)	Presión máxima del arco. (Pa)	Densidad de campo magnético máxima del arco. (Tesla)	Velocidad máxima del arco. (m/s)
<b>3mm, 100A</b>	24843	-6.8	304	0.028	3.01 E+2
<b>3mm, 150A</b>	27428	-6.9	591	0.035	4.28 E+2
<b>3mm, 200A</b>	28979	-7.2	921	0.041	5.3 E+2
<b>3mm, 250A</b>	29962	-7.5	1238	0.046	6.18 E+2
<b>3mm, 300A</b>	31296	-8.0	1552	0.050	6.82 E+2
<b>5mm, 100A</b>	24462	-9.0	332	0.028	2.90 E+2
<b>5mm, 150A</b>	27103	-9.8	594	0.034	4.26 E+2
<b>5mm, 200A</b>	28740	-10.7	991	0.040	5.47 E+2
<b>5mm, 250A</b>	29911	-11.5	1400	0.045	6.56 E+2
<b>5mm, 300A</b>	31592	-12.2	1781	0.049	7.44 E+2
<b>7mm, 100A</b>	24470	-11.4	350	0.027	2.92 E+2
<b>7mm, 150A</b>	27171	-12.2	595	0.033	4.10 E+2
<b>7mm, 200A</b>	28814	-13.1	856	0.039	5.30 E+2
<b>7mm, 250A</b>	29927	-13.9	1316	0.044	6.43 E+2
<b>7mm, 300A</b>	31497	-14.7	1760	0.048	7.45 E+2
<b>10mm,100A</b>	24436	-14.3	348	0.025	2.91 E+2
<b>10mm,150A</b>	27135	-15.2	585	0.032	4.16 E+2
<b>10mm,200A</b>	28741	-16.1	845	0.038	5.24 E+2
<b>10mm,250A</b>	29861	-17.2	1158	0.042	6.34 E+2
<b>10mm,300A</b>	31356	-18.2	1640	0.047	7.41 E+2

En la Tabla 8 se presentan los valores máximos de temperatura, presión, campo magnético y velocidad así como los voltajes de arcos de 3, 5, 7 y 10 mm de longitud para corrientes de 100, 150, 200, 250 y 300 A. Se ve que tanto la temperatura como la velocidad máximas no dependen de la longitud del arco sino de la corriente del arco. El voltaje del arco aumenta tanto con el aumento de corriente como de longitud de arco. Esto se debe a que de acuerdo con la ley de Ohm el voltaje aumenta de

manera proporcional al aumento en corriente y con el aumento en resistencia. Un aumento de longitud de arco implica un aumento en la resistencia ya que aumenta la longitud del conductor.

La presentación de resultados mostrados solo incluye algunos casos ilustrativos por razones de espacio. Los resultados completos para arcos de 7 mm de longitud con todas las corrientes utilizadas en este trabajo, se presentan en el Anexo A donde se muestran los contornos de temperatura, campo magnético, presión, potencial eléctrico y patrones de flujo.

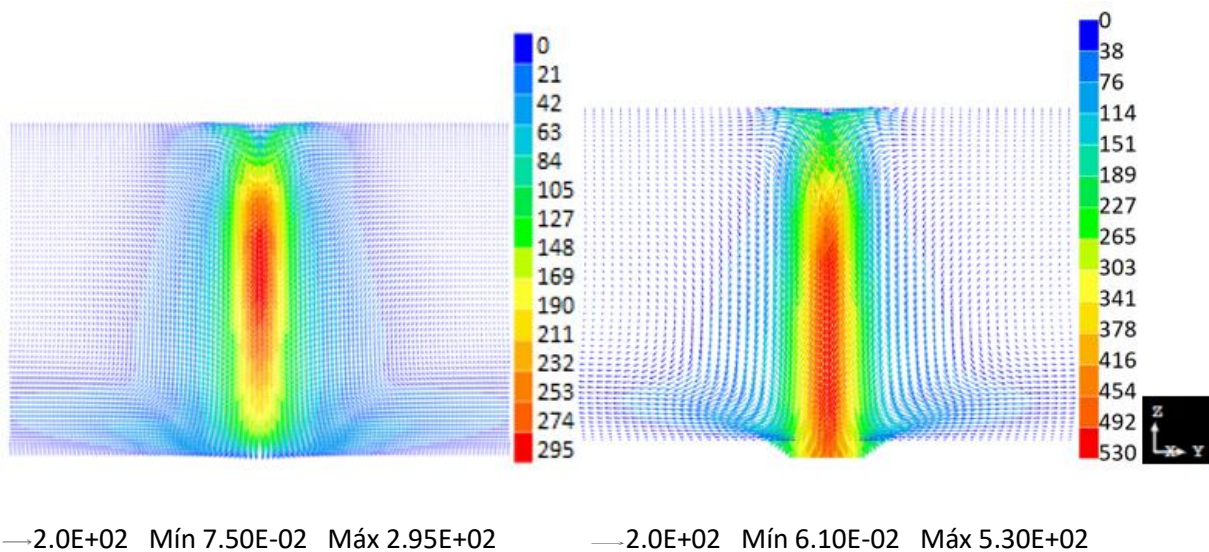
### ***Comparación del CO<sub>2</sub> y Ar como gas de cobertura.***



**Figura 41. Contornos de temperatura para una longitud de arco de 7 mm e intensidad de corriente de 200 A, con Ar (a) y CO<sub>2</sub> (b) como gas de cobertura.**

