



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

FACULTAD DE QUÍMICA

MODELACIÓN MATEMÁTICA DE LA SOLDADURA CON  
ARCO TIG EXPUESTA EN DIFERENTES ATMÓSFERAS

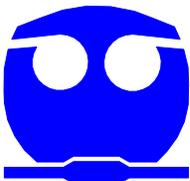
T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERA QUÍMICA METALÚRGICA

P R E S E N T A :

BÁRBARA MARLENE BETANCOURT ACOSTA



MÉXICO, D.F.

2006



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.

## **Agradecimientos**

A mis padres:

Gustavo Betancourt e Hilda Acosta, un profundo agradecimiento por ser los pilares de mi formación y el ejemplo más admirable a seguir.

A mis hermanos :

Isaac, Sofi y Jazz por ser mis compañeros incondicionales de vida, los quiero.

A mis amigas:

Ely, Gaby, Ivonne, Edith V, Eri, Edith N, Vane, por las pláticas y los momentos que vivimos juntas pero sobre todo por su amistad. Sin ustedes las cosas no habrían sido tan amenas, las quiero.

A Mauro:

Por ser quien es y haberme brindado su valiosa amistad y compañía durante la carrera.

A todos mis amigos de la facultad y de otras facultades:

Isaac, Kame, Salomón, Omar, Tavo, Esteban, Octavio, Gadi, Tulio, Adrian, Richi, Keto, Javier, Reyes, Lauro, Arturo, Angel, Alonso, Raul, Mauricio, Fidias, Alejandra, Eva, Ulises, Gaby Flores, Claudia Z, Clau, Docho, Almita, Adriana, Enrique, Julian, Marco, Juanito, Oscar, Anita, Guillermo Zavala, Guillermo Acosta, Lalo, Allan, Omar Celis, Pepe, Leo, Toño, Abel, Pablo, Arturo, Chente, Cesar, por haberme acompañado durante mis años de licenciatura.

A Oscar y Hugo:

Por las interesantes charlas y discusiones vespertinas.

A mis profesores de la facultad especialmente a los profesores Antonio Huerta, Guillermo Salas, Teresita Robert, Jose Guadalupe Viera, Fidel Reyes, Carlos Gonzalez, Candido Atlatenco, Gerardo Aramburo y Oscar Rendón, por tantas enseñanzas y constructivas experiencias.

Al Dr. Marco Aurelio Ramírez Argaez:

Por su infinita paciencia durante el desarrollo de este trabajo.

A la UNAM y particularmente a la Facultad de Química.

Al proyecto PAPIIT IN118105:

Por las facilidades otorgadas para la realización de este trabajo.

Esta tesis esta dedicada a todas las personas que de alguna manera han estado presentes en mi vida aportando cosas positivas.

# Índice general

<b>1. Introducción</b> .....	<b>1</b>
<b>2. Antecedentes de la soldadura con arco y electrodo no consumible de Tungsteno (W).</b>	
2.1. Características básicas e industriales de la soldadura con arco. ....	3
2.1.1. Soldadura con arco GTAW .....	4
2.1.2. Polaridades de la soldadura .....	4
2.1.3. Tipos de electrodos .....	4
2.1.4. Atmósferas protectoras en el proceso GTAW .....	5
2.1.5. GTAW ventajas y aplicaciones .....	6
<b>2.2. El plasma</b>	
2.2.1. Física teórica del plasma .....	8
2.2.2. El arco eléctrico .....	9
2.2.3. Influencia del campo magnético en los arcos .....	10
<b>2.3. Técnicas de análisis de procesos</b>	
2.3.1. Modelos matemáticos .....	11
2.3.2. Escalas de la modelación matemática .....	12
2.3.3. Establecimiento de un modelo matemático .....	12
2.3.4. Análisis dimensional .....	13
<b>2.4. Antecedentes de la modelación matemática para el proceso de soldadura con arco GTAW.</b> .....	<b>14</b>
<b>3. Modelo matemático</b> .....	<b>17</b>
<b>3.1. Suposiciones simplificativas</b> .....	<b>18</b>
<b>3.2. Ecuaciones gobernantes</b> .....	<b>20</b>
<b>3.3. Condiciones de frontera.</b> .....	<b>23</b>
3.3.1. Región catódica .....	25
3.3.2. Región anódica .....	25
<b>3.4. Propiedades físicas</b> .....	<b>27</b>

<b>4. Metodología</b> .....	<b>31</b>
<b>4.1. Técnica de solución</b>	
4.1.1. Equipo utilizado .....	31
<b>4.2. Breve descripción del método numérico de volumen de control</b> .....	<b>31</b>
<b>4.3. Software utilizado</b> .....	<b>32</b>
<b>4.4. Diseño de la experimentación</b> .....	<b>36</b>
4.4.1. Corridas de Argón .....	36
4.4.2. Corridas de Nitrógeno .....	37
<b>4.5. Validación</b> .....	<b>38</b>
<b>5. Resultados</b> .....	<b>40</b>
<b>5.1. Efecto de la intensidad de corriente, caso Argón (Ar)</b>	
5.1.1. Patrones de flujo del jet .....	40
5.1.2. Contornos de temperaturas en el arco .....	43
5.1.3. Contornos de potencial eléctrico en el arco .....	45
5.1.4. Fluxes de calor sobre el ánodo Q .....	47
<b>5.2. Efecto de la longitud de arco, caso Argón (Ar)</b>	
5.2.1. Patrones de flujo del jet .....	50
5.2.2. Contornos de temperaturas en el arco .....	53
5.2.3. Contornos de potencial eléctrico en el arco .....	55
5.2.4. Fluxes de calor sobre el ánodo Q .....	57
<b>5.3. Efecto de la intensidad de corriente, caso Nitrógeno (N<sub>2</sub>)</b>	
5.3.1. Patrones de flujo del jet .....	60
5.3.2. Contornos de temperaturas en el arco .....	62
5.3.3. Contornos de potencial eléctrico en el arco .....	64
5.3.4. Fluxes de calor sobre el ánodo Q .....	66
<b>6. Análisis de resultados</b> .....	<b>70</b>
<b>6.1. Discusión de resultados</b>	
6.1.1. Efecto de la intensidad de corriente en los patrones de flujo, temperatura, potencial eléctrico, y fluxes de calor en soldaduras con Argón (Ar) .....	71

6.1.2. Efecto de la longitud de arco sobre los patrones de flujo, temperatura, potencial eléctrico y fluxes de calor en soldaduras con Argón (Ar) . . . . .	74
6.1.3. Efecto de la intensidad de corriente sobre los patrones de flujo, temperatura, potencial eléctrico y fluxes de calor en soldaduras con Nitrógeno (N <sub>2</sub> ) . . . . .	76
6.1.4. Comparación entre los arcos de Argón y Nitrógeno (manteniendo I y L constantes) . . . . .	76
<b>7. Conclusiones . . . . .</b>	<b>79</b>
Bibliografía . . . . .	82

# Capítulo 1

## I Introducción

Dentro de los procesos alternos de manufactura la soldadura es uno de los métodos más rápidos, fuertes y económicos para unir metales y otros materiales como los termoplásticos, y a nivel industrial tiene gran importancia en la unión de piezas y estructuras, debido a esto existen diferentes tecnologías para soldar.

Estas tecnologías se pueden clasificar de la siguiente manera: soldadura con arco, soldadura por resistencia, soldadura flash, soldadura de gas (oxiacetileno), soldadura en estado sólido, soldadura “electrón beam” o por rayo de electrones, soldadura tipo “laser beam” o soldadura laser, soldering adhesive bonding o unión por afinidad, y procesos de “thermal spraying” o rociado térmico. Este trabajo está enfocado en el estudio de la soldadura con arco, particularmente al proceso GTAW por sus siglas en inglés Gas Tungsten Arc Welding que significa Soldadura con arco y electrodo de tungsteno.

La soldadura por arco se emplea en un extenso campo de procesos de soldadura que utilizan un arco eléctrico como fuente de calor que sirve para fundir y unir metales. El proceso GTAW esta clasificado en el grupo de la soldadura por arco del cual se obtiene calor y lo mantiene entre dos electrodos (cátodo que es un electrodo no consumible de tungsteno y ánodo o pieza de trabajo). El arco se produce mediante la diferencia de potencial entre el electrodo y la pieza de trabajo.

Los parámetros que tienen influencia en este proceso van desde el tipo de polaridad, el material y la forma del electrodo, la composición del gas, la geometría y el sistema de la fuente de poder.

El objetivo de este trabajo es entender la soldadura mediante un análisis en régimen estacionario a través de cálculos complejos de fenómenos de transporte, para determinar los flujos de calor en el arco en función de las principales variables de proceso

involucradas como la intensidad de corriente, la longitud de arco, y variando la composición del gas de cobertura.

El análisis del proceso se hizo mediante un riguroso planteamiento en donde se aplicaron las ecuaciones que gobiernan los fenómenos electromagnéticos, de flujo de fluidos, de transferencia de masa y de calor sujetas a condiciones adecuadas de frontera, y la solución a este problema complejo se realizó mediante técnicas numéricas iterativas por el método conocido como “volumen de control” cuyo algoritmo de solución se encuentra dentro del software comercial Phoenix v 3.4. Particularmente aquí se presentan casos de soldaduras en gas Argón y Nitrógeno puros.

## Capítulo 2

# **II. Antecedentes de la soldadura con arco y electrodo no consumible de Tungsteno (W)**

### **2.1 Características básicas e industriales de la soldadura con arco**

#### **2.1.1 Soldadura con arco GTAW**

Como ya se mencionó, el GTWA es un proceso de arco que utiliza un electrodo de tungsteno prácticamente inconsumible, y una atmósfera protectora de gas inerte, suministrada en forma externa generalmente de Argón, Nitrógeno o alguna mezcla.

Este electrodo forma el polo negativo del circuito o cátodo en tanto que la pieza de trabajo forma el polo positivo o ánodo.

En contraste con los gases ordinarios a presión y temperaturas atmosféricas, los plasmas (gases a muy elevadas temperaturas) son conductores eléctricos debido a la presencia de iones y partículas cargadas. Los plasmas a muy alta temperatura pueden alcanzar las conductividades eléctricas necesarias para promover la transferencia de carga eléctrica y cerrar el circuito eléctrico de un arco.

Para el proceso GTAW la corriente fluye debido a la diferencia de potencial entre el cátodo de tungsteno y la pieza de trabajo (ánodo). El Argón forma una atmósfera protectora cubriendo el espacio entre el cátodo y el ánodo. El Argón no es un gas conductor de la electricidad bajo condiciones estándar de presión y temperatura. Sin embargo, el electrodo de tungsteno emite electrones a alta temperatura (aprox. 4000 K) que colisionan con las partículas estáticas del gas aumentando la energía cinética de estas y su temperatura y promoviendo la formación de iones y la generación de partículas subatómicas a lo que se le llama plasma.

El arco eléctrico utilizado para producir calor en GTAW, es conocido como “plasma gas”. El plasma es un gas que puede conducir la electricidad, debido a que se encuentra ionizado a causa de las elevadas temperaturas que el arco produce por resistencia

eléctrica o efecto Joule y a las colisiones entre electrones calientes y moléculas gaseosas frías. Los electrones no pueden saltar del electrodo (polo negativo), a la pieza de trabajo (polo positivo), sino que viajan a través de los iones del gas. Para poder entender el flujo de electrones, será necesario puntualizar a continuación algunos términos de electromagnetismo como se verá en el Capítulo 4.

### ***2.1.2 Polaridades de la soldadura***

Las polaridades empleadas en GTAW pueden ser:

1. **D C S P**, por sus siglas en inglés Direct-Current Straight Polarity, corriente directa polaridad directa.
2. **D C R P**, Direct-Current Reverse Polarity, corriente directa con polaridad invertida
3. **A C H F**, Alternating-Current High Frequency, corriente alterna de alta frecuencia

El tipo de polaridad varía según la aplicación de la soldadura.

### ***2.1.3 Tipos de Electrodo***

En la soldadura GTAW se emplea un electrodo de Tungsteno habitualmente tungstenotariado aunque también se manufacturan electrodos de Tungsteno-Lantano, Tungsteno – Cerio, Tungsteno-Zirconio y Tungsteno puro, no consumibles, los electrodos de Tungsteno - Torio contienen hasta un 3 % de Torio (W-3Th, azul).

Los electrodos de Tungsteno –Torio para la soldadura se clasifican con la asignación de un color de acuerdo al porcentaje de Torio que estos contienen:

1. Tungsteno puro EWP (verde)
2. 1%Th EWTh1 (Amarillo)
3. 2%Th EWTh2 (rojo)
4. Stripped EWTh3 (azul)
5. Zirconio EWZr (café)

Es importante mencionar que el Torio es un elemento radioactivo, por lo que es recomendable utilizar mecanismos de recolección en forma de vacío o baño líquido, de tal modo que se impida el transporte del polvo del electrodo en el aire del medio ambiente.

### 2.1.4 *Atmósferas protectoras en el proceso GTAW*

En GTAW se utilizan gases inertes, como el argón (Ar) y Nitrógeno (N), esto implica que es posible soldar haciendo pasar electricidad por algunos de estos gases. Particularmente, el argón es el más común en la soldadura TIG. Algunas veces son aplicables algunas mezclas de estos gases como Argón-Helio en las siguientes proporciones 50%-50%, 25%-75%, 25%He-75%Ar. Argón-Hidrógeno y Argón-CO<sub>2</sub>. Las Figuras 1a y 1b muestran diagramas esquemáticos de la configuración de los elementos en el proceso.

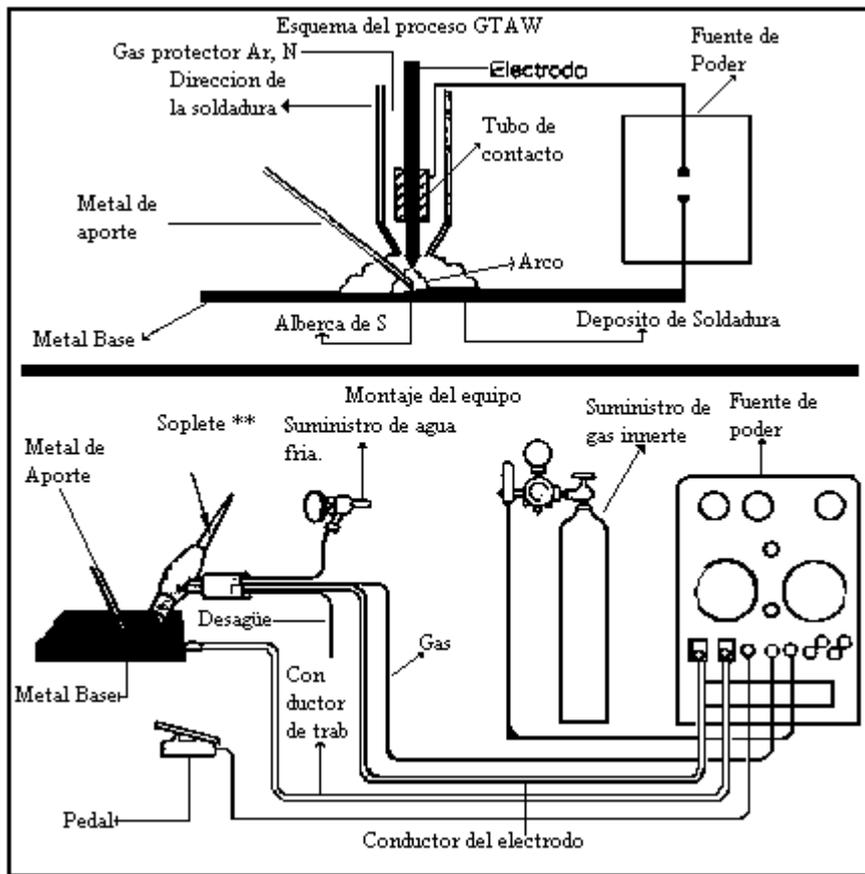


Figura 1. a- Diagrama esquemático del proceso GTAW

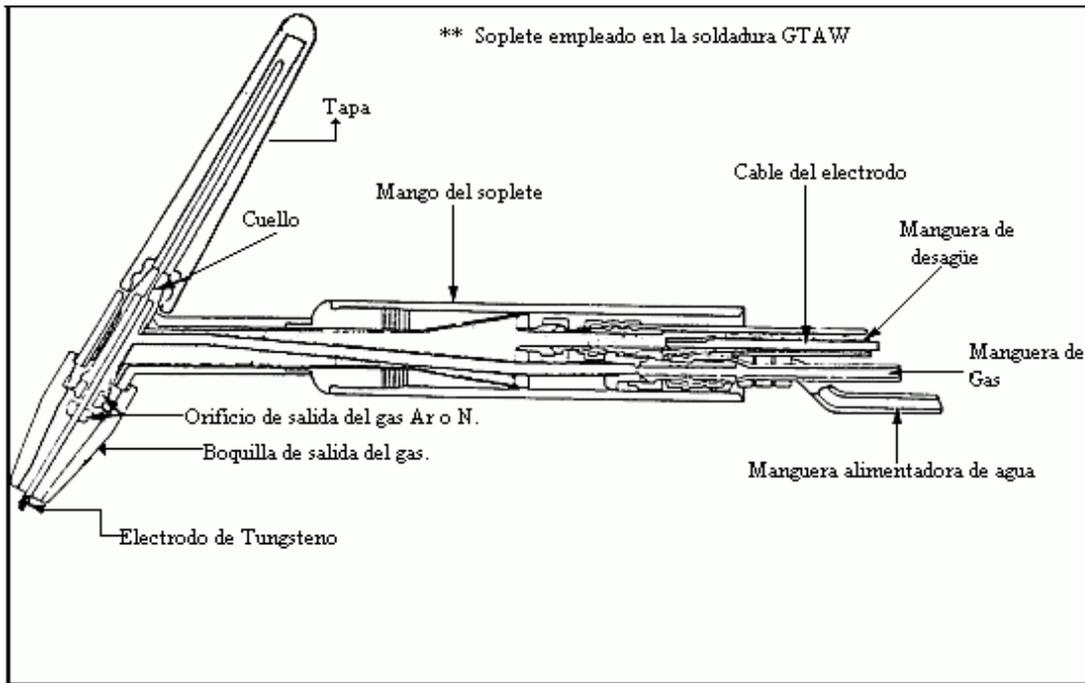


Figura 1. b.- Componentes del soplete empleado en la soldadura GTAW.