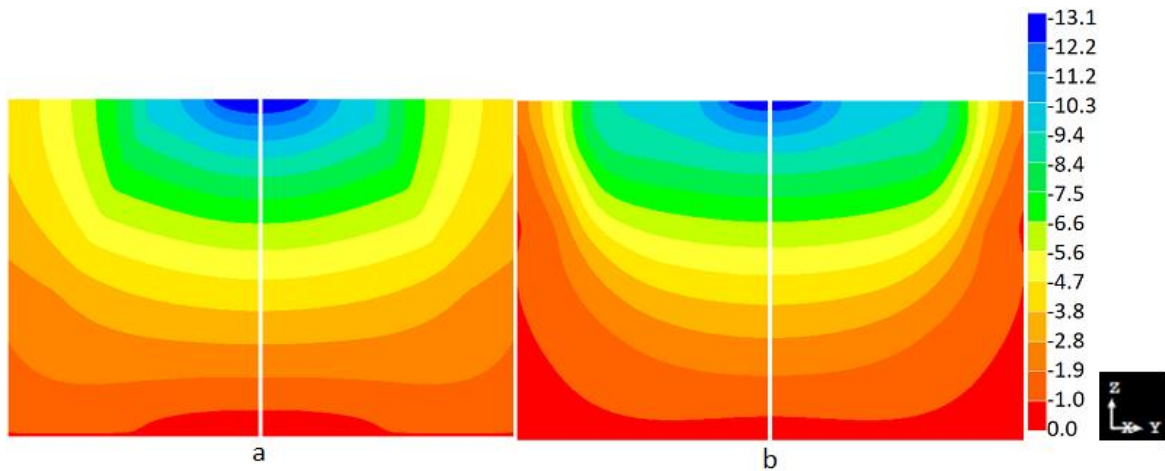
La Figura 41 muestra los contornos de temperatura para una longitud de arco de 7mm e intensidad de corriente de 200 A para Ar y CO<sub>2</sub> como gases de cobertura. Para poder compararlos se realizó un cambio en los contornos, utilizando el mismo rango de temperaturas para ambos, que va desde 3,300 K hasta los 29,000 K con el propósito de poder comparar ambos contornos. Se observa que, cuando se utiliza CO<sub>2</sub> como gas de cobertura se obtienen temperaturas mayores desde el cátodo así como a lo largo del eje de simetría y forma lo largo de la distancia radial. Esta diferencia entre los contornos de temperatura del Ar y el CO<sub>2</sub> es determinada

porque el arco de CO<sub>2</sub> se expandió menos que el de Ar, lo que implica que la densidad de corriente cerca del cátodo para el arco de CO<sub>2</sub> es mayor que para Ar y entonces hay mayor efecto Joule y temperaturas mayores en CO<sub>2</sub> que en Ar. También se aprecian más alargadas las isothermas en el caso del CO<sub>2</sub> que en el Ar, lo cual se puede explicar a que el jet de CO<sub>2</sub> es más intenso que el de Ar como se verá en las siguientes figuras.



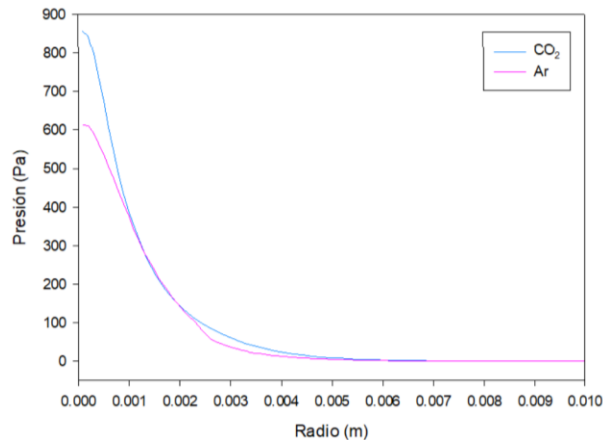
**Figura 42. Patrones de flujo para una longitud de arco de 7 mm e intensidad de corriente de 200 A, con Ar (a) y CO<sub>2</sub> (b) como gas de cobertura.**

La Figura 42 muestra los patrones de flujo para una longitud de arco de 7 mm e intensidad de corriente de 200 A para Ar y CO<sub>2</sub> como gases de cobertura. Ambos patrones de flujo tiene sus rangos de velocidad individual por lo que la escala de colores en este caso no se puede utilizar para hacer una comparación. Se puede observar que, cuando se utiliza CO<sub>2</sub> como gas de cobertura se obtiene un chorro de plasma con mayor velocidad el cual se encuentra concentrado en una menor área, mientras que en el caso de Ar el jet se encuentra más expandido y con menor velocidad. Esto se debe que el arco en CO<sub>2</sub> se expande menos que en Ar y por lo tanto la densidad de corriente, campo magnético y consecuentemente las fuerzas de Lorentz son mayores en CO<sub>2</sub> que en Ar, lo que da un jet más potente en el primer gas.



**Figura 43. Perfil del potencial eléctrico para una longitud de arco de 7 mm e intensidad de corriente de 200 A, con Ar (a) y CO<sub>2</sub> (b) como gases de cobertura.**

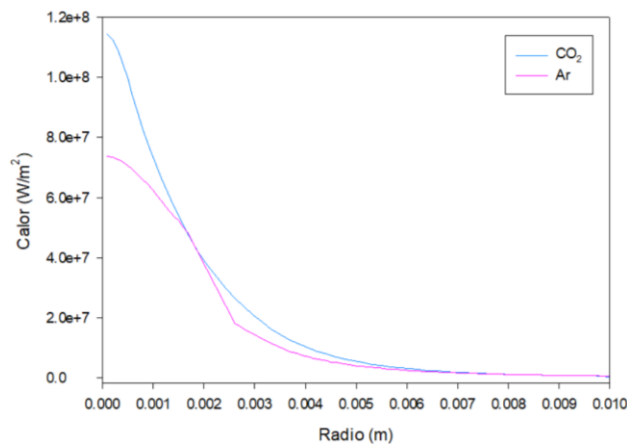
En la Figura 43 muestra los perfiles del potencial eléctrico para una longitud de arco de 7 mm e intensidad de corriente de 200 A para Ar y CO<sub>2</sub> como gases de cobertura. Para poder compararlos se realizó un cambio en los perfiles, utilizando el mismo rango de potencial eléctrico, que va desde 0 V hasta -13.1 V, ya que ambos arcos tiene el mismo voltaje. Se puede observar que los gradientes de potencial son grandes en el cátodo y pequeños en el ánodo lo que indica que la densidad de corriente es alta en el cátodo y disminuye en dirección al ánodo y estos son muy parecidos en ambos gases. La única diferencia apreciable entre ambos gases es que las líneas isopotenciales horizontales están más extendidas en el caso de Ar que en el de CO<sub>2</sub> lo cual confirma que el arco de Ar está más expandido que el de CO<sub>2</sub>.



**Figura 44. Efecto del gas de cobertura sobre la presión en el ánodo a 200 A y una longitud de arco de 7 mm.**

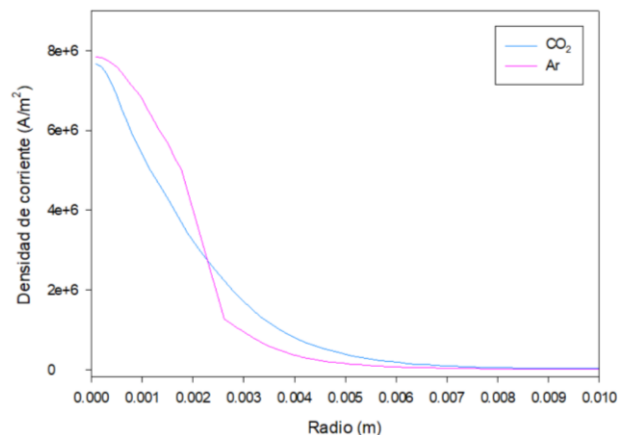
En la Figura 44 se muestra el efecto del gas de cobertura sobre la presión en el ánodo a 200 A y con una longitud de arco de 7 mm, en donde se tiene que el CO<sub>2</sub> como gas de cobertura genera una mayor presión en comparación con el uso de Ar.

Esto se debe a que se produce un chorro de plasma que presenta una mayor velocidad que la del Ar, el cual chocará con mayor fuerza, generándose así una presión de estancamiento mayor.



**Figura 45. Efecto del gas de cobertura sobre el flux de calor total en el ánodo a 200 A y una longitud de arco de 7 mm.**

En la Figura 45 se muestra el efecto del gas de cobertura sobre el Flux de calor total en el ánodo a 200 A y una longitud de arco de 7 mm, en donde se observa que el CO<sub>2</sub> presenta valores de flux de calor total en el ánodo mayor que el Ar, esto se debe a que, el CO<sub>2</sub> presenta un perfil de temperatura y patrón de flujo mayor que el Ar y cabe mencionar que la convección es la que transporta el calor por medio del movimiento del plasma, desde el cátodo hacia el ánodo, ya que estas dos se encuentran a diferentes temperaturas. Además, la densidad de corriente está más concentrada en el caso de CO<sub>2</sub> que se expandió menos que el Ar, por lo que los mecanismos de transferencia de calor electrónicos (efecto Thompson y función trabajo) son mayores en CO<sub>2</sub> que en Ar.



**Figura 46. Efecto del gas de cobertura sobre la densidad de corriente en el ánodo a 200 A y una longitud de arco de 7 mm.**

En la Figura 46 se muestra el efecto del gas de cobertura sobre la densidad de corriente en el ánodo a 200 A y una longitud de arco de 7 mm, en donde se tiene que, el Ar presenta valores de densidad de corriente mayor que el CO<sub>2</sub> hasta un radio de 0.0025 m y posteriormente es el CO<sub>2</sub> el que tiene mayor densidad de corriente que el Ar. Se confirma que el CO<sub>2</sub> presenta una distribución de corriente más concentrada en el centro que en el caso de Ar, aunque ambos perfiles de densidad de corriente son similares en el ánodo.

## CAPÍTULO 4: Conclusiones.

- Conforme se incrementa la corriente aumenta la densidad de corriente la cual va a aumentar la temperatura, la presión, tanto en el ánodo como en el cátodo, así como también aumentar el voltaje y el campo magnético, con lo que también aumentan las fuerzas de Lorentz y la velocidad del jet de plasma. Esto se debe a que con el incremento en corriente aumenta la presión debajo del cátodo para balancear el aumento en fuerzas de Lorentz, lo que provoca un jet de plasma más intenso que choca más fuertemente contra el charco. Por otra parte, al haber mayor densidad de corriente aumenta el calor Joule y se tienen plasmas más calientes. El voltaje aumenta explicado por la ley de Ohm. Todos los mecanismos de transferencia de calor se incrementan al aumentar la corriente.
- El aumento de la longitud de arco no afecta de manera considerable la temperatura, la presión, densidad de campo magnético y la velocidad del jet, solo afecta al voltaje ya que al aumentar la longitud de arco, aumenta la resistencia del arco y aumenta el voltaje de acuerdo a la ley de Ohm. Tampoco un aumento en longitud de arco afecta en gran medida el calor aportado por la soldadura. Estas relaciones se explican porque las fuerzas de Lorentz debajo del cátodo son iguales al variar la longitud del arco (manteniendo constante la corriente del arco) y por lo tanto la presión y la velocidad del jet serán iguales. Además, al no variar la corriente no cambia el efecto Joule y las temperaturas son las mismas. Por lo tanto, ningún mecanismo de transferencia de calor se modifica al variar la longitud del arco.
- La corriente es mucho más importante y significativa que la longitud del arco en cuanto al calor total aportado por el arco, lo cual se pudo corroborar con un modelo adecuado de regresión múltiple que predice bien el comportamiento del modelo en cuanto al calor total aportado por el arco.
- El CO<sub>2</sub> como gas de cobertura se expande menos y genera la obtención de arcos más calientes y un chorro de plasma con mayor velocidad, así como el

aumento de la presión y el calor total en el ánodo todo esto comparado con un arco de Ar.



## **Bibliografía.**

- [1] Ramírez M. A., Trapaga G., and McKelliget J., Modelling Smul. Mater. Sci.Eng. 11 (2003) 675-695.
- [2] Maecker H 1955 Z. Phys. 141 198–216
- [3] Squire H B 1951 Quart. J. Mech. Appl. Math. IV (Pt.3) 321–9
- [4] Hsu K C, Etemadi K and Pfender E 1982 J. Appl. Phys. Vol. 54 1293–302
- [5] McKelliget J and Szekely J 1986 Metall. Mater. Trans. A Vol. 17 1139–48
- [6] Lowke, J. J. and Ludwing, H. C. (1975). “A simple model for high-current arcs stabilized by forced convection”. Journal of applied physics. Vol. 46, No. 8, pp 52-60.
- [7] Ramakrishnan, S. and B. Nuon, Prediction of properties of free burning welding arc columns. J. Phys., 1980. Vol. 13: p. 1845-1853.
- [8] Allum, C.J., Gas flow in the column of a TIG welding arc. (1981). Journal of Physics D: Applied Physics, Vol. 14, No. 6, pp 1041-1059.
- [9] Hsu, K. C., Etemadi, K. and Pfender, E. (1982). “Study of the free-burning high-intensity argon arc”. Journal of applied physics, Vol. 54, No. 3, pp 1293-1302.
- [10] McKelliget, J. and Szekely, J. (1986). “Heat transfer and fluid flow in the welding arc”. Metallurgical Transactions A, Vol. 17A, pp 1139-1148.
- [11] Kim, W. H., Fan, H. G. and Na, S. J. (1997). “A mathematical model of gas tungsten arc welding considering the cathode and the free surface of the weld pool”. Metallurgical and Materials Transactions B, Vol. 28B, pp 679-686.
- [12] Nestor, O. H. (1961). “Heat intensity and current density distributions at the anode of high current, inert gas arcs”. Journal of applied physics, 1961. Vol. 33(5): pp 1638-1648.
- [13] L. Sansonnens, J Haidar, and J.J. Lowke: J. Phys. D: Appl. Phys., 2000, Vol. 33, pp. 148-57