### 2.1.5 GTAW, ventajas y aplicaciones

El proceso GTAW es más lento que el GMAW, pero el primero produce una soldadura más precisa y se puede trabajar a bajos amperajes para piezas delgadas e incluso con metales exóticos. Este tipo de soldadura es comúnmente aplicada en los procesos que requieren alta calidad y precisión.

Algunas de las características más importantes del proceso GTAW son:

- Emplea un electrodo no consumible de tungsteno
- Emplea gases que generan atmósferas protectoras como el Argón (Ar), Helio (He), Nitrógeno (N), y mezclas de gases como dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), hidrógeno-argón, etc.
- Puede endurecer el material soldado
- Puede reducir la resistencia a la fatiga
- Es fácil de aplicar en materiales delgados

Ventajas y Desventajas

- Puede reducir la resistencia a la corrosión en la pieza soldada.
- Puede generar fracturas y/o porosidad en la pieza soldada

- Es de alta calidad y precisión
- Las soldaduras se pueden elaborar con o sin metal de aporte
- Se tiene control sobre las variables que intervienen en el proceso
- Se produce poca distorsión en la soldadura
- No deja escoria

Las ventajas asociadas a este tipo de soldadura son:

- Puede o no utilizarse metal de aporte
- Debido a que no produce escoria no requiere tanta limpieza, y la ventilación es mínima debido a la baja cantidad de productos gaseosos.
- Típicamente la GTAW es aplicada para estructuras en la industria aeronáutica y aeroespacial, en los componentes de motores, en los cilindros de enfriamiento de los reactores nucleares, en general es utilizada en 100 % en muchas aplicaciones nucleares, por su precisión y altísima calidad.
- La soldadura GTAW se aplica para unir la mayoría de los aceros al carbón e inoxidables, aceros al níquel (monel, iconel, etc.), aluminio, magnesio, cobre, bronce, titanio, entre otros. También se pueden unir metales no tan afines como un acero dulce, un inoxidable o un bronce.
- La resistencia a la corrosión de las uniones soldadas difieren del metal base.
- Uno de los inconvenientes de la soldadura con arco de aceros inoxidables es que se puede producir una sensitización del acero, lo cual produce problemas de precipitación de carburos de cromo en límites de grano y que son susceptibles a sufrir corrosión intergranular. Los factores que influyen en el proceso de corrosión intergranular:
  - Composición química del metal base
  - Proceso y procedimiento de soldadura
  - Dimensiones de la pieza soldada

## 2.2 Física del plasma y el arco eléctrico

### 2.2.1 El plasma

La definición de plasma que a continuación se plantea esta limitada a los plasmas gaseosos, los cuales están constituidos por una mezcla de electrones, iones y partículas neutras. Partiendo de que las masas de los iones y las partículas neutras son mucho mayores que la masa del electrón ( $m_H/m_e = 1840$ , donde  $m_H$  es la masa del átomo de hidrógeno y  $m_e$  es la masa del electrón), entonces se clasifica a los iones y a las partículas neutras como los “componentes o partículas pesadas” en el plasma. Las partículas en un estado excitado pueden regresar al estado basal mediante la emisión de fotones. Este segundo proceso es el responsable de la luminosidad de un plasma. Adicionalmente a estos componentes pesados en estado basal el plasma también contiene especies excitadas y fotones. Dentro de esta mezcla de partículas el plasma debe cumplir con un equilibrio de cargas por lo que eléctricamente este debe 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 e corriente eléctrica debe ser lo suficientemente elevada para hacer que un gas se vuelva un conductor eléctrico a este proceso se le conoce como “descomposición eléctrica” y hay muchas maneras de llevar a cabo esta descomposición.

La original descomposición 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 a 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, descargas de pares inductivos de alta frecuencia y recientemente las descargas de microondas se han considerado para producir plasmas.

### **2.2.2 El arco eléctrico**

Para todo fin práctico un arco eléctrico puede ser considerado un conductor gaseoso, el cual transforma energía eléctrica en calor. El arco es la fuente de calor para muchos de los procesos de soldadura, debido a que produce altas temperaturas y es fácil de controlar. Los arcos son fuentes de calor y transfieren calor a la pieza de trabajo por radiación, convección y transferencia de calor a través de la carga eléctrica. Cuando se utilizan en los procesos de soldadura, el arco puede ayudar a remover óxidos superficiales adicionalmente al calor. Este influye en la forma en la que se transfiere metal del electrodo a la pieza de trabajo. La corriente transportada por el medio gaseoso es producto del medio térmico y de las emisiones de campo. En algunos casos el arco eléctrico está en estado estacionario. Más frecuentemente es intermitente, por las interrupciones del corto circuito eléctrico o la inestabilidad, siendo influenciado por un flujo direccional alterno de corriente o por un flujo turbulento del gas conductor.

En este caso solo se considerarán arcos de corriente directa (DC). La distribución de potencial muestra un comportamiento peculiar. Los excesivos gradientes de potencial cercanos a los electrodos y los relativos gradientes de potencial pequeños en la columna del arco sugieren dividirlo en tres partes: región anódica, región catódica y la columna del arco. Este último es un plasma real que se aproximara al ETL (equilibrio termodinámico local) en un arco de alta intensidad.

Los arcos de alta intensidad están definidos como una descarga que opera a niveles de corriente de  $I > 50 A$  y presiones de  $P > 10kPa$ . En contraste con los arcos de baja intensidad, los arcos de alta intensidad están caracterizados por los fuertes flujos macroscópicos inducidos por el mismo arco.

### **2.2.3 Influencia del campo magnético en los arcos**

El magnetismo tiene efectos interesantes en los arcos de soldadura, algunos lo deterioran y otros son benéficos, los campos magnéticos sin embargo, pueden ser inducidos o permanentes, interactuando con la corriente del arco para producir campos de fuerzas que causan deflexión en el mismo comúnmente llamada soplo del arco. El soplo del arco, la corriente del plasma y la transferencia del metal son algunas de las

características fuertemente influenciadas por la presencia del campo magnético. El flux magnético puede ser autoinducido y asociado con la corriente del arco, o puede ser producido por un magnetismo residual en el material que ha sido soldado o de una fuente externa. Como la gravedad y la electricidad, el magnetismo es un fenómeno de campo, definido por cantidades vectoriales o de densidad de flujo. Partiendo de que a un arco de soldadura siempre se le asocia un campo magnético propio, todos los efectos de los campos magnéticos externos son a consecuencia de la interacción con el campo propio de la soldadura.

Los efectos de los campos magnéticos en los arcos de soldadura están determinados por las fuerzas de Lorentz, las cuales son proporcionales al producto cruz del campo magnético autoinducido más el externo y de la densidad de corriente del arco. El efecto más común de los campos externos es la deflexión en el arco. En un sentido macroscópico y dentro de los límites de una deflexión estable, un arco se comporta como un conductor flexible y una rígida elasticidad que resiste el total de las fuerzas de Lorentz. Las deflexiones del arco en una curva suave desde un punto fijo en el electrodo a la base del metal. La magnitud de la deflexión del arco es proporcional al campo de fuerza aplicado.

La deflexión del arco puede ser entendida si se piensa en líneas de flujo rodeando el conductor, sumándose vectorialmente a las líneas de campo aplicadas por un lado y cancelando las líneas de campo aplicado en el otro lado. El arco será deflectado en dirección del lado del flux más débil.

La deflexión del arco en la dirección del mismo, resulta en una soldadura más uniforme que será más ancha y con menor penetración. El control en la profundidad de penetración tiene aplicaciones en secciones delgadas de soldadura.

### **2.3 Técnicas de Análisis de procesos**

La soldadura como cualquier proceso de alterno de manufactura o cualquier proceso de fabricación de materiales es gobernado por varios fenómenos acoplados muy complejos. Si se desea entender el proceso con rigor para fines de control, predicción y optimización, es necesario aplicar los principios de la ingeniería de procesos que se

apoya en técnicas de análisis de procesos, entre las cuales destacan: la modelación matemática, la modelación física y la experimentación a nivel industrial o laboratorio. Esta tesis usa la técnica de modelado matemático para el análisis del proceso GTAW. En la Figura 2 se aprecia la filosofía atrás de la ingeniería de procesos, en donde el proceso determina la calidad del producto fabricado y este control y optimización se logra con la ayuda de algunas herramientas de análisis de procesos.

Las herramientas más importantes de análisis de procesos son:

- Mediciones experimentales en planta
- Mediciones experimentales en planta piloto
- Modelación matemática y/o física

### Una Visión de la Ingeniería de Procesos Metalúrgicos (por J. K. Brimacombe)

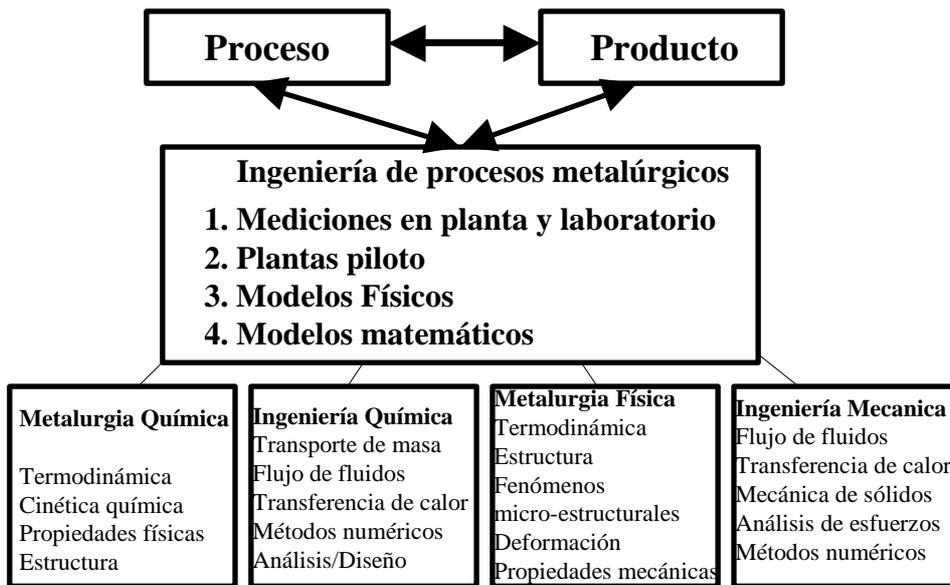


Figura 2.- Fundamentos de la ingeniería de procesos metalúrgicos

#### **2.3.1 Modelos Matemáticos**

Un modelo matemático es una representación cuantitativa de un fenómeno físico o de un proceso a través de ecuaciones algebraicas o ecuaciones diferenciales. Los modelos permiten hacer solo una aproximación al comportamiento real del sistema.

Existen tres tipos fundamentales de modelos: a) modelos mecánicos basados en principios fundamentales que rigen o gobiernan a los procesos, b) modelos empíricos o “de caja negra” que se basan en correlaciones estadísticas de respuestas del sistema a ciertos estímulos provocados, y c) modelos semi-empíricos que combinan modelos de los dos tipos anteriores.

### ***2.3.2 Escalas de la modelación matemática***

Existen varias escalas de la modelación matemática, la modelación a macro-escala es una de ellas y sus bases son la termodinámica clásica, cinética, y fenómenos de transporte.

A diferencia de la modelación a micro-escala que puede ser a microescalas, mesoescalas y nano escalas, en donde las teorías termodinámicas y de fenómenos de transporte del medio continuo no aplican.

La ingeniería de procesos en metalurgia trabaja principalmente con modelación a macro-escala, esto es, la manipulación de las variables de proceso para la obtención de un producto en óptimas condiciones.

### ***2.3.3 Establecimiento de un modelo matemático***

La construcción de un modelo matemático involucra una compleja metodología que va desde el rigor científico hasta la manipulación artesanal de algunos aspectos del proceso. Sin embargo, el proceso de fabricación de un modelo mecanístico consiste en las siguientes etapas:

- a) Plantear el problema y definir el problema
  - Establecer objetivos de la modelación
  - Identificar el problema, sistema y geometría, simetría, etc.
  - Definir las suposiciones simplificadoras
  - Plantear las ecuaciones gobernantes involucradas
  - Determinar las condiciones a la frontera adecuadas
  - Establecer las propiedades físicas del material o materiales (termodinámicas)

- b) Análisis del orden de magnitud con el fin de identificar los fenómenos importantes que gobiernan los fenómenos, para lo cual se utilizan números adimensionales como por ejemplo el número de Reynolds, cuyo cociente establece la razón de fuerzas inerciales sobre fuerzas viscosas que actúan sobre un fluido y nos indica el régimen de flujo de este.
- c) Desarrollo experimental en donde se obtienen parámetros para validar el modelo o cantidades difíciles de determinar.
- d) Solución del modelo (analítica, exacta, continua, numérica, aproximada, inexacta, discreta). Generalmente los problemas reales complejos únicamente tienen solución numérica.
- e) Si el modelo no se pudo validar, es decir, si las predicciones no están en concordancia con los resultados experimentales, entonces se revisa el planteamiento del inciso (a).
- f) Análisis del proceso, se utiliza el modelo para predecir el comportamiento al variar los parámetros directamente relacionados en el sistema.
- g) Síntesis, integración de resultados en una ley o generación importante del conocimiento.

### 2.3.4 Análisis Dimensional

El análisis dimensional es una restricción en las ecuaciones que representan una relación entre cantidades físicas que se explica por si misma. El requisito es que se satisfaga la homogeneidad dimensional, esto es la dimensión de cada término en la ecuación debe ser la misma. Ejemplo que a este trabajo atañe, la ecuación de movimiento para una capa fronteriza laminar,

$$\frac{\partial u_x}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_x}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_x}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\mu}{\rho} \left[ \frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2} \right] + g_x$$

En esta ecuación todos los términos poseen dimensiones de  $\frac{L}{t^2}$ .

## 2.4 Antecedentes de la modelación matemática para el proceso de soldadura con arco GTAW

En la literatura especializada existen numerosos trabajos de modelado matemático sobre la soldadura con arco TIG y GTAW, que han generado contribuciones dignas de ser comentadas. A continuación se citan solo los trabajos más destacados publicados acerca de la modelación de arcos eléctricos para el proceso GTAW con simulación numérica.

McKelliget y Szekely<sup>(13)</sup> desarrollaron un modelo matemático para predecir las distribuciones de velocidad, temperatura y densidad de corriente en los arcos de soldadura a través de la solución numérica de las ecuaciones de Navier-Stokes, la ecuación de transferencia de calor y la ecuación de difusión magnética en 2 dimensiones.

Los mecanismos de transferencia de calor y momentum hacia el ánodo fueron investigados a la luz de hallazgos recientes referentes a la capa fronteriza del ánodo y la presencia de caídas de voltaje negativas en el mismo. Para desarrollar este análisis McKelliget y Szekely dividieron el sistema en tres regiones, cátodo, ánodo, y jet de plasma, particularizando el problema en la región anódica, en el que existe una caída de potencial negativa debida al fuerte flujo de electrones provenientes del arco. Asimismo, su modelo consideró como una condición de frontera en el cátodo el valor de la densidad de corriente,  $J_c$ , como constante e igual a  $65 \text{ A/mm}^2$  dentro de esta región y de  $0 \text{ A/mm}^2$  fuera de ella con fines de obtener valores equiparables a los resultados experimentales reportados en la literatura. Este valor  $J_c$  como condición de frontera en el cátodo no es tan arbitrario ya que encontraron que en esta región dio resultados concordantes con las mediciones experimentales para valores diferentes tanto de la intensidad de corriente como de la longitud de arco.