- [14] Manabu Tanaka, Hidenori Terasaki, Masao Ushio, and Jonh J. Lowke, Metallurgical and materials transactions Vol. 33A (2002) 2043-2052.
- [15] J.J. Lowke and M. Tanaka, J. Phys.D:Appl.Phys. Vol. 39 (2006) 3634-3643
- [16] A. B. Murphy, M. Tanaka, S Tashiro, T. Sato, and J.J. Lowke, J. Phys.D:Appl.Phys. Vol. 42 (2009) 1-14
- [17] Anthony B. Murphy, Manabu Tanaka, Kentaro Yamamoto, Shinichi Tashiro, John J. Lowke, Kostya Ostrikov, Vacuum Vol. 85 (2010) 579-584
- [18] M. Schnick, U. Fuessel, M Hertel, M. Haessler, A. Spille-Kohoff and A.B. Murphy, J. Phys. D: Appl. Phys. Vol. 43 (2010) 1-11
- [19] J. Mougnot, J.J. Gonzalez, P. Freton and M. Masquère, J. Phys. D: Appl. Phys. Vol. 46 (2013) 1-14
- [20] Anthony B. Murphy, Plasma Chem Plasma Process Vol. 35 (2015) 471-489
- [21] A. B. Murphy. Comunicación personal. 2017
- [22] Robert W. Messler, Jr, Principles of welding; Processes, physics, chemistry, and metallurgy, 1999
- [23] AWS, Welding handbook, welding handbook; fundamentals of welding, 6°Ed. 1968
- [24] Sahling-Latzin, La técnica de la soldadura, en la ingeniería de la construcción, 3ra Edición, Editorial Blume, Madrid Barcelona, 1996
- [25] Horwits, Soldadura; aplicaciones y práctica, Editorial representaciones y servicios de ingeniería, 1979
- [26] ASM Handbook; Welding Brazing and Soldering, V6.
- [27] Betancourt, Bárbara. (2006). Modelación Matemática de la Soldadura con Arco TIG expuesta en Diferentes Atmósferas (tesis de licenciatura). Universidad Nacional Autónoma de México, México.

[28] M.I. Boulos, P. Fauchaus, E. Pfender; Termal Plasmas Fundamentals and Applications, Vol. 1, Plenum Press 1994

[29] AWS, Structural Welding Code-Steel, 22<sup>da</sup> Ed. 2010.

## **CAPITULO 6: Apéndices.**

### **Lista de símbolos.**

$v_r$  - componente de velocidad radial

$v_z$  - Componente de velocidad axial

**P** – Presión

**$\rho$**  – Densidad

$J_z$  - Componente de densidad de corriente axial

$J_r$  - Componente de densidad de corriente radial

$B_\theta$  - Densidad de flux magnético azimutal

**$\mu$**  - Viscosidad

**h** – Entalpía

**Cp** - Calor específico

**k** - Conductividad térmica

$\sigma$  - Conductividad eléctrica

$S_r$  - Perdidas de radiación por unidad de volumen

**E** - Campo eléctrico

**H** - Campo magnético

$\phi$  - Potencial eléctrico relacionado al campo eléctrico

$J_a$  - Densidad de corriente en el ánodo

$V_\phi$  - Función trabajo del charco de soldadura.

$\sigma_{Hw}$  - Entalpía y número de Prandtl

**b** – Sufijo que denota la posición en el borde de la capa límite

**w** – Sufijo que representa la posición en la superficie del charco de soldadura

$r_{i,j}$  - Vector que une la superficie de cada elemento en la superficie del charco con cada volumen en el arco

$V_j$  - volumen en el arco

$\psi$  - Ángulo formado entre  $r_{i,j}$  y el vector normal de la superficie del charco

$\alpha$  - Parámetro que representa el rango entre la temperatura del electrón y la temperatura del plasma en la caída del ánodo

## Índice de Figuras.

<b>Figura 1.</b> Esquema de los procesos de soldadura y procesos aliados. ....	10
<b>Figura 2.</b> Imagen que muestra los diferentes electrodos de Tungsteno. ....	13
<b>Figura 3.</b> Imagen que muestra la posible forma de la punta de los electrodos. ....	18
<b>Figura 4.</b> Forma del arco y perfil de la zona de fusión en función del ángulo del electrodo. ....	19
<b>Figura 5.</b> Posiciones de placa de ensayo para soldaduras de filete (a) y canal (b). .....	20
<b>Figura 6.</b> Posiciones de tubos o tuberías de ensayo para soldaduras de canal (a) y filete (b). ....	21
<b>Figura 7.</b> Esquema que muestra la posición del conductor eléctrico para la inducción de la corriente eléctrica hacia el electrodo de tungsteno. ....	23
<b>Figura 8.</b> Esquema del proceso de Soldadura de arco de tungsteno y gas, que muestra el sistema de enfriamiento. ....	24
<b>Figura 9.</b> Resumen de las características de los diversos modos actuales y operativos del proceso GTAW. ....	26
<b>Figura 10.</b> Imagen que muestra el plasma formado en el proceso de GTAW. ....	29
<b>Figura 11.</b> Esquema simplificado del proceso de soldadura con arco eléctrico. ....	30
<b>Figura 12.</b> Imagen que muestra el efecto termiónico y la ionización. ....	31
<b>Figura 13.</b> Imagen en la cual se presenta el dominio de cómputo a resolver en dos dimensiones en coordenadas cilíndricas polares, mostrando las fronteras del sistema. ....	42
<b>Figura 14.</b> Densidad del CO <sub>2</sub> en función de la temperatura. ....	51
<b>Figura 15.</b> Entalpía del CO <sub>2</sub> en función de la temperatura. ....	52
<b>Figura 16.</b> Calor específico del CO <sub>2</sub> en función de la temperatura. ....	52
<b>Figura 17.</b> Viscosidad del CO <sub>2</sub> en función de la temperatura. ....	53
<b>Figura 18.</b> Conductividad térmica del CO <sub>2</sub> en función de la temperatura. ....	54
<b>Figura 19.</b> Conductividad eléctrica del CO <sub>2</sub> en función de la temperatura. ....	54
<b>Figura 20.</b> Radiación del CO <sub>2</sub> en función de la temperatura. ....	55
<b>Figura 21.</b> Contornos de temperatura para longitudes de arco de 3 mm, 5mm, 7 mm y 10 mm a 200 A. ....	56
<b>Figura 22.</b> Efecto de la longitud de arco sobre la temperatura en el eje de simetría a 200 A. ....	57
<b>Figura 23.</b> Efecto de la intensidad de corriente sobre la temperatura en el eje de simetría para una longitud constante de 7 mm. ....	58
<b>Figura 24.</b> Perfiles de presión en el eje de simetría para longitudes de arco de 3 mm, 5 mm, 7 mm y 10 mm a 200 A. ....	58
<b>Figura 25.</b> Efecto de la longitud de arco sobre la presión en el eje de simetría a 200 A. ....	59
<b>Figura 26.</b> Efecto de la intensidad de corriente sobre la presión en el eje de simetría para una longitud constante de 7 mm. ....	60