Otra interesante simplificación fue la expresión final para el flujo de calor en el ánodo, en el que se despreciaron las pérdidas por evaporación, además de hacer un balance de un flujo neto que tenía contribuciones tales como  $Q_e$ ,  $Q_c$ ,  $Q_v$  y  $Q_r$ , flujo de calor por electrones (efecto Thompson) para evaluar este flujo consideraron que la temperatura de los electrones se mantenía arriba de los  $10\,000 \text{ K}$  dado que la temperatura de las partículas pesadas (átomos y iones positivos) se aproximaba a la del ánodo<sup>(24)</sup> mientras que la de los electrones se mantenía en un rango por encima de los  $10\,000 \text{ K}$ , un flujo

convectivo el cual dividieron en un flujo convectivo producido por el movimiento del plasma y un flujo puro el cual existe aunque el plasma este en reposo, además de haber tomado una correlación de transferencia de energía para el impacto del flujo de Argón, que se derivó de tomar datos de estudios previos tales como velocidades arriba de 9000 m/s las cuales corresponden a una entalpía estacionaria de  $4 * 10^7 \text{ J} * \text{Kg}^{-1}$  ( $T = 15\ 000$  para Ar), la tercera contribución es el flujo de pérdidas por evaporización mismo que es despreciable y un flujo radiativo respectivamente, este flujo de calor por radiación es la última contribución de flujo de calor hacia el ánodo y fue calculado utilizando factores de visión aproximados. El flujo de radiación que recibe el elemento superficial  $i$  del elemento de volumen  $j$  se expresa con la siguiente ecuación  $Q_{r,i,j} = \int_{V_j} \frac{S_r}{4\pi r_{i,j}^2} \cos \psi dv_j$ .

El objetivo principal de este trabajo era el establecimiento de un modelo matemático que fuera equiparable con las mediciones experimentales realizadas por los autores en el Departamento de Ingeniería Mecánica y de Ciencia e Ingeniería de Materiales en el Instituto Tecnológico de Massachussets en Cambridge.

Por otro lado K.C Hsu<sup>(17)</sup> planteó que la densidad de corriente en la vecindad del cátodo es la condición de frontera crucial, con perfiles de temperatura calculados para rangos de 100 y 200 A.

Los arcos de alta intensidad están dominados por los efectos de la dinámica de fluidos, y de las interacciones eléctricas y magnéticas inducidos por el mismo arco.

Para modelar el comportamiento del arco se requieren soluciones simultáneas de las ecuaciones de conservación de masa, momentum, energía y corriente.

La densidad de corriente es muy elevada cerca del cátodo, pero decrece rápidamente conforme se incrementa la distancia del cátodo. La conductividad eléctrica es casi constante, las curvas del campo eléctrico y la densidad de corriente son similares.

Al realizar el balance global de energía Hsu y colaboradores contemplan el término referente al campo magnético autoinducido.

Dado que las soluciones numéricas son la forma de obtener resultados más aproximados a la realidad una nueva técnica de escalamiento del orden de magnitud se ha aplicado al modelado matemático de la región catódica de un largo arco de tungsteno por Méndez y colaboradores<sup>(3)</sup>. Los estimados obtenidos son combinados con los cálculos numéricos, así las características más importantes de ambas técnicas se consideran simultáneamente; alta precisión del modelado numérico, generalidad y simplicidad de las

expresiones algebraicas. Expresiones que rigen los estimados de valores no conocidos característicos tales como el valor máximo de presión en la zona catódica y la velocidad máxima en el plasma que se obtienen son consistentes con los trabajos analíticos o asintóticos. Este artículo hace un barrido de la zona catódica y de la longitud del arco tomando una densidad de corriente crítica de  $J_c = 6.5 \times 10^7 \text{ A/m}^2$  para un electrodo de Tungsteno, y que las variaciones de temperatura en el cátodo son muy pequeñas comparadas con el salto de temperatura máxima en el arco<sup>(13)</sup>.

S.Y. Lee Y S.J. toman en cuenta la influencia de parámetros tales como el ángulo del electrodo, la corriente de soldadura, y la longitud de arco, utilizando Argón como atmósfera de gas protector se realizó un estudio utilizando una densidad de corriente a lo largo de la superficie del cátodo, y se asumió que esta distribución tenía forma gaussiana, la cual se caracteriza por un valor máximo de densidad de corriente en el electrodo o la distribución de parámetros y a la temperatura del electrodo se le asignó un valor de 60° C.

Otro trabajo representativo en cuanto a los fenómenos de transferencia particularmente la transferencia de energía en el plasma es el de R.T.C. Choo y colaboradores<sup>(26)</sup> en el que presenta los perfiles de temperatura desde el arco y hasta la alberca de soldadura, esta primera parte es un estudio que pretende complementar el estudio de los fenómenos de transferencia en la alberca de soldadura, considerando esencial el conocimiento de estos gradientes de temperatura por la directa implicación en los gradientes de tensión en la superficie que frecuentemente representan las fuerzas dominantes en el movimiento de la alberca de soldadura además de determinar el flujo neto de calor en esta región.

### **III. Modelo matemático**

El proceso de soldadura con arco en gas inerte con electrodo de tungsteno (tungsten inert gas welding) ha sido ampliamente usado y estudiado en las últimas tres décadas. En cuanto al estudio de este proceso de soldadura podemos mencionar que el grado de sofisticación es extraordinario, ya que existen modelos matemáticos muy complejos que involucran la mayor parte de los fenómenos físicos presentes en los arcos eléctricos. La complejidad de los modelos se ve favorecida por la presencia de equipos de cómputo cada vez más poderosos (hardware) y por programas de computo especializados en el cálculo de la dinámica de fluidos (software). En este trabajo se empleó un modelo matemático basado en los principios fundamentales de flujo de fluidos, conservación de energía, conservación de masa, conservación de carga eléctrica, así como las leyes que rigen el electromagnetismo, es decir, el modelo incluirá las ecuaciones de Navier-Stokes, de conservación de energía, la ecuación de continuidad, la ecuación de conservación de carga eléctrica, la ley de Ohm y las leyes de Maxwell. El conjunto de ecuaciones gobernantes sujetas a condiciones de frontera adecuadas se resolvieron de manera numérica empleando la técnica conocida como volumen de control e implementada en el código comercial PHOENICS versión 3.4. El objetivo del trabajo consistió en determinar el efecto de las principales variables de proceso, tales como: longitud de arco, flujo de corriente eléctrica, voltaje, y composición de gas, sobre los flujos de calor que ejercen los arcos eléctricos a la alberca de soldadura (weld pool). El trabajo se enfocó a realizar un análisis del proceso de soldadura con arco, para lo cual se utilizara el modelo para predecir o simular este proceso y obtener cuantitativamente el efecto de cada variable del proceso sobre los flujos de calor desde el arco hacia la soldadura.

### 3.1 Suposiciones

Las suposiciones hechas para hacer más tratable numéricamente al problema son:

- 1.- El plasma se encuentra en equilibrio termodinámico local (ETL)
- 2.- Existe simetría angular en el sistema
- 3.- El flujo del gas está en régimen laminar.
- 4.- Los efectos de la gravedad y disipación de calor debido a la viscosidad son despreciables.
- 5.- Las propiedades físicas están únicamente en función de la temperatura del gas<sup>(4)</sup>.
- 6.- La presión es atmosférica y existen condiciones normales en la soldadura.
- 7.- El problema se restringe a estado estacionario por tener un sistema de corriente directa, además de que el electrodo no está en movimiento.
- 8.- Los gases de cobertura del arco simulados fueron solo Argón y Nitrógeno puros.
- 9.- El problema se plantea en coordenadas cilíndricas, axi-simétricas y en 2 dimensiones.
- 10.- El plasma es ópticamente delgado, no se lleva a cabo la absorción dentro del arco, la radiación puede ser modelada en una forma aproximada, definiendo las pérdidas de radiación por unidad de volumen<sup>(13)</sup>.
- 11.- Estado estacionario, ya que se modela un sistema con corriente directa.
- 12.- Se considera la superficie del ánodo plana.
- 13.- En los electrones fríos se considera la conductividad correspondiente a los electrones calientes, esto es aproximado asumiendo que la conductividad eléctrica puede ser registrada a partir de la temperatura del nodo más cercano dentro del dominio del plasma.

El efecto convectivo en la ecuación de transporte de campo magnético viene de evaluar el número de Reynolds para campos magnéticos, el cual representa la razón entre la difusión magnética y la convección magnética.

$$R_{e,m} = V_0 L_0 \sigma \mu_0$$

Donde  $V_0$  y  $L_0$  son las velocidad característica y la longitud respectivamente, mientras que  $\sigma$  y  $\mu_0$  son la conductividad eléctrica y la permeabilidad magnética respectivamente. Tomando valores característicos esperados para las variables en la soldadura con arco, se puede apreciar que  $R_{e,m}$  es muy pequeño ( $R_{e,m} \sim 0.01$ , con valores de  $L_0 = 0.005\text{m}$ ,

$V_o=200\text{m/s}$ ,  $\mu_o=4\pi\times 10^{-7}\text{henry/m}$  y  $\sigma=10000\text{m}^{-1}\Omega^{-1}$ ). Por lo tanto la difusión magnética vence a la convección magnética.

La suposición de que el plasma es ópticamente delgado se detalla a continuación. El arco irradia energía y parte de esta energía puede ser reabsorbida o dispersada por el mismo plasma. Esta suposición indica que la fuente de radiación del arco va a terminar en los alrededores, lo cual constituye una sobre simplificación. La suposición referente a la superficie plana del ánodo, constituye también otra sobre simplificación.

Es importante hacer hincapié en que la transferencia de momentum y de calor desde el arco hasta la alberca de soldadura, es altamente influenciado por la forma de la superficie libre<sup>(15)</sup>.

Finalmente la simplificación de flujo laminar puede ser justificada tomando valores característicos de los parámetros en el proceso de soldadura para calcular el número de Reynolds. Los números de Reynolds entre 500 y 2000 son característicos. En un jet libre se ha encontrado que la transición de flujo laminar a turbulento sucede con números de Reynolds alrededor de 100000, es por ello que el flujo se consideró en régimen laminar.

En la Figura 3 se presenta el dominio de cómputo a resolver en dos dimensiones en coordenadas cilíndricas polares.

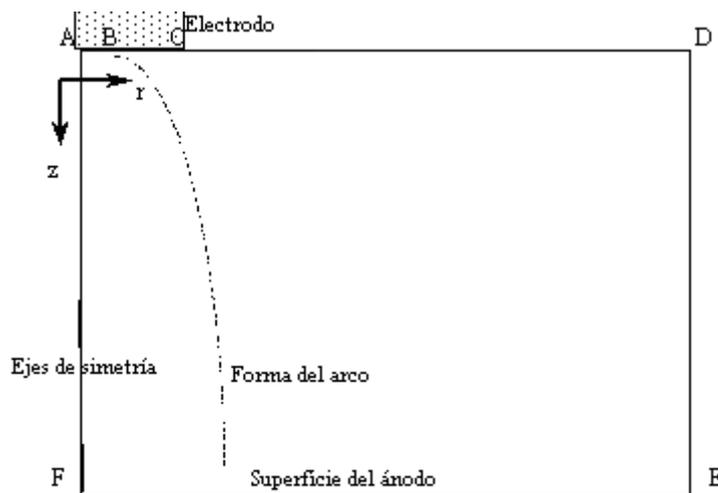


Fig 3. Dominio de cómputo en 2D y coordenadas cilíndricas.

### 3.2 Ecuaciones Gobernantes

Las ecuaciones gobernantes del proceso en 2D y coordenadas cilíndricas se enuncian a continuación (ver lista de símbolos al final de la tesis):

Ecuación de conservación de masa o ecuación de continuidad:

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

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

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

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

$$\frac{\partial}{\partial z}(\rho v_r v_z) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\rho r v_r^2) = -\frac{\partial P}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial z}\{\mu(\frac{\partial v_r}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial r})\} + \frac{2}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\mu r \frac{\partial v_r}{\partial r}) - \frac{2v_r}{r^2} \mu + B_\theta J_z \quad 3$$

En estas ecuaciones  $V_r$  es el componente radial de la velocidad,  $V_z$  es el componente axial de la velocidad,  $P$  es la presión,  $\rho$  es la densidad,  $\mu$  es la viscosidad molecular,  $J_r$  es la densidad de corriente radial,  $J_z$  es la densidad de corriente axial,  $B$  es el vector azimutal de la densidad de flujo magnético.

Ecuación de conservación de energía:

$$\frac{\partial}{\partial z}(\rho v_z h) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\rho r v_r h) = \frac{\partial}{\partial z}\left\{\frac{k}{C_p} \frac{\partial h}{\partial z}\right\} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}\left\{\frac{kr}{C_p} \frac{\partial h}{\partial r}\right\} + S_t \quad 4$$

El término fuente es  $S_t$  y se representa por:

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

Donde  $h$  es la entalpía,  $C_p$  es el calor específico,  $S_r$  son las pérdidas por radiación por unidad de volumen,  $k_B$  es la constante de Boltzmann y  $e$  es la carga electrónica.

Ecuaciones de Maxwell:

$$\nabla \times \hat{E} = 0 \quad 6$$

$$\nabla \times \hat{H} = \hat{J} \quad 7$$

$$\nabla \cdot \hat{B} = 0 \quad 8$$

Ecuación de conservación de carga:

$$\nabla \cdot \hat{J} = 0 \quad 9$$

Ley de Ohm:

$$J = \sigma E \quad 10$$

Donde  $E$  es el vector del campo eléctrico,  $J$  es el vector de la densidad de corriente,  $H$  es el vector del campo magnético y  $B$  es el vector de la densidad de flujo magnético. Manipulando las ecuaciones 7, 8, 9 y 10, bajo las suposiciones anteriores tenemos dos formulaciones desarrolladas por Ramírez y colaboradores<sup>(15)</sup> de las cuales solo la formulación del campo eléctrico (la usada en esta tesis) se presenta a continuación:

Formulación del potencial eléctrico:

Combinando la ecuación de conservación de carga (9) y la ley de Ohm, ecuación (10), la ecuación de potencial derivada es la siguiente :

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \sigma \frac{\partial \Phi}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \sigma \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right) = 0 \quad 11$$

Donde  $\Phi$  es le potencial eléctrico definido por:

$$\bar{E} = -\nabla \Phi \quad 12$$

Resolviendo la ecuación 11 es posible obtener las densidades de corriente utilizando las ecuaciones 10 y 12:

$$J_r = -\sigma \frac{\partial \Phi}{\partial r} \quad 13$$

$$J_z = -\sigma \frac{\partial \Phi}{\partial z} \quad 14$$

Finalmente suponiendo que la mayoría de la corriente puede ser representada por el componente axial, el campo B se puede derivar de la ley de Ampere:

$$B = \frac{\mu_o}{r} \int_0^r J_z r dr \quad 15$$

De esta manera el problema magnético queda completamente resuelto, la relación entre el problema magnético y las ecuaciones de momentum y energía es establecida a través del calentamiento Joule, las fuerzas de cuerpo electromagnéticas y a través de la dependencia de las propiedades físicas con la temperatura.

En resumen el enfoque del potencial resuelve dos componentes de las ecuaciones de Navier –Stokes, de la ecuación de conservación de energía, la ecuación de continuidad y de potencial eléctrico. Las ecuaciones 13 y 15 son usadas para obtener el resto de la información eléctrica necesarios para los términos fuente en las ecuaciones de conservación de momentum y de energía.

### 3.3 Condiciones de Frontera

En la Tabla 1 se muestra la lista de las condiciones de frontera de todas las variables, incluyendo al potencial eléctrico. Las fronteras son las líneas que están marcadas con las letras mayúsculas en la Figura 3. La condición de frontera crítica es para  $\Phi$  en la región catódica, y para la densidad de corriente en la misma región,  $J_c$ , con un valor constante de  $6.5 \times 10^7 \text{ A/m}^2$ , fue usada como flux para  $\Phi$ . En las superficies anódica y catódica se establecen velocidades igual a cero, en los ejes de simetría se suponen gradientes igual a cero para todas las variables. Para la entalpía se emplearon valores fijos como frontera en el cátodo  $7.2 \times 10^6 \text{ J/Kg}$  correspondientes a 4000 K y en el ánodo  $5.2 \times 10^5 \text{ J/Kg}$  correspondientes a 1000 K, sin embargo se debe dedicar especial atención a los flujos de calor en las superficies del cátodo y del ánodo.

La Figura 4 muestra una representación esquemática de los principales mecanismos de transferencia de calor desde el plasma hacia el ánodo.

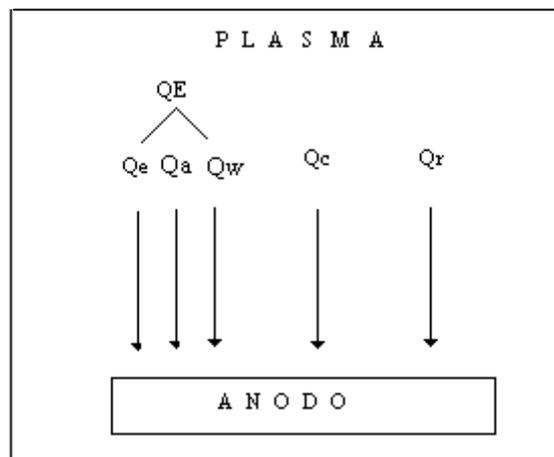


Fig. 4 Mecanismos de transferencia de calor en la región anódica

Estos mecanismos de transferencia de calor proveen flujos de calor definidos como:

$Q_E$  : Flujo de calor asociado con la corriente de electrones (efecto Thompson,  $Q_e$ , función trabajo,  $Q_w$ , y caída de voltaje anódica,  $Q_a$ )

$Q_c$  : Flujo de calor convectivo

$Q_r$  : Flujo de calor por radiación

El flujo de calor en el ánodo debido al flujo de electrones se puede expresar mediante la siguiente ecuación.

$$Q_E = J_A \left\{ \frac{5}{2} + \frac{e\phi}{k_B\sigma} \right\} k_B T_{e,a} / e + J_a V_w + J_a V_a \quad 16$$

Donde, el primer término es el transporte de entalpía debida a la energía termal aleatoria de los electrones, el segundo termino representa el calor cedido por los electrones al entrar a la red del ánodo liberando energía proporcional a la de la función de trabajo del ánodo. El tercer término es la energía adquirida por los electrones cuando atraviesan la caída anódica. En principio esta energía es requerida para mantener la producción de iones positivos en la vecindad del ánodo, y para asegurar la conservación de corriente. Si la ionización de campo es el mecanismo gobernante, requerirá de caídas de voltaje de decenas de volts.

Asumiendo ETL, no es posible calcular la temperatura del electrón en una forma explicita

	$V_r$	$V_z$	h	$\Phi$
AB	0	0	T=4000K ó h=7.2x10 <sup>6</sup> J/Kg $Q_{cf} =  J_z V_c$	$\frac{\partial\Phi}{\partial z} = -\frac{J_c}{\sigma}$
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=1000K ó h=5.2x10 <sup>5</sup> J/Kg Qa=eq23	$\frac{\partial\Phi}{\partial r} = 0$
AF	0	$\frac{\partial V_z}{\partial r} = 0$	$\frac{\partial h}{\partial r} = 0$	$\Phi=0$

Tabla 1. Condiciones de frontera

### 3.3.1. Región catódica.

Además de establecer el valor de la entalpía en la superficie, la presencia de una caída de voltaje esta asociada a una flujo de calor representado por la siguiente ecuación:

$$Q_c = |J_c|V_c \quad 17$$

Donde  $V_c$  es el valor de la caída de voltaje en el cátodo y esta dado en volts. Esta es una fuente de energía positiva que en la ecuación de transferencia de energía calienta el arco.

### 3.3.2. Región Anódica

Como ya se mencionó previamente existen muchos mecanismos de transferencia de energía en el ánodo y cada una de estas contribuciones deben ser consideradas para una representación realista del flujo de calor desde el arco.

A continuación se brinda una descripción detallada de cada mecanismo que contribuye al flujo neto de calor desde el arco hacia el ánodo.

**Caída anódica.** En el ánodo se presenta otra caída de voltaje, cuando los electrones atraviesan por esta caída de voltaje libran energía en el proceso la liberación de esta energía se presenta de una manera análoga a la de la ecuación 17.

$$Q_a = |J_a|V_a \quad 18$$

aquí  $J_a$  es la corriente en el ánodo y  $V_a$  es la caída de voltaje en volts.

**Calor convectivo.** El jet de alta velocidad que impacta en la superficie del ánodo calienta la pieza de trabajo por el mecanismo convectivo. Este flujo es calculado asumiendo que la velocidad de transferencia de energía esta gobernada por una correlación empírica que se obtuvo de los estudios que se hicieron para representar la transferencia de calor de jets que impactan la superficie sólida<sup>(22)</sup>.

$$Q_{conv} = \frac{0.915}{\lambda_w} \left( \frac{\rho_b \mu_b}{\rho_w \mu_w} \right)^{0.43} \left[ \rho_w \mu_w \frac{dV_r}{dr} \right] [h_b - h_w] \quad 19$$

Donde  $\lambda_w$  es el numero de Prandtl y el subíndice  $w$  representa los valores de las propiedades en la superficie de la pieza de trabajo, mientras que el subíndice  $b$  denota

los valores en la frontera de la capa límite, la entalpía del baño ,  $h_w$ , es la correspondiente a una temperatura de 1000 K.

**Transferencia de calor por radiación.** La radiación desde el arco hacia la superficie del ánodo es calculado por los medios de factores de visión aproximados descritos en la siguiente ecuación :

$$Q_{rad,i} = \int \frac{S_r}{4\pi r_{i,j}^2} \cos \Psi dV_j \quad 20$$

Donde  $S_r$  representa las pérdidas de calor por radiación por unidad de volumen ,  $r_{i,j}$  es el vector que une cada elemento de superficie en el arco,  $V_j$ , y  $\Psi$  es el ángulo entre  $r_{i,j}$  y el vector normal a la superficie del ánodo.

**Efecto Thompson.** El transporte de energía térmica debido al flujo de electrones con alta temperatura es llamado efecto Thompson, el cual puede describirse mediante la siguiente ecuación.

$$Q_e = \frac{5J_a}{2e} k_b (\alpha T_b - T_w) \quad 21$$

El parámetro  $\alpha$  representa el cociente entre la temperatura del electrón entre la temperatura del plasma en la caída anódica (en esta región la suposición de un ETL ya no es válida). En el cálculo se asumió que  $\alpha$  tenía un valor de 1.2<sup>[26]</sup>.

**Condensación de electrones.** El calor que se produce debido a la condensación de electrones cuando entran de la fase del plasma al metal líquido, se puede describir con la siguiente expresión.

$$Q_{cond} = J_a \Phi_w \quad 22$$

donde  $\Phi_w$  es la función de trabajo de la pieza fundida. Para aceros la suma de la función de trabajo mas la caída en el ánodo ( $\Phi_w + V_a$ ) es igual a 6.76V<sup>(21)</sup>.

**Flujo de calor total en el ánodo.** La contribución total del flujo de calor desde el arco hasta el ánodo puede ser expresada por la siguiente ecuación que es la suma de todos los mecanismos presentes en la transferencia de calor desde el arco hacia el ánodo:

$$Q_{total} = Q_{rad} + Q_{conv} + Q_{cond} + Q_e + Q_a \quad 23$$

### 3.4 Propiedades Físicas

A continuación se presentan las gráficas de las propiedades físicas de los gases Argón y Nitrógeno en función de la temperatura, reportadas por Boulos<sup>(4)</sup> y en otras fuentes para el caso del Nitrógeno<sup>(4)</sup>, la extensa lista de propiedades que se presentan para ambos casos están calculadas como función de la temperatura en un rango de 500 K a 24 000 K, para la densidad  $\rho$  (Fig. 5), calor específico,  $C_p$  (Fig. 6), viscosidad molecular,  $\mu$  (Fig. 7), conductividad térmica,  $k$  (Fig. 8), y conductividad eléctrica,  $\sigma$  (Fig. 9). Las pérdidas por radiación,  $S_r$  (Fig. 10), fueron tomadas de Tampkin y Evans<sup>(4)</sup> publicación en la cual se asumió que el plasma es ópticamente delgado a la radiación.

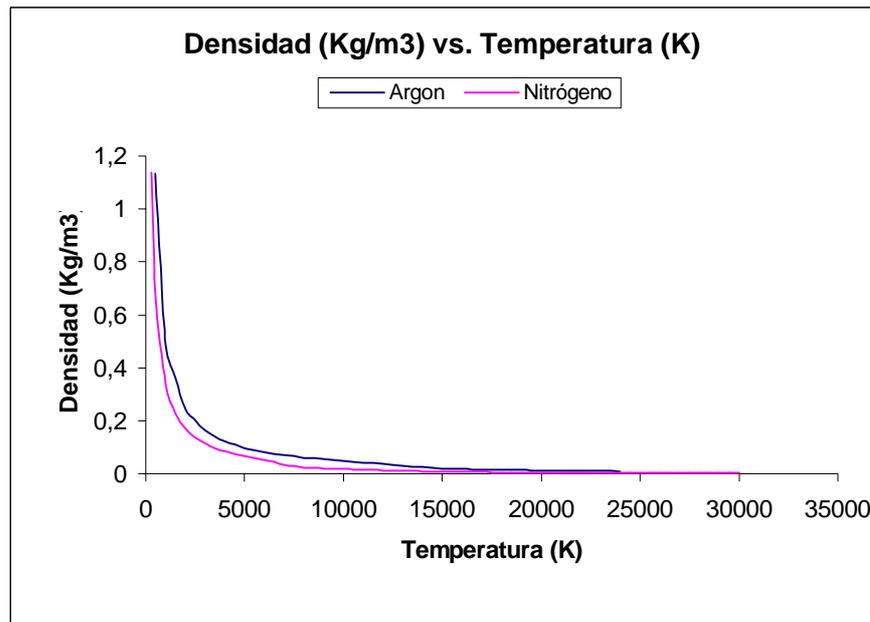


Fig. 5. Densidad de Ar y N<sub>2</sub> en función de la temperatura.

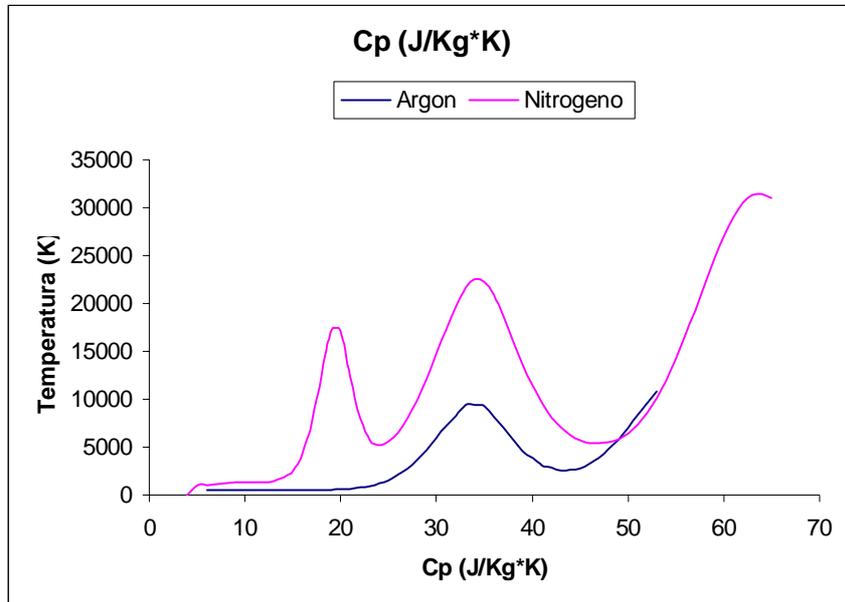


Fig. 6. Capacidad calorífica del Ar y del  $\text{N}_2$  en función de la temperatura.

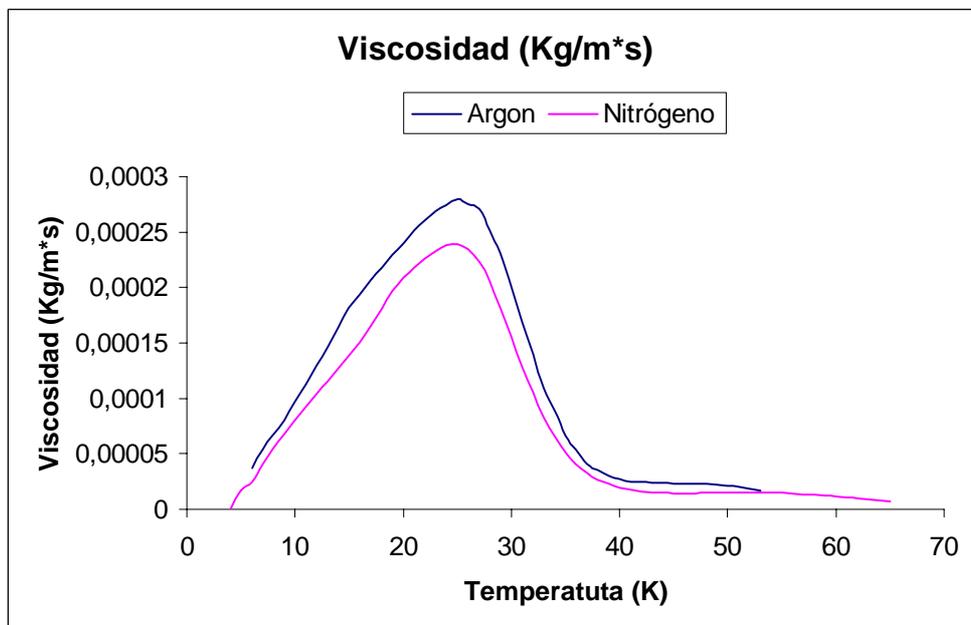


Fig. 7. Viscosidad del Ar y del  $\text{N}_2$  en función de la temperatura.

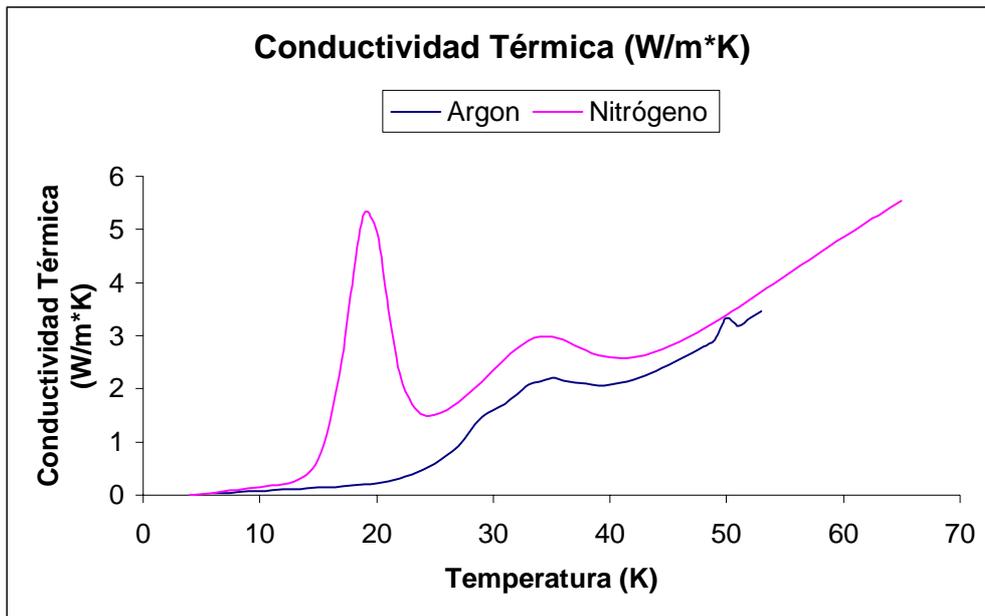


Fig. 8. Conductividad térmica del Ar y del N<sub>2</sub> en función de l temperatura.

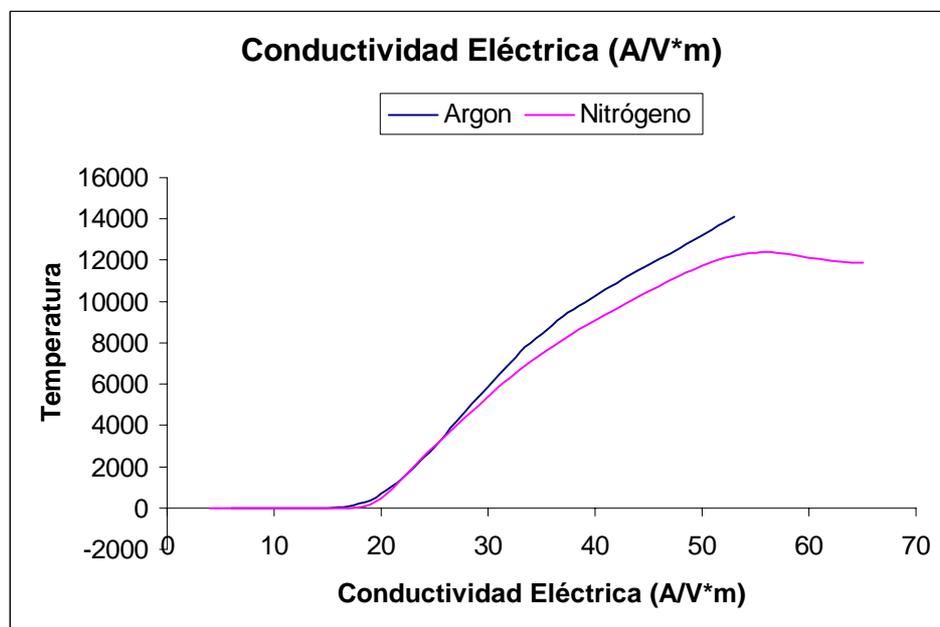


Fig. 9. Conductividad eléctrica del Ar y del N<sub>2</sub> en función de la temperatura.