<b>Figura 27.</b> Patrones de flujo para longitudes de arco de 3 mm, 5 mm, 7 mm y 10 mm a 200 A. ....	61
<b>Figura 28.</b> Efecto de la longitud de arco sobre la velocidad en el eje de simetría a 200 A. ....	62
<b>Figura 29.</b> Efecto de la intensidad de corriente sobre la velocidad en el eje de simetría para una longitud constante de 7 mm. ....	62
<b>Figura 30.</b> Perfil de densidad de campo magnético para longitudes de arco de 3 mm, 5 mm, 7 mm y 10 mm a 200 A. ....	63
<b>Figura 31.</b> Perfil del potencial eléctrico para longitudes de arco de 3 mm, 5 mm, 7 mm y 10 mm a 200 A. ....	64
<b>Figura 32.</b> Efecto de la longitud de arco sobre la densidad de corriente en el ánodo a 200 A. ....	64
<b>Figura 33.</b> Efecto de la intensidad de corriente sobre la densidad de corriente en el ánodo para una longitud constante de 7 mm. ....	65
<b>Figura 34.</b> Efecto de la longitud de arco sobre los esfuerzos de corte en el ánodo a 200 A. ....	66
<b>Figura 35.</b> Efecto de la intensidad de corriente sobre el esfuerzo de corte en el ánodo para una longitud constante de 7 mm. ....	66
<b>Figura 36.</b> Efecto de la longitud de arco sobre la presión en el ánodo a 200 A. ....	67
<b>Figura 37.</b> <i>Efecto de la intensidad de corriente sobre la presión en el ánodo para una longitud constante de 7 mm. ....</i>	67
<b>Figura 38.</b> Efecto de la longitud de arco sobre el Flux de calor total en el ánodo a 200 A. ....	68
<b>Figura 39.</b> Efecto de la intensidad de corriente sobre el calor total en el ánodo para una longitud constante de 7 mm. ....	69
<b>Figura 40.</b> Calor que se aporta a la soldadura en cada uno de los casos de estudio. ....	71
<b>Figura 41.</b> Contornos de temperatura para una longitud de arco de 7 mm e intensidad de corriente de 200 A, con Ar (a) y CO <sub>2</sub> (b) como gas de cobertura. ....	73
<b>Figura 42.</b> Patrones de flujo para una longitud de arco de 7 mm e intensidad de corriente de 200 A, con Ar (a) y CO <sub>2</sub> (b) como gas de cobertura. ....	74
<b>Figura 43.</b> Perfil del potencial eléctrico para una longitud de arco de 7 mm e intensidad de corriente de 200 A, con Ar (a) y CO <sub>2</sub> (b) como gases de cobertura. ....	75
<b>Figura 44.</b> Efecto del gas de cobertura sobre la presión en el ánodo a 200 A y una longitud de arco de 7 mm. ....	76
<b>Figura 45.</b> Efecto del gas de cobertura sobre el flux de calor total en el ánodo a 200 A y una longitud de arco de 7 mm. ....	76
<b>Figura 46.</b> Efecto del gas de cobertura sobre la densidad de corriente en el ánodo a 200 A y una longitud de arco de 7 mm. ....	77
<b>Figura 47.</b> Contornos de temperatura para una longitud de arco de 7 mm a 100 A, 150 A, 200 A, 250 A y 300 A. ....	89
<b>Figura 48.</b> Perfiles de densidad de campo magnético para una longitud de arco de 7 mm a 100 A, 150 A, 200 A, 250 A y 300 A. ....	90

**Figura 49.** Perfiles de presión para una longitud de arco de 7 mm a 100 A, 150 A, 200 A, 250 A y 300 A. .... 91

**Figura 50.** Perfiles de potencial eléctrico para una longitud de arco de 7 mm a 100 A, 150 A, 200 A, 250 A y 300 A..... 92