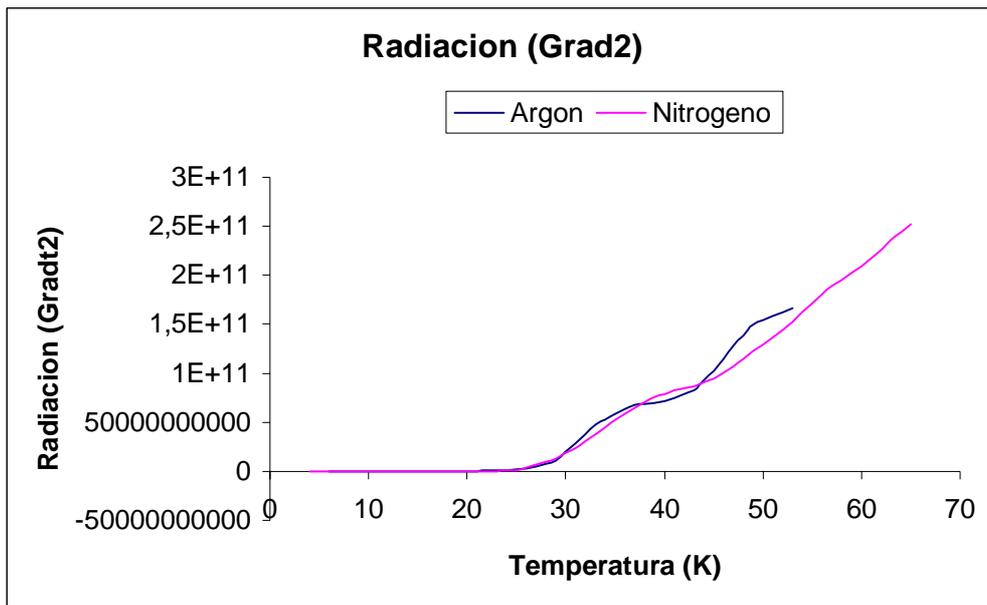


Fig. 10. Pérdidas de radiación del Ar y del N<sub>2</sub> en función de la temperatura.

## Capítulo 4

### IV. Metodología

#### 4.1 Técnica de Solución

##### 4.1.1 Equipo Utilizado

El planteamiento teórico y la resolución numérica del proceso de soldadura con arco y electrodo de Tungsteno, se realizó en una estación de trabajo Pentium 4 a 3.0 GHz. con 1 GB de RAM, en la versión 3.4 del paquete de cómputo comercial de mecánica de fluidos PHOENICS, herramientas con las que cuenta el laboratorio de modelación matemática de la Facultad de Química de la UNAM. En este software especializado se implementó el modelo computacional a través del lenguaje de entrada para PHOENICS, denominado PIL (Phoenix Input Language) y a través de codificación en lenguaje Fortran 77.

#### 4.2 Breve descripción del método numérico de volumen de control

La codificación de PHOENICS se basa en el método numérico *Volumen de Control* propuesto por Patankar<sup>(5)</sup>.

En esta técnica el dominio del cálculo o sistema se divide 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 diferenciales de conservación que gobiernan al problema se integran sobre cada volumen. El resultado de tal integración es la transformación de un sistema de ecuaciones parciales a varios sistemas lineales de ecuaciones algebraicas, los cuales pueden resolverse por medio de técnicas numéricas iterativas. Cuando los sistemas lineales de ecuaciones de discretización son resueltos, la solución consiste en obtener los valores de las variables dependientes en los nodos, es decir, en puntos discretos de las variables independientes (variables de posición o tiempo). 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, es decir, la misma técnica sirve para resolver fenómenos de transferencia de calor, de carga eléctrica, de masa, de especies químicas y de momentum. La ecuación general de conservación tiene la siguiente forma:

$$\nabla \cdot \Gamma \phi + S_{\phi} = \frac{\partial \rho \phi}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \nabla \phi)$$

24

donde  $\Gamma, \phi, S_{\phi}$ , son el coeficiente difusivo de transporte general, la variable dependiente general y el término fuente general respectivamente. Entonces, la generación de cada ecuación de transporte consiste en asignar valores adecuados de  $\Gamma, \phi$  y  $S_{\phi}$ . Por ejemplo, la ecuación de continuidad se obtiene asignando  $\phi = 1, \Gamma = 0$  y  $S_{\phi} = 0$ , mientras que la ecuación de conservación de energía se logra deducir al poner  $\phi = h, \Gamma = \frac{k}{C_p}$  y  $S_{\phi} = S_h$ .

La ecuación representa un balance de  $\phi$ , en donde se aprecian el término transitorio (o acumulación de  $\phi$ ), seguido del término de entradas netas por transporte convectivo de  $\phi$ , el término de entradas netas de transporte difusivo de  $\phi$ , y el término fuente o generación de  $\phi$ .

### 4.3 Software utilizado

El modelo 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 propuesto por Patankar<sup>(5)</sup>.

Posteriormente, se implementó en el código comercial PHOENICS 3.2, el cual consta de tres programas principales (*Satellite, Earth, y Photon*) en donde el usuario establece

y plantea el problema a resolver a través de la manipulación de dos archivos importantes: *QI*, *Ground.for* (escrito en FORTRAN 77), resuelve el problema numérico con el “solver” *earth* y visualiza la solución a través de otros dos archivos, el *phi* y el *result*.

Es importante mencionar que el número de iteraciones para conseguir la convergencia puede ser variado de acuerdo con la *grid* utilizada y también con las condiciones específicas de cálculo. Los cálculos que presentan altos valores de corriente y pequeños valores de longitud de arco son más difíciles de convergir en comparación con los que tienen valores relativamente pequeños de corriente y valores altos de longitud de arco<sup>(23)</sup>.

#### 4.3.1 Función de *QI*

El *QI* es un archivo de texto que usa comandos de PIL (PHOENICS Input Language) y su función es servir de interfase entre el software y el usuario, ya que en ese archivo se define el problema físico a resolver, es decir, se establecen las ecuaciones gobernantes, las condiciones de frontera de las ecuaciones diferenciales, condiciones iniciales, la geometría empleada, la malla, propiedades de los materiales, parámetros numéricos así como también se eligen los modelos de turbulencia si acaso el problema lo requiere, en otras palabras, el *QI* es el lugar donde se alimenta la formulación matemática del fenómeno físico a resolver. En términos de PHOENICS es el archivo de texto que *satellite* debe leer antes de cualquier operación.

#### 4.3.2 Función del archivo *Ground.for*

Como se mencionó antes, este es un archivo fuente de FORTRAN 77 (extensión *.for*). La existencia de este archivo se justifica ya que hay cierto tipo de condiciones de fronteras, propiedades de transporte o físicas, términos fuente, etc. que no pueden introducirse de manera natural en el *QI* de PHOENICS. Esto es debido a que las condiciones manejadas en el *QI* son lineales (valores constantes o funciones muy simples), mientras que en el archivo *Ground.for* se pueden introducir no linealidades, y funciones complejas que ayudan a complementar al *QI* y le dan robustez y flexibilidad al paquete en su conjunto.

#### 4.3.3. *Descripción de Satellite*

El *satellite* es el programa pre-procesador de Phoenix. Es el interprete de las instrucciones que proporciona el usuario generando un archivo de datos llamado "eardat" mediante las instrucciones provenientes del archivo *QI*.

Además de compilar y detectar si existen errores de sintaxis en el archivo *QI*.

#### 4.3.4 *Descripción de Earth*

El programa *Earth* es el procesador "solver", es el programa central de Phoenix contiene el software que representa las leyes aplicadas a los elementos de material distribuidos en espacio y tiempo. Parte del código fuente que es directamente accesible al usuario es *ground*.

Ejecuta los algoritmos numéricos que resolverán el sistema de ecuaciones diferenciales parciales transformadas en ecuaciones lineales algebraicas utilizando el método de volumen de control, es decir, resuelve los sistemas resultantes con los métodos iterativos seleccionados por el usuario en el *QI*. Durante las iteraciones se muestran gráficas en pantalla donde se puede apreciar si hay convergencia en todas las ecuaciones de conservación que se resuelven, si los residuales de las ecuaciones de conservación decrecen. En la última iteración *Earth* crea los archivos *result* y *phi* para salvar los resultados y que estos se puedan consultar de manera tabular o en forma gráfica.

Las variables que se resuelven en este programa son

#### 4.3.5 *Descripción de Photon*

Este es un programa post-procesador, a través del cual se puede visualizar y desplegar de manera gráfica los resultados de los cálculos efectuados por *Earth*, siempre y cuando se haya generado un archivo *PHI* previo.

#### 4.3.6 Funciones de los archivos result y phi

El *result* es un archivo que escribe *Earth* después de haber corrido, es un archivo de texto en forma de tablas, números gráficas, en este archivo se guardan los resultados al final de una corrida en forma tabular, en donde se reportan los residuales o errores y los balances globales de las ecuaciones de conservación resueltas. Además, muestra toda la información que tradujo el *satellite* para *earth*.

En tanto que el archivo *phi* contiene los resultados para ser utilizados por el programa *photon* con la finalidad de desplegarlos de manera gráfica.

## 4.4 Diseño de la Experimentación

### 4.4.1. Corridos de Argón

Las corridas de cómputo se describen en el esquemas de la Figura 11, en donde se hicieron series de cómputo variando la longitud del arco y dejando la corriente constante ( $I=200A$ ), y también se corrieron series variando la corriente del arco y dejando la longitud constante ( $L=0.01m$ ).

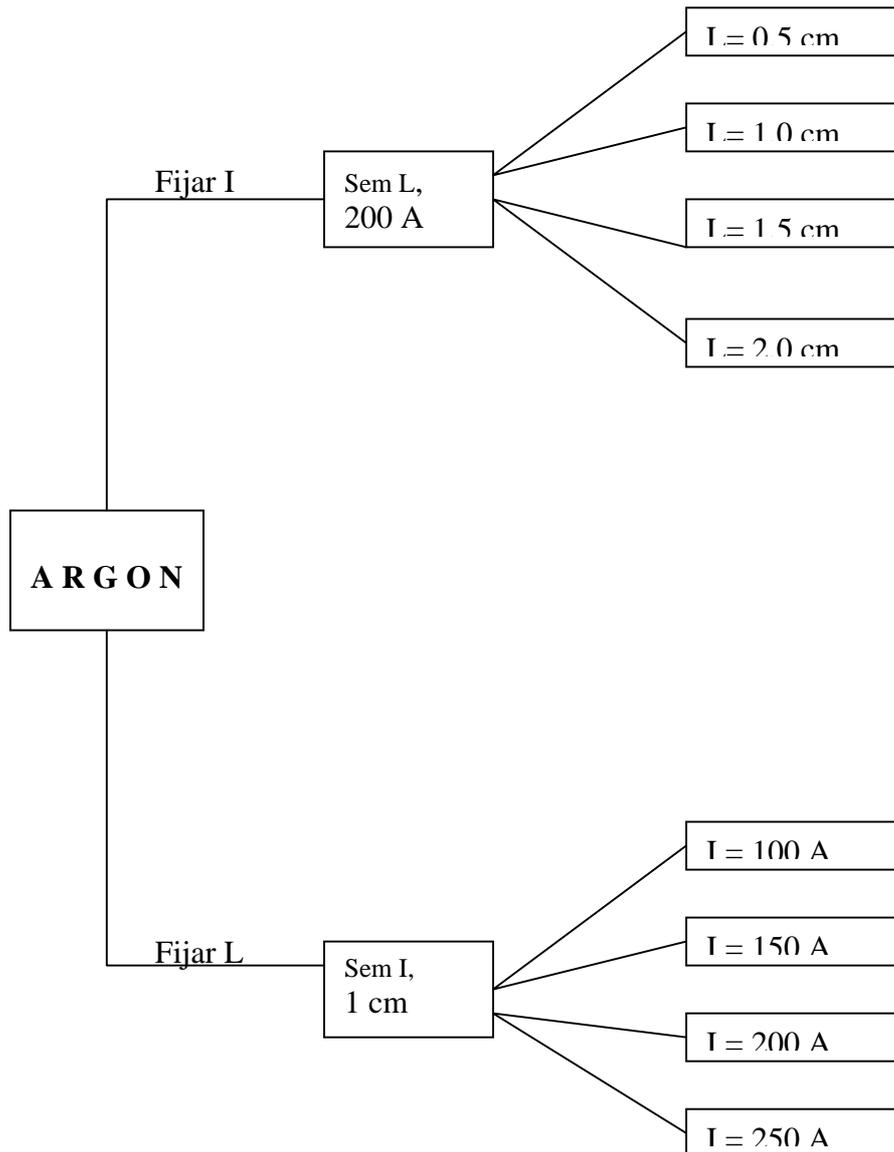


Fig. 11. Esquema de cálculos para Ar como gas de cobertura.

#### 4.4.2. Corridas de Nitrógeno

Las corridas para nitrógeno no siguieron el mismo esquema que para el Ar, ya que en este caso únicamente se considero constante la longitud de 1 cm y se vario la intensidad de corriente este esquema se muestra en la Figura 12.

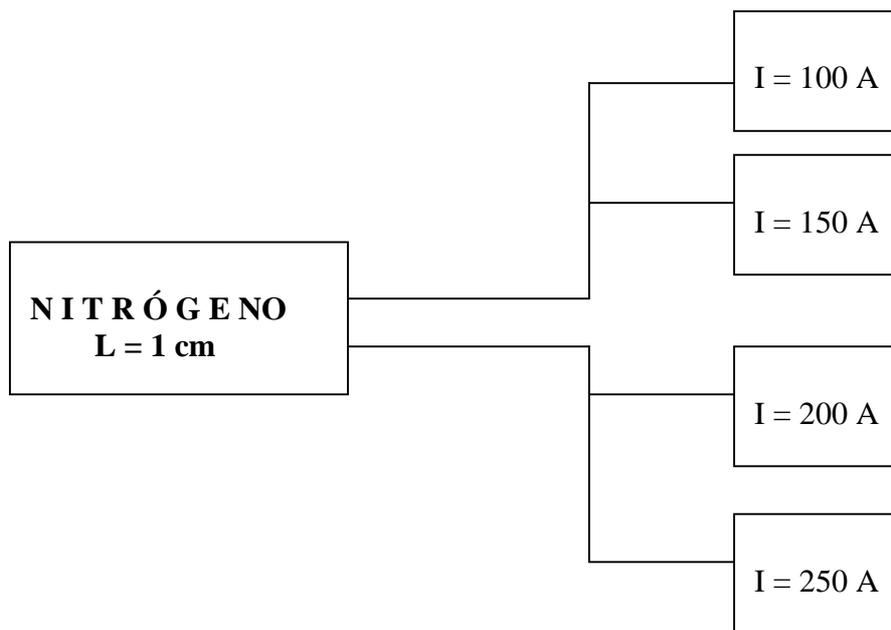


Fig. 12. Esquema de cálculos para N<sub>2</sub> como gas de cobertura.

#### 4.5 Validación

Para sustentar el modelo y los resultados que en este trabajo se presentan se recurrió a numerosas publicaciones, en las que se presentan resultados experimentales y además se analizan los datos obtenidos por Hsu y , mencionados con anterioridad.

##### Mapas de temperatura

Todos los casos fueron simulados utilizando aproximaciones de potencial eléctrico. En la Figura 13 se muestra una comparación entre los resultados de las simulaciones y los resultados experimentales para un arco cubierto con argón con  $I=200\text{A}$  y  $L=1\text{cm}$ , mientras que la Figura 14 compara simulaciones y mediciones de temperatura para un arco de argón de  $I=300\text{A}$  y  $L=1\text{cm}$ . Los valores máximos de temperatura se encuentran localizados frente al cátodo en todos los casos. La temperatura se incrementa conforme se incrementa la corriente. La forma típica de campana de las isoterms debidas a la convección en el jet impactando en el ánodo aparece en las simulaciones. Se puede afirmar que existe una muy buena concordancia cualitativa y cuantitativa entre las simulaciones y mediciones experimentales, por lo que se puede concluir que nuestro modelo es robusto y queda completamente validado.