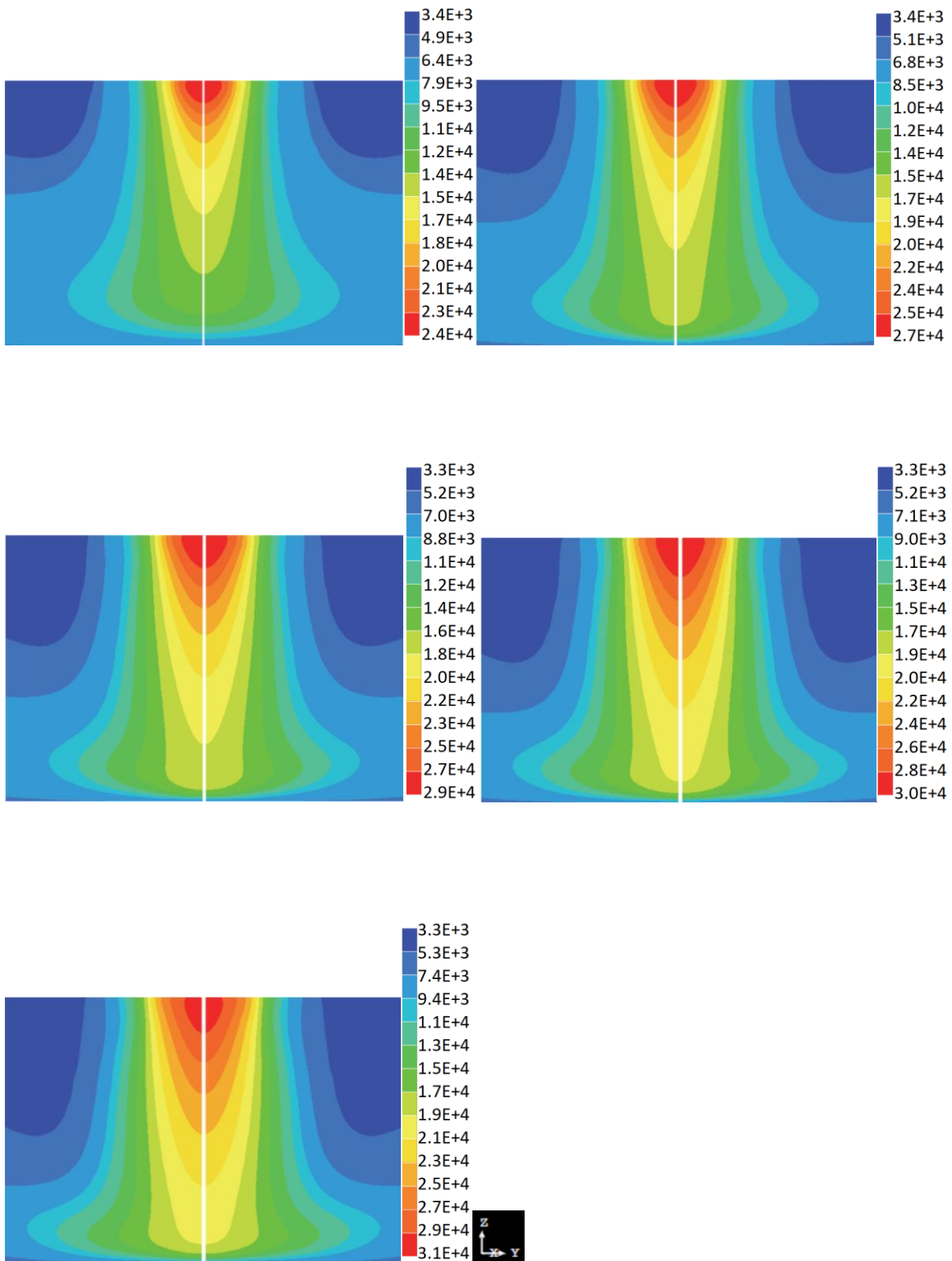
**Figura 51.** Patrones de flujo para una longitud de arco de 7 mm a 100 A, 150 A, 200 A, 250 A y 300 A. .... 93



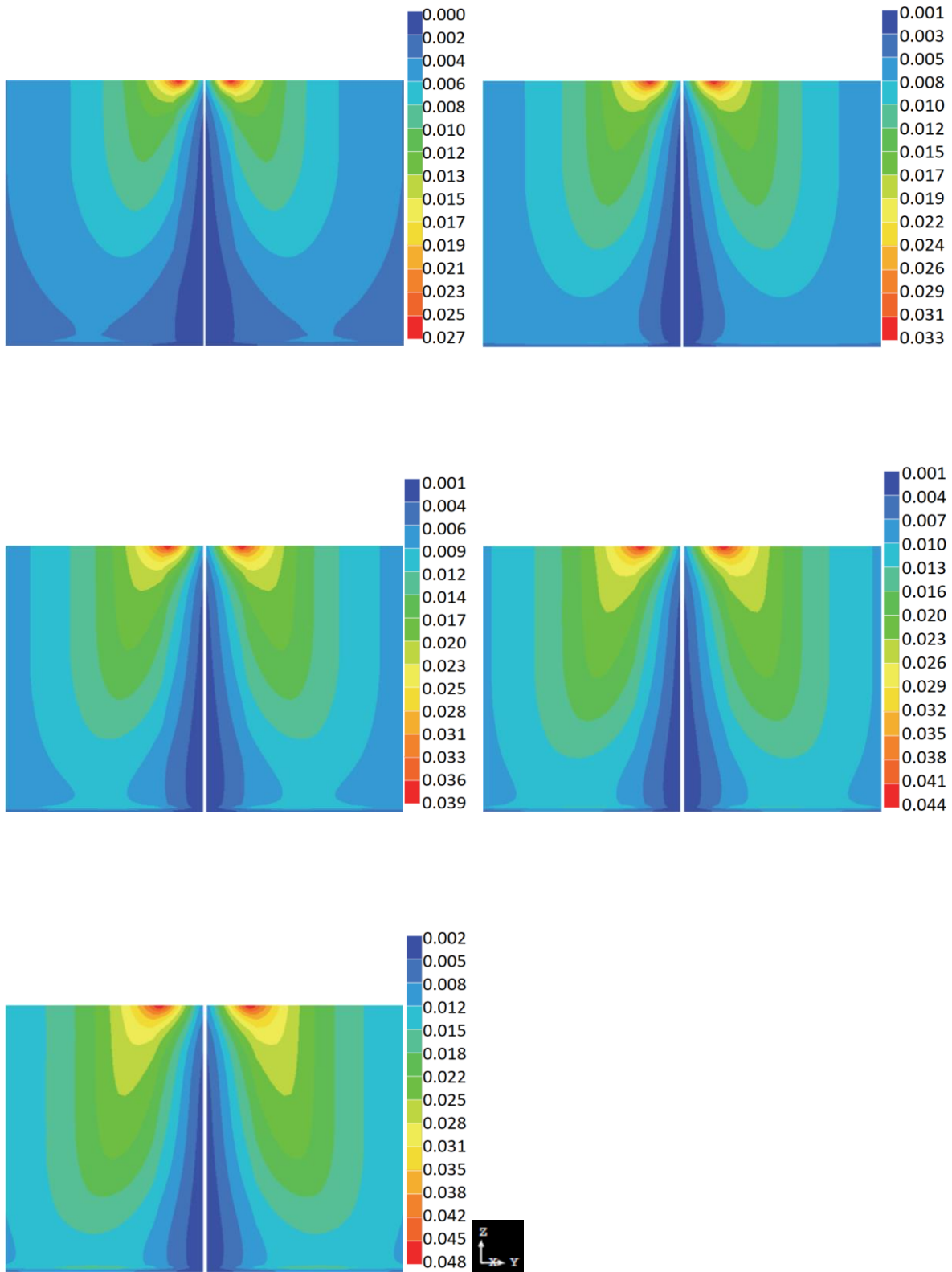
## ***Índice de Tablas.***

<b>Tabla 1.</b> Algunos procesos de soldadura de arco con fusión.....	11
<b>Tabla 2.</b> Codificación por color y elementos de amalgama para varias aleaciones para electrodos de tungsteno. ....	13
<b>Tabla 3.</b> Diferencias en los arcos según el afilado del electrodo. ....	18
<b>Tabla 4.</b> Tabla con las condiciones de frontera del sistema, de todas las variables (ver Figura 13).....	48
<b>Tabla 5.</b> Niveles de las variables. ....	70
<b>Tabla 6.</b> Experimentos realizados.....	70
<b>Tabla 7.</b> Coeficientes codificados. ....	71
<b>Tabla 8.</b> Valores máximos para temperatura, potencial, presión, densidad de campo magnético y velocidad. ....	72

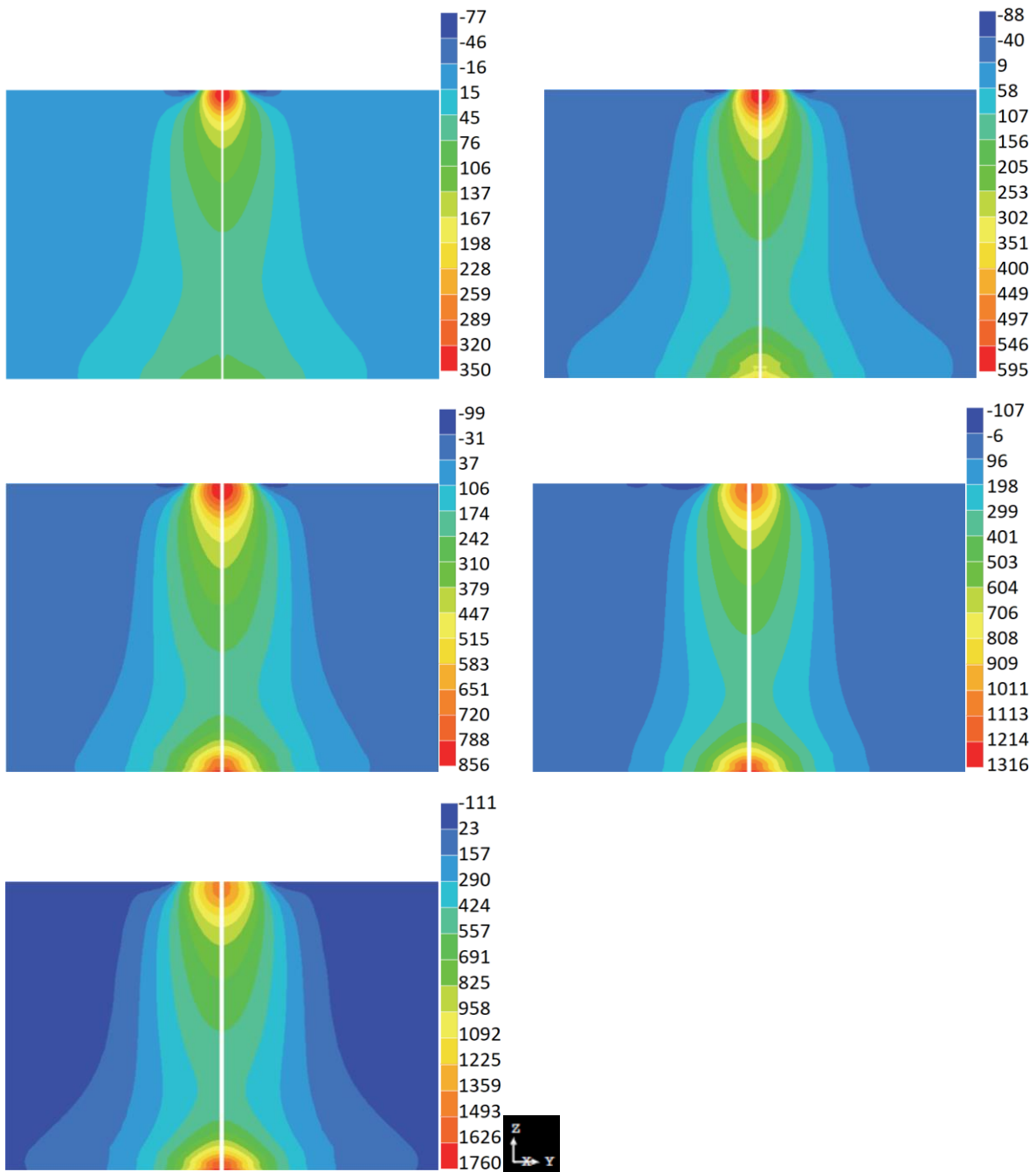
**Anexo A.**



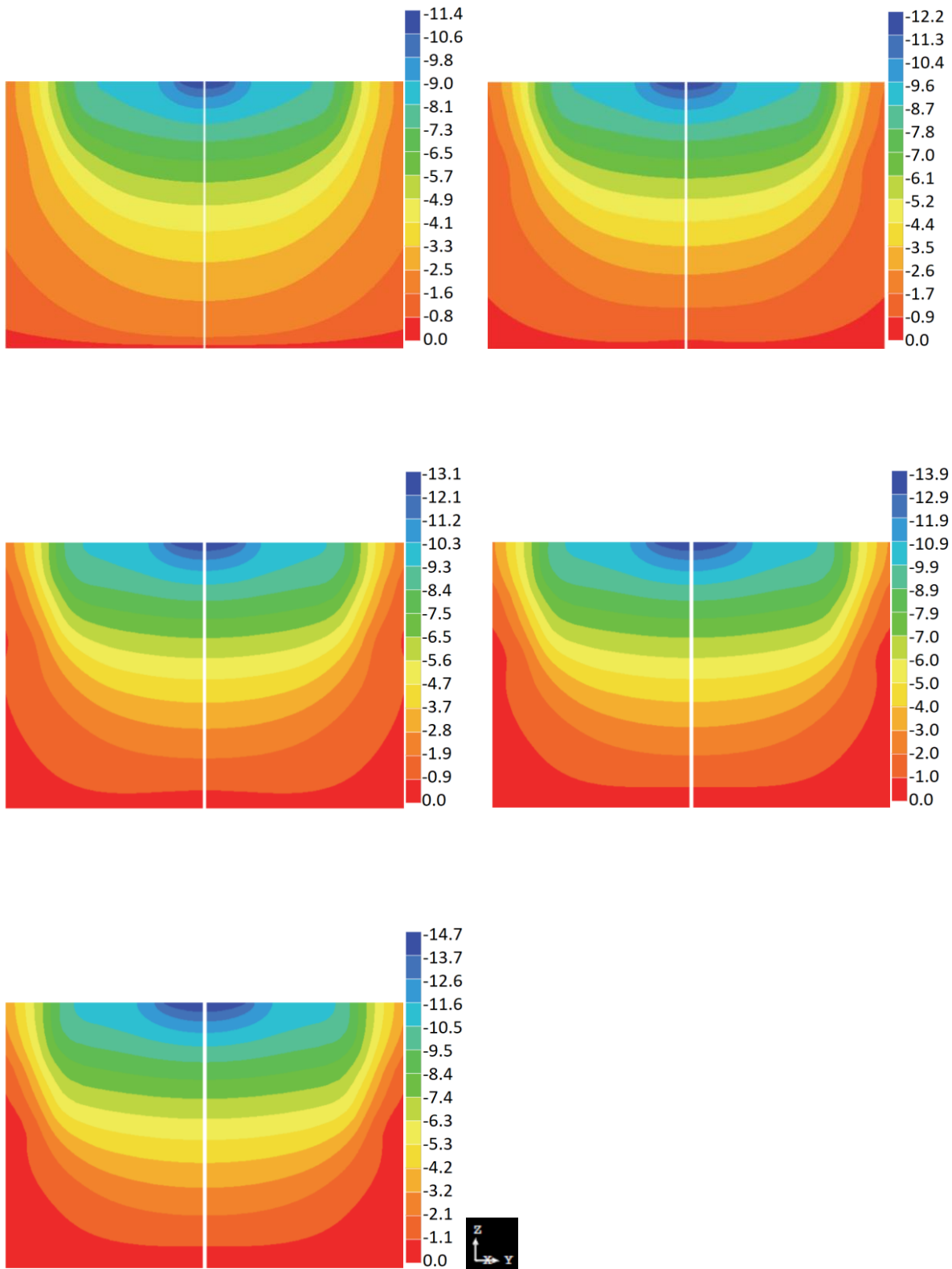
**Figura 47. Contornos de temperatura para una longitud de arco de 7 mm a 100 A, 150 A, 200 A, 250 A y 300 A.**



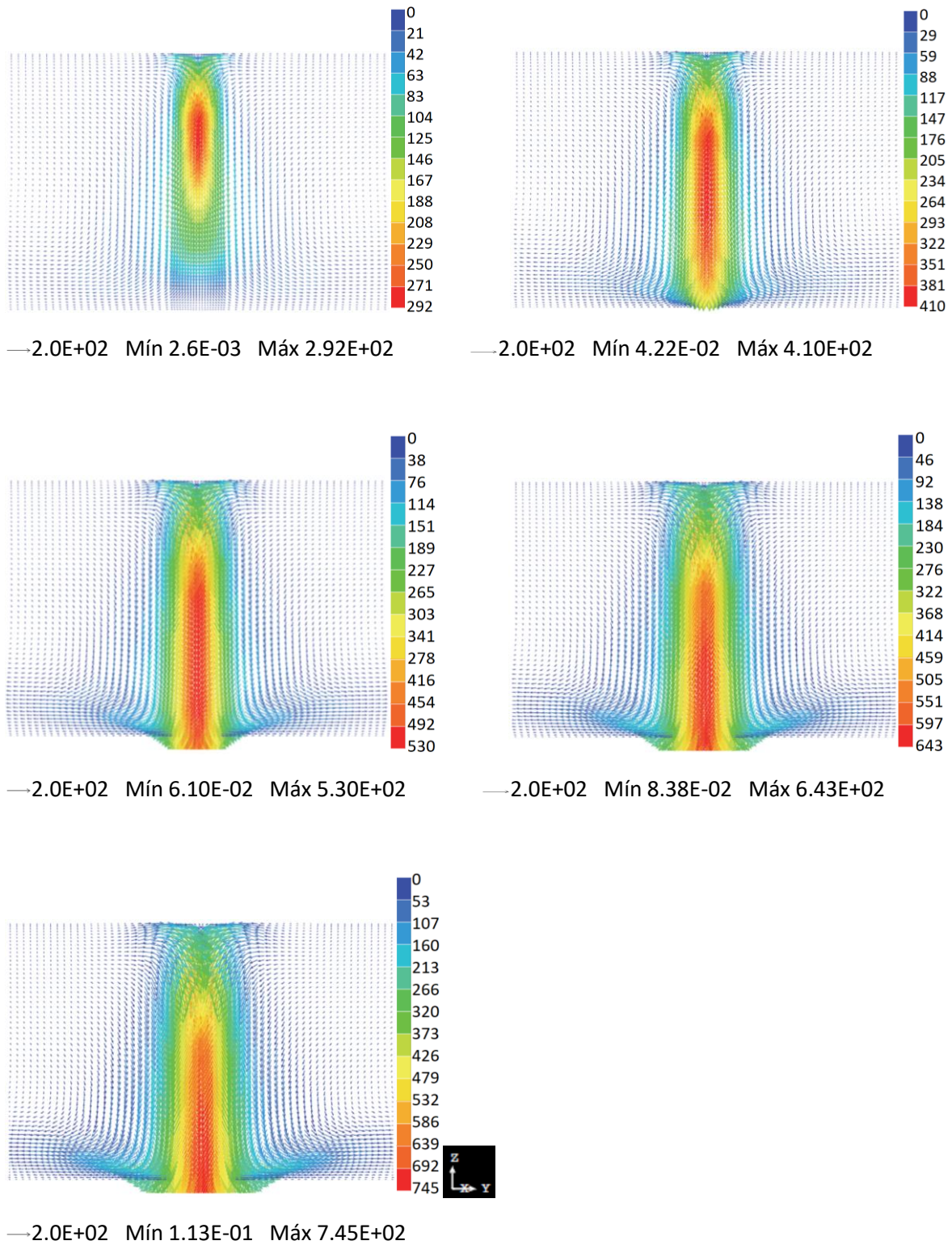
**Figura 48. Perfiles de densidad de campo magnético para una longitud de arco de 7 mm a 100 A, 150 A, 200 A, 250 A y 300 A.**



**Figura 49. Perfiles de presión para una longitud de arco de 7 mm a 100 A, 150 A, 200 A, 250 A y 300 A.**



**Figura 50. Perfiles de potencial eléctrico para una longitud de arco de 7 mm a 100 A, 150 A, 200 A, 250 A y 300 A.**



**Figura 51. Patrones de flujo para una longitud de arco de 7 mm a 100 A, 150 A, 200 A, 250 A y 300 A.**