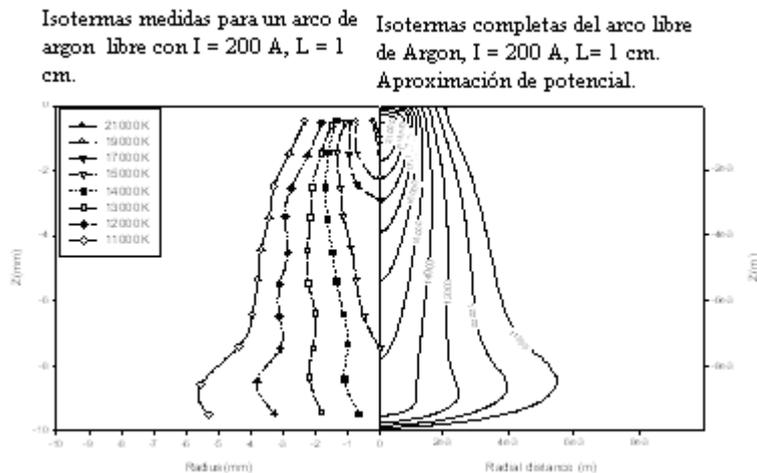


Fig. 13.- Isothermas experimentales y simuladas del plasma expuesto a una atmósfera inerte de Argón con  $I=200\text{A}$  y  $L=1\text{cm}$ .

Isotermas medidas para valores de  $I = 300$  A,  $L = 1$  cm.

Isotermas calculadas para un arco libre de Argon, con valores de  $I = 300$  A y  $L = 1$  cm.

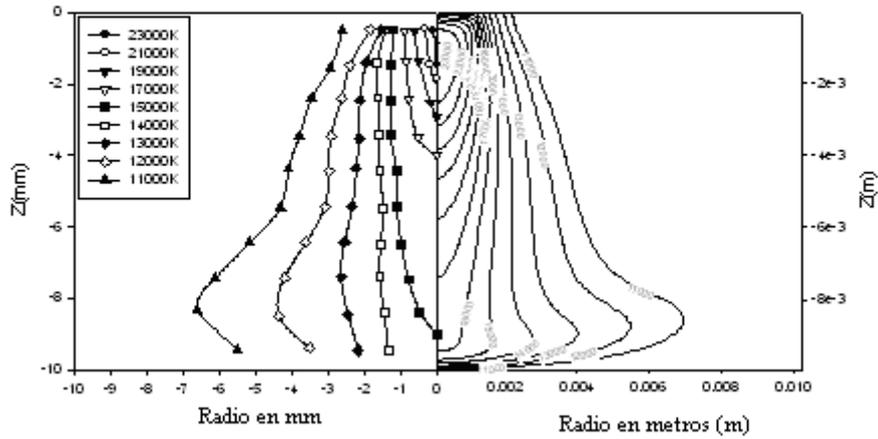


Fig. 14.- Isotermas experimentales y simuladas del plasma expuesto a una atmósfera inerte de Argón con  $I=300$ A y  $L=1$ cm.

## Capítulo 5

## V. Resultados

### 1.1. Efecto de la intensidad de corriente, caso Argón (Ar).

A continuación se presentarán vectores de velocidad del jet, fluxes de calor en el ánodo o pieza de trabajo, contornos de temperatura y de potencial eléctrico para soldadura con arco con argón como gas de cobertura. Se estudia el efecto de la corriente del arco con soldaduras de 100, 150, 200 y 250 A, y manteniendo la misma longitud de arco de 1cm.

#### 1.1.1. Patrones de flujo del jet

En las Figuras 15 a 18 se presentan los patrones de flujo a través de vectores de velocidad para soldaduras con argón manteniendo la longitud de arco constante en 1cm y variando la corriente de arco desde 100A (Fig.15), 150A (Fig. 16), 200A (Fig. 17), y 250A (Fig. 18).

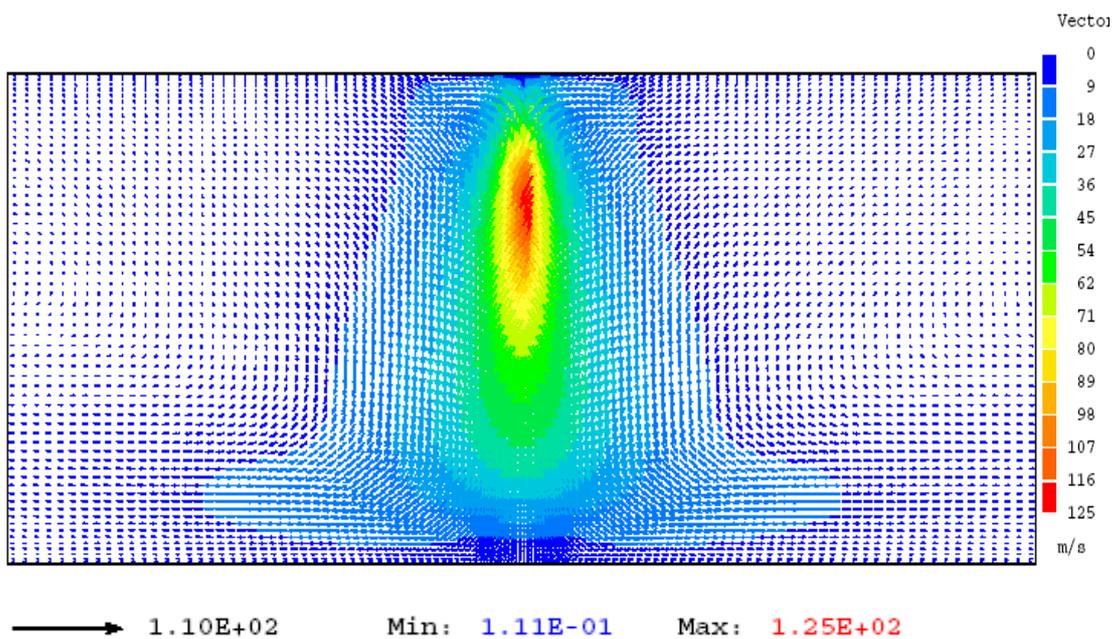


Fig. 15.- Vectores de velocidad en el plasma para el caso Ar L=1.0cm I=100A, vector de referencia = 1.10E+02, velocidad máxima en el jet 125 m/s.

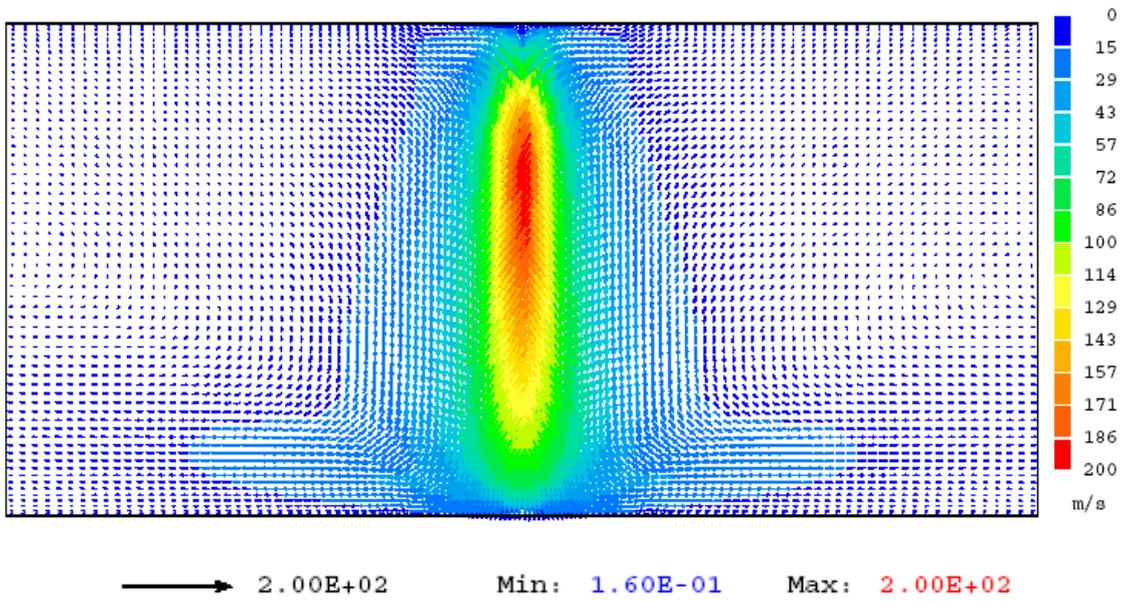


Fig 16.- Vectores de velocidad en el plasma para el caso Ar, L= 1.0cm y I=150A, vector de referencia = 2.00E+02, velocidad máxima en el jet 200 m/s.

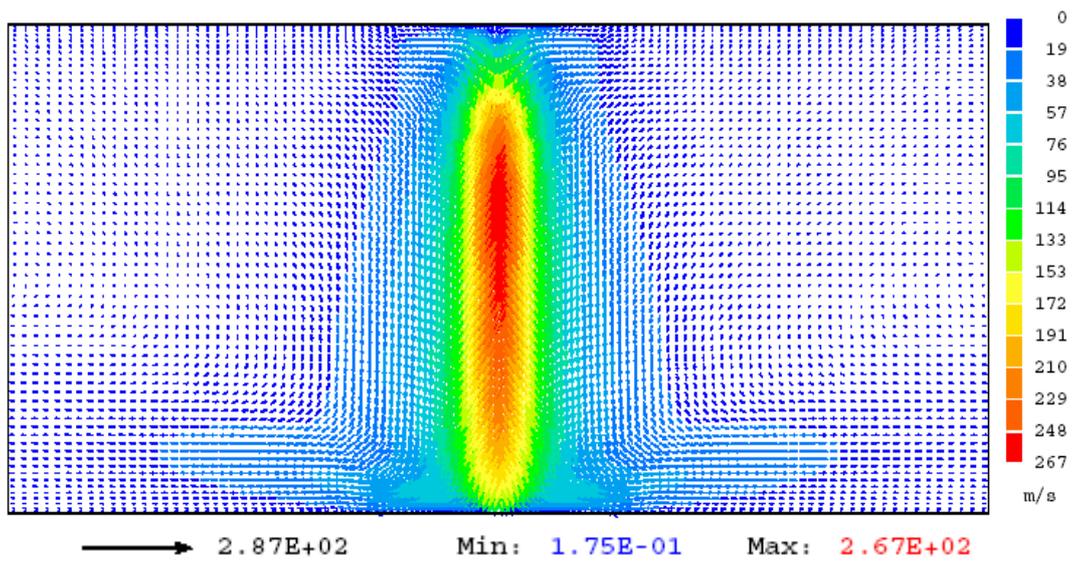


Fig. 17.- Vectores de velocidad en el plasma para el caso Ar, L= 1.0cm y I= 200A, vector de referencia = 2.87E+02, velocidad máxima en el jet 267 m/s.

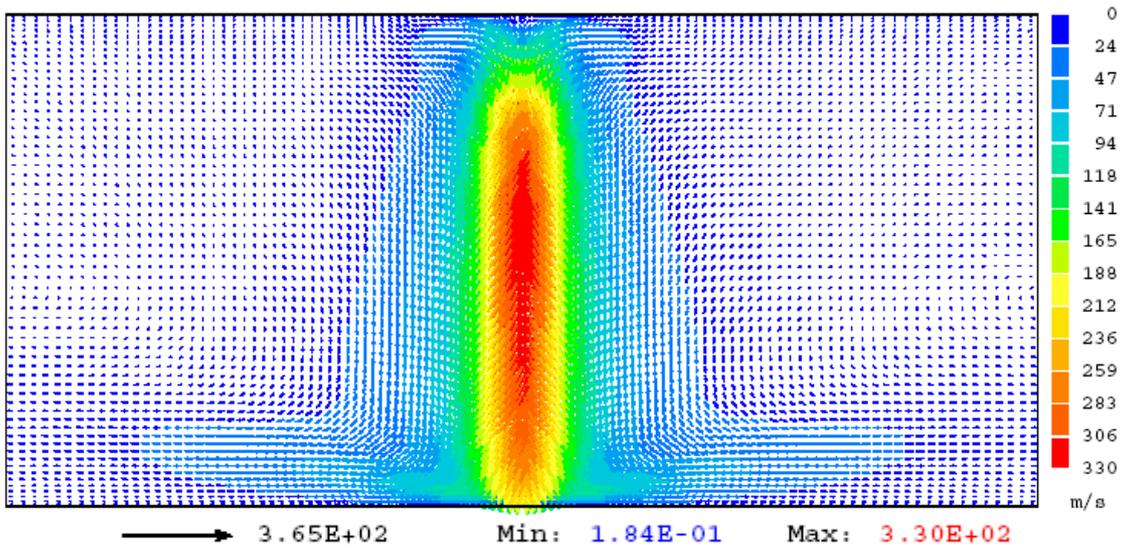


Fig. 18.- Vectores de velocidad en el plasma para el caso Ar, L= 1.0cm y I=250 A, vector de referencia = 3.65E+02, velocidad máxima en el jet 330 m/s.

1.1.2. Contornos de temperaturas en el arco

En las Figuras 19 a 22 se presentan los contornos de temperatura para soldaduras con argón manteniendo la longitud de arco constante en 1cm y variando la corriente de arco desde 100A (Fig. 19), 150A (Fig. 20), 200A (Fig. 21), y 250A (Fig. 22).

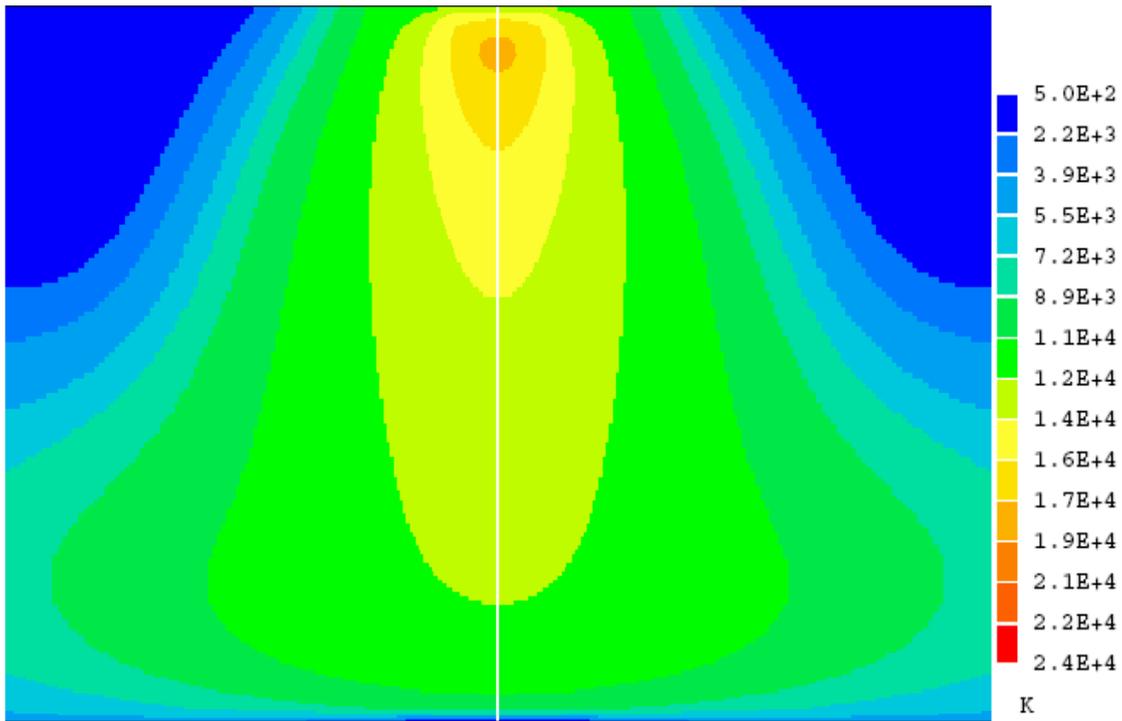


Fig. 19.- Contorno de temperatura en el plasma para el caso Ar, L= 1.0cm y I= 100 A, rango de temperaturas  $T_i = 500$  K,  $T_f = 24000$  K.

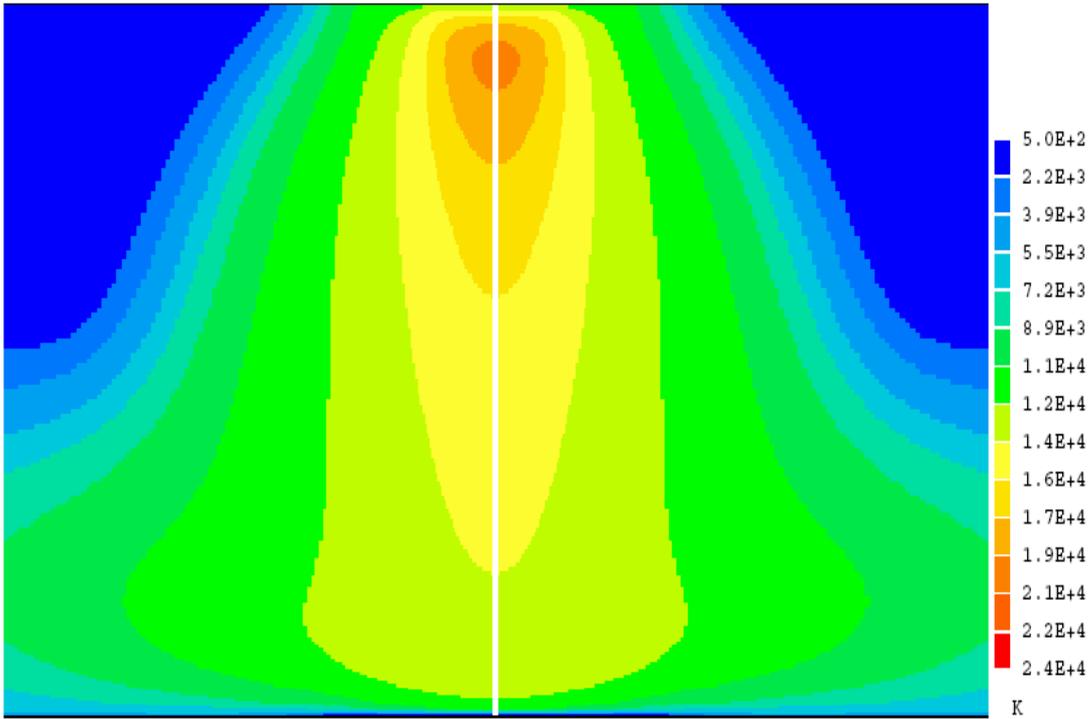


Fig. 20.- Contorno de temperatura en el plasma para el caso Ar,  $L = 1.0\text{ cm}$  y  $I = 150\text{ A}$ , rango de temperaturas  $T_i = 500\text{ K}$ ,  $T_f = 24000\text{ K}$ .

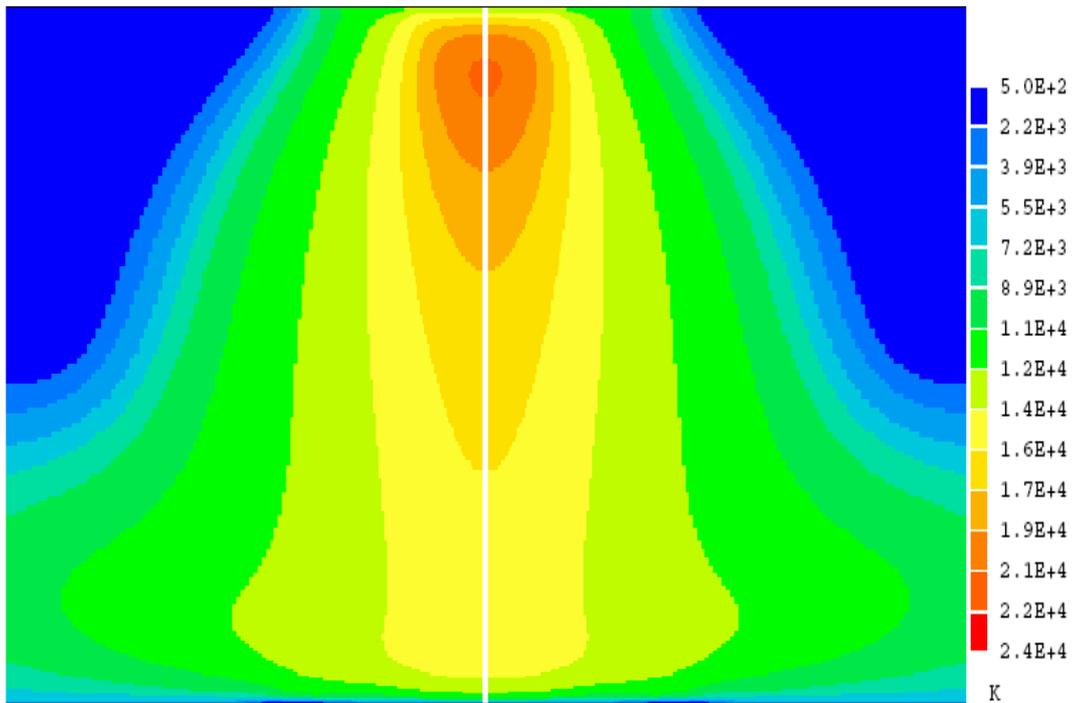


Fig. 21.- Contorno de temperatura en el plasma para el caso Ar,  $L = 1.0\text{ cm}$  y  $I = 200\text{ A}$ , rango de temperaturas  $T_i = 500\text{ K}$ ,  $T_f = 24000\text{ K}$ .

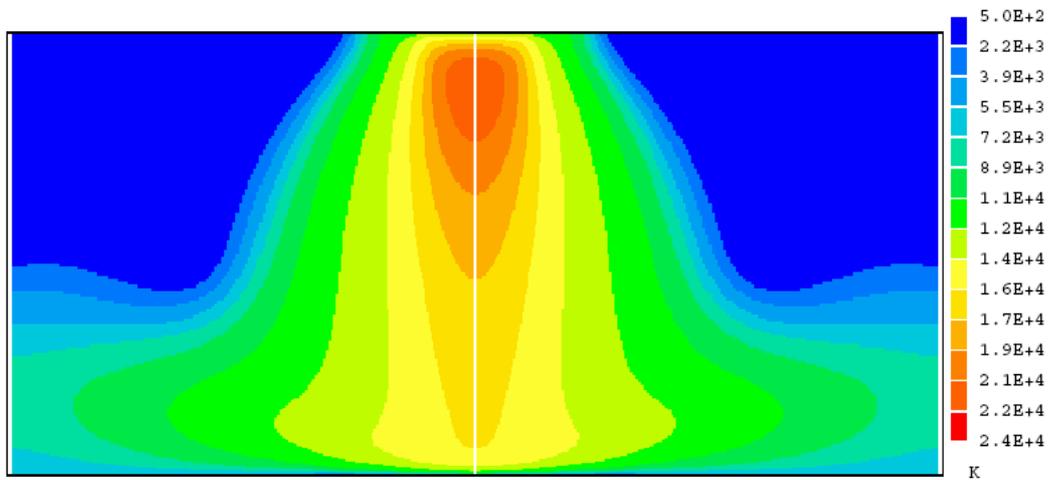


Fig. 22.- Contorno de temperatura en el plasma para el caso Ar,  $L= 1.0\text{cm}$  y  $I=250\text{A}$ , rango de temperaturas  $T_i = 500\text{ K}$ ,  $T_f = 24000\text{ K}$ .

### 1.1.3. Contornos de potencial eléctrico en el arco

En las Figuras 23 a 26 se presentan los contornos de potencial eléctrico para soldaduras con argón manteniendo la longitud de arco constante en 1cm y variando la corriente de arco desde 100A (Fig. 23), 150A (Fig. 24), 200A (Fig. 25), y 250A (Fig. 26).

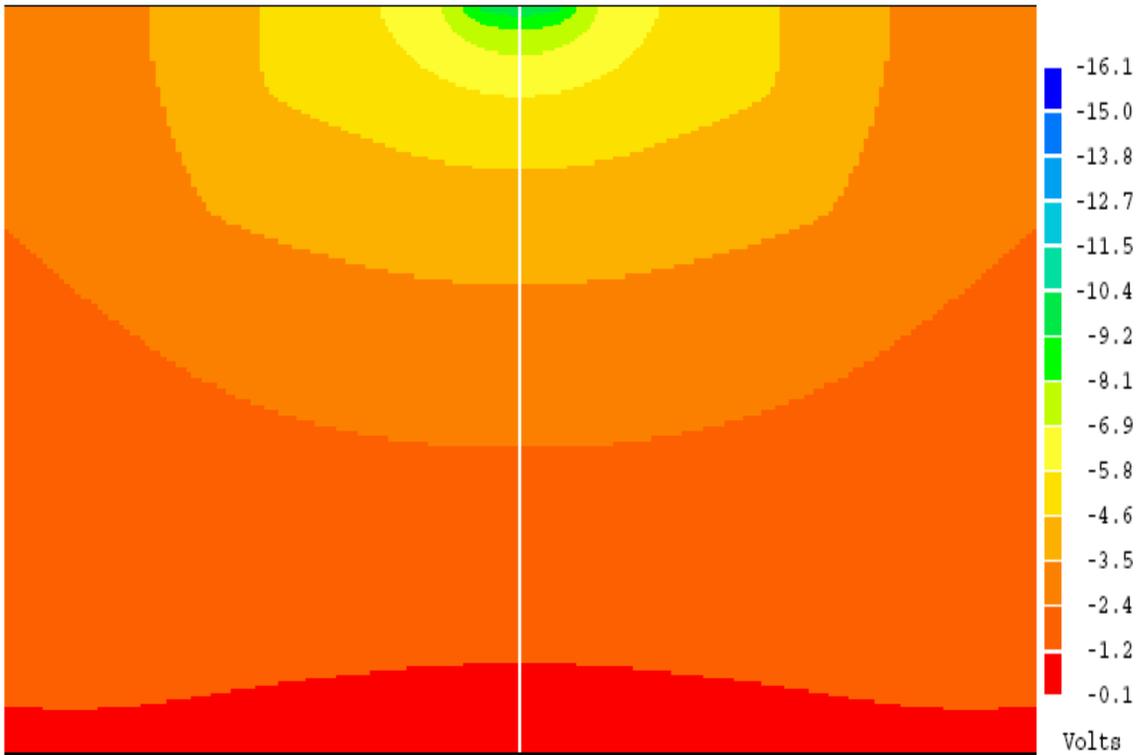


Fig. 23.- Contorno de potencial eléctrico en el plasma para el caso Ar,  $L=1.0\text{cm}$  y  $I=100$  A, rango de potencial  $V_i = -16.1$  V,  $V_f = 0.0$  V, Voltaje= $10.2\text{V}$  .

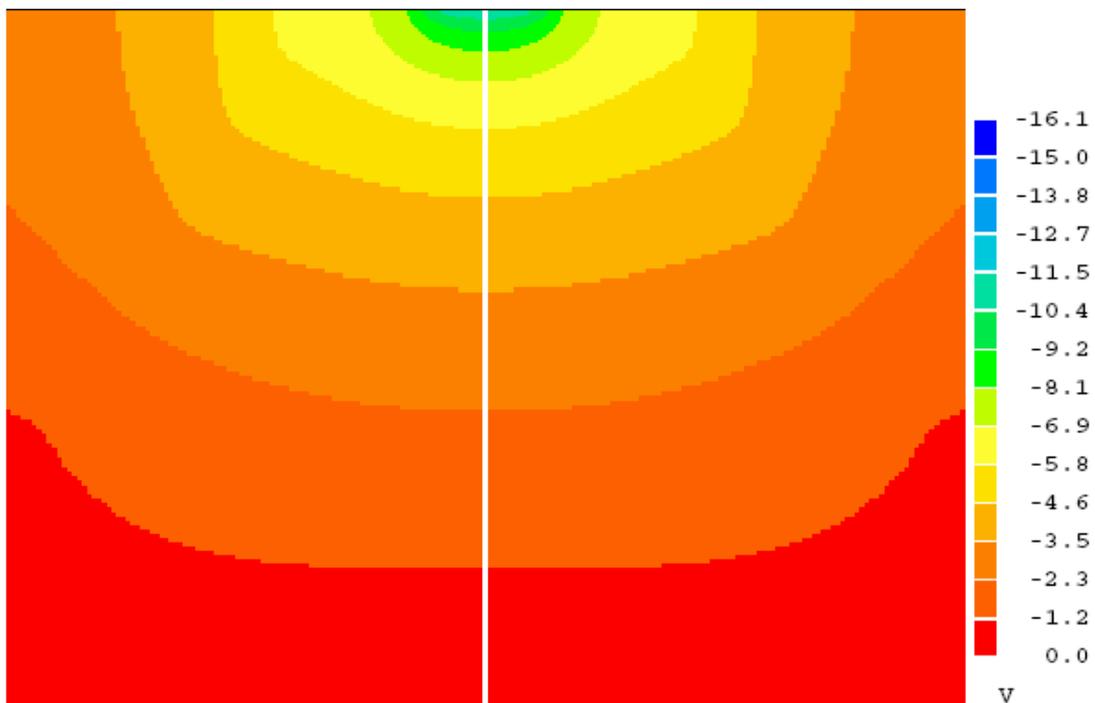


Fig. 24.- Contorno de potencial eléctrico en el plasma para el caso Ar,  $L= 1.0\text{cm}$  y  $I=150\text{A}$ , rango de potencial  $V_i = -16.1$  V,  $V_f = 0.0$  V, Voltaje= $11.3\text{V}$ .

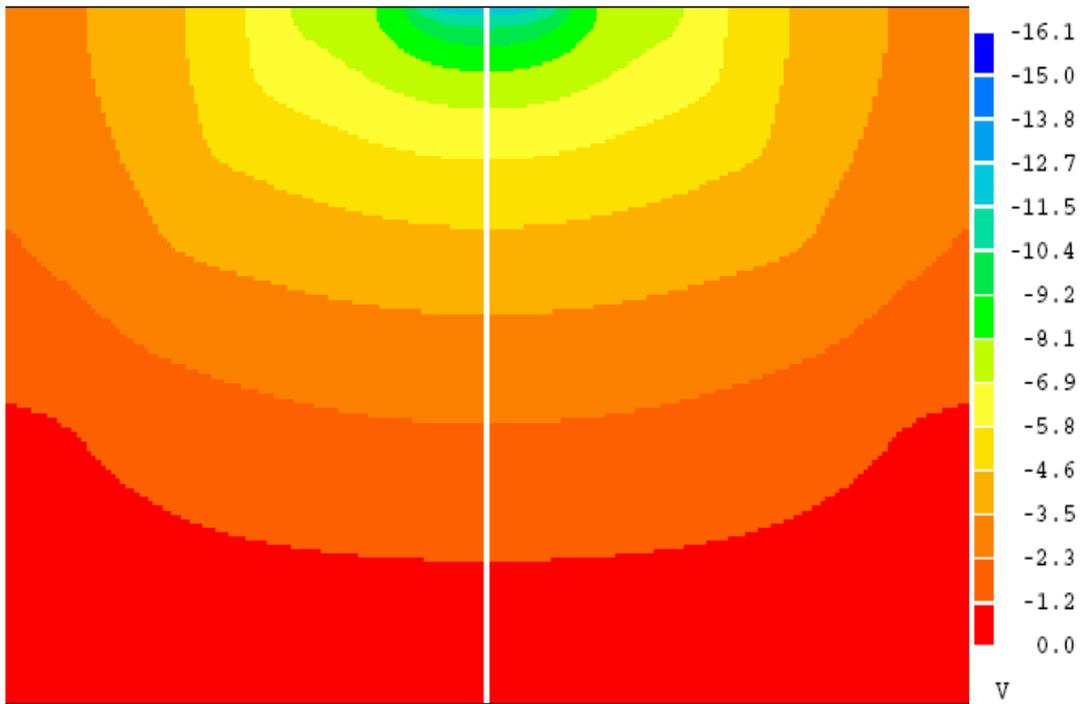


Fig. 25.- Contorno de potencial eléctrico en el plasma para el caso Ar,  $L=1.0\text{cm}$  y  $I=200\text{A}$ , rango de potencial  $V_i = -16.1\text{ V}$ ,  $V_f = 0.0\text{ V}$ , Voltaje= $12.4\text{V}$ .

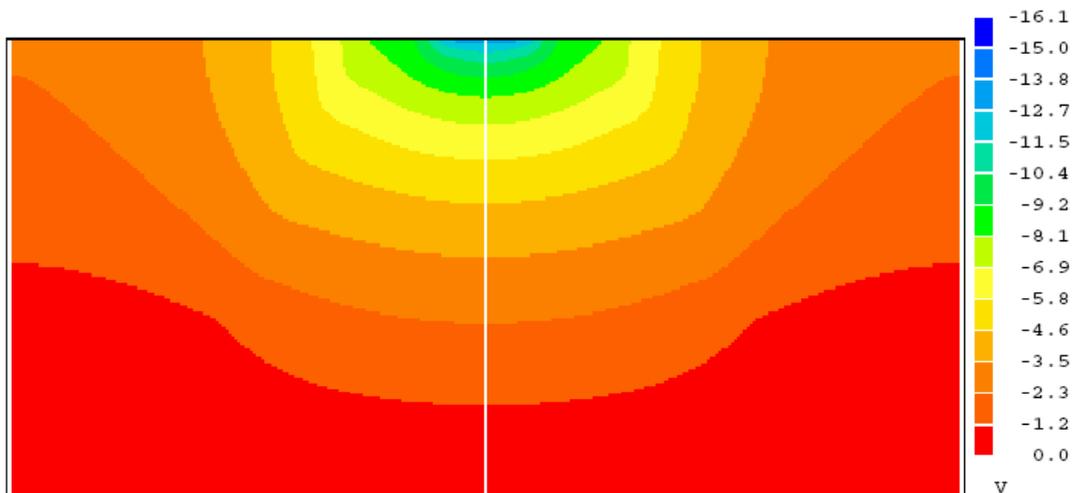


Fig 26.- Contorno de potencial eléctrico en el plasma para el caso Ar,  $L= 1.0\text{cm}$  y  $I=250\text{ A}$ , rango de potencial  $V_i = -16.1\text{ V}$ ,  $V_f = 0.0\text{ V}$ , Voltaje= $13.3\text{V}$ .

#### 1.1.4. Fluxes de calor sobre el ánodo $Q$ .

En las Figuras 27 a 30 se presentan los perfiles de los fluxes de calor totales y por cada mecanismos de transferencia de calor (convectivo, radiante, efecto thompson y función

trabajo), para soldaduras con argón manteniendo la longitud de arco constante en 1cm y variando la corriente de arco desde 100A (Fig. 27), 150A (Fig. 28), 200A (Fig. 29), y 250A (Fig. 30).

En la Figura 31 se presentan los fluxes totales de calor para casos de soldadura con arco y gas argón, manteniendo la longitud constante en 1cm y variando la corriente desde 100, 150, 200, 250 y 300A.

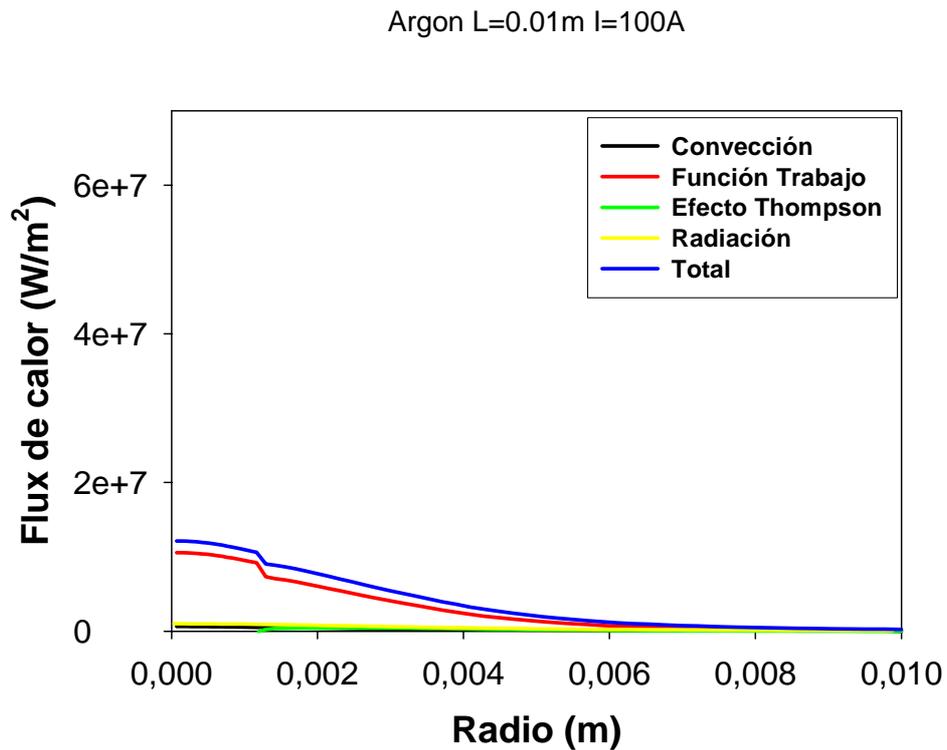


Fig. 27.- Fluxes de calor en el ánodo para el caso Ar, L=1.0cm y I=100 A.

Argón L=0.01m I=150A

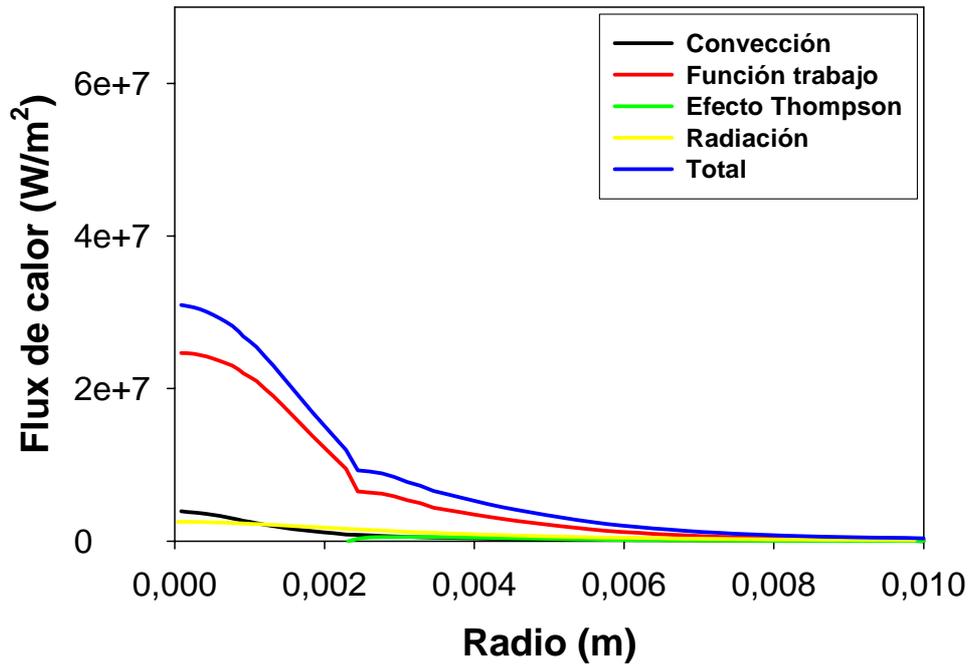


Fig. 28.- Fluxes de calor en el ánodo para el caso Ar, L=1.0cm y I=150 A.

Argón L=0.01m I=200A

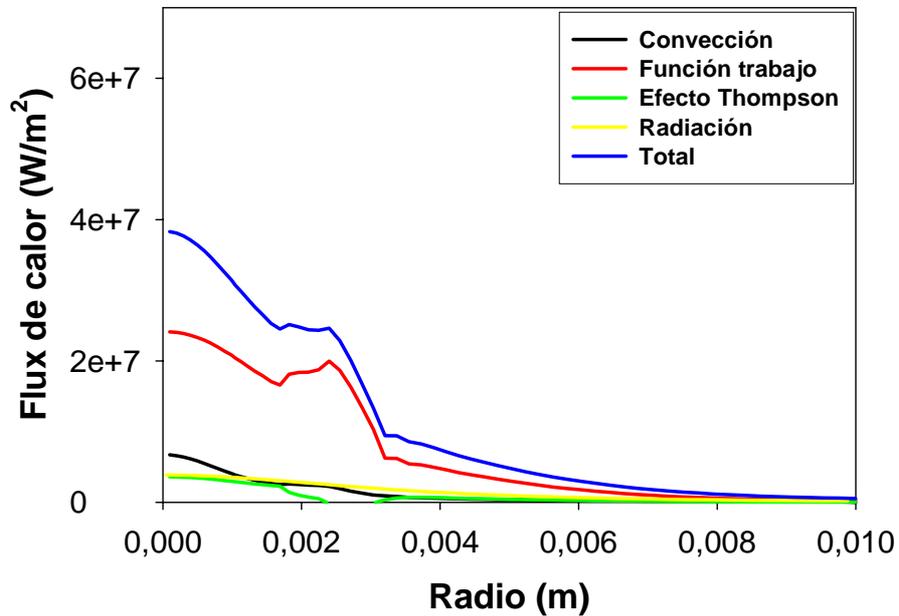


Fig. 29.- Fluxes de calor en el ánodo para el caso Ar, L=1.0cm y I=200 A.

Argón L=0.01m I=250A

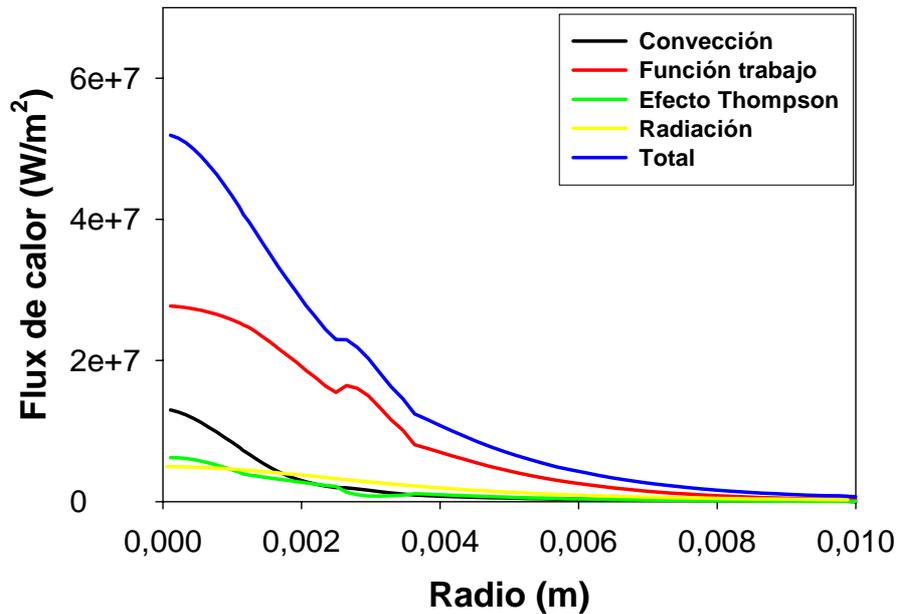


Fig. 30.- Fluxes de calor en el ánodo para el caso Ar, L=1.0cm y I=250 A.

Argón L=0.01m

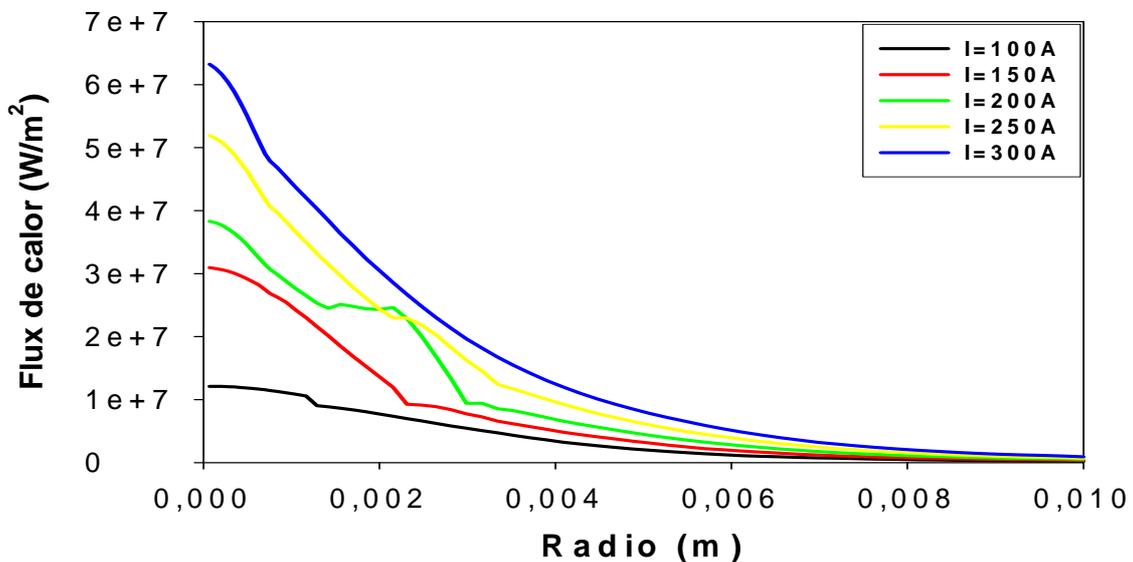


Fig. 31.- Fluxes de calor en el ánodo para arcos con Ar, manteniendo la longitud constante en L=1.0cm y variando la corriente del arco de 100, 150, 200, 250 y 300A.

## 1.2. Efecto de la longitud de arco, caso Argón (Ar)

A continuación se presentarán vectores de velocidad del jet, fluxes de calor en el ánodo o pieza de trabajo, contornos de temperatura y de potencial eléctrico para soldadura con

arco usando argón como gas de cobertura. Se estudia el efecto de la longitud del arco con soldaduras de 0.5cm, 1cm, 1.5cm, 2cm, y manteniendo la misma corriente de arco de 200A.

1.2.1. *Patrones de flujo en el jet*

En las Figuras 32 a 35 se presentan los patrones de flujo a través de vectores de velocidad para soldaduras con argón manteniendo la corriente de arco constante en 200A y variando la longitud de arco desde 0.5cm (Fig.32), 1.0cm (Fig. 33), 1.5cm (Fig. 34), y 2cm (Fig. 35).

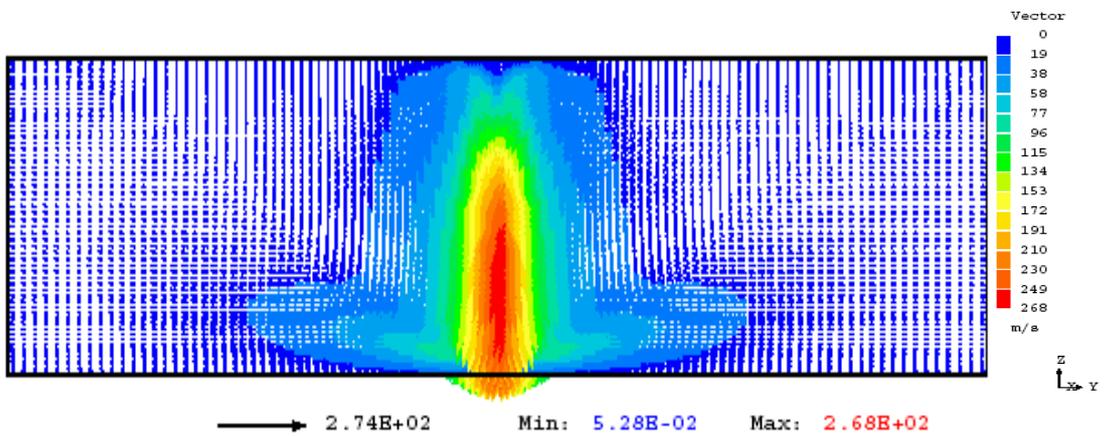


Fig. 32.- Vectores de velocidad en el plasma para el caso Ar, L=0.5cm y I=200A, vector de referencia = 2.74E+02, velocidad máxima en el jet 268 m/s.

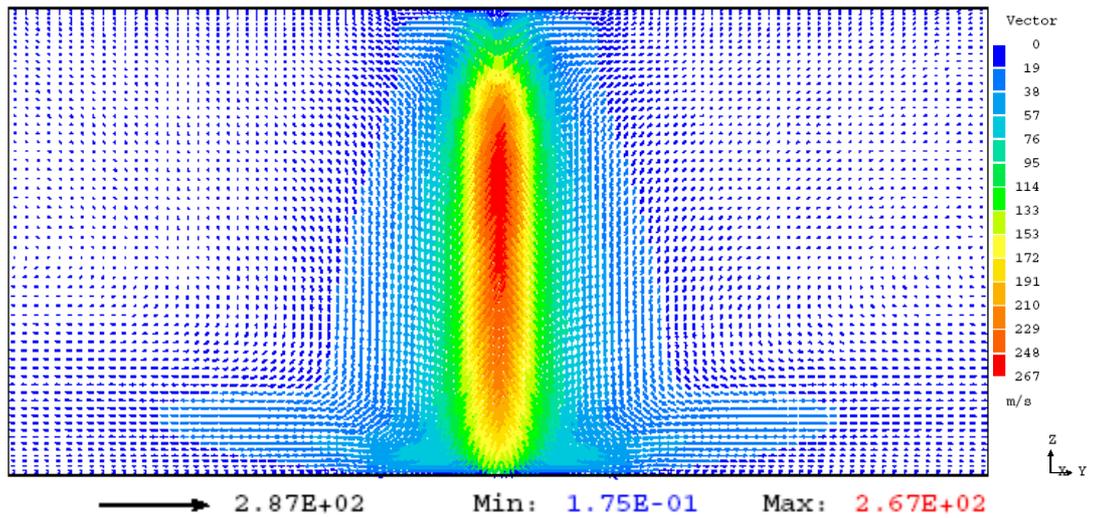


Fig. 33.- Vectores de velocidad en el plasma para el caso Ar, L=1.0cm y I=200A, vector de referencia=2.87E+02, velocidad máxima en el jet 267 m/s.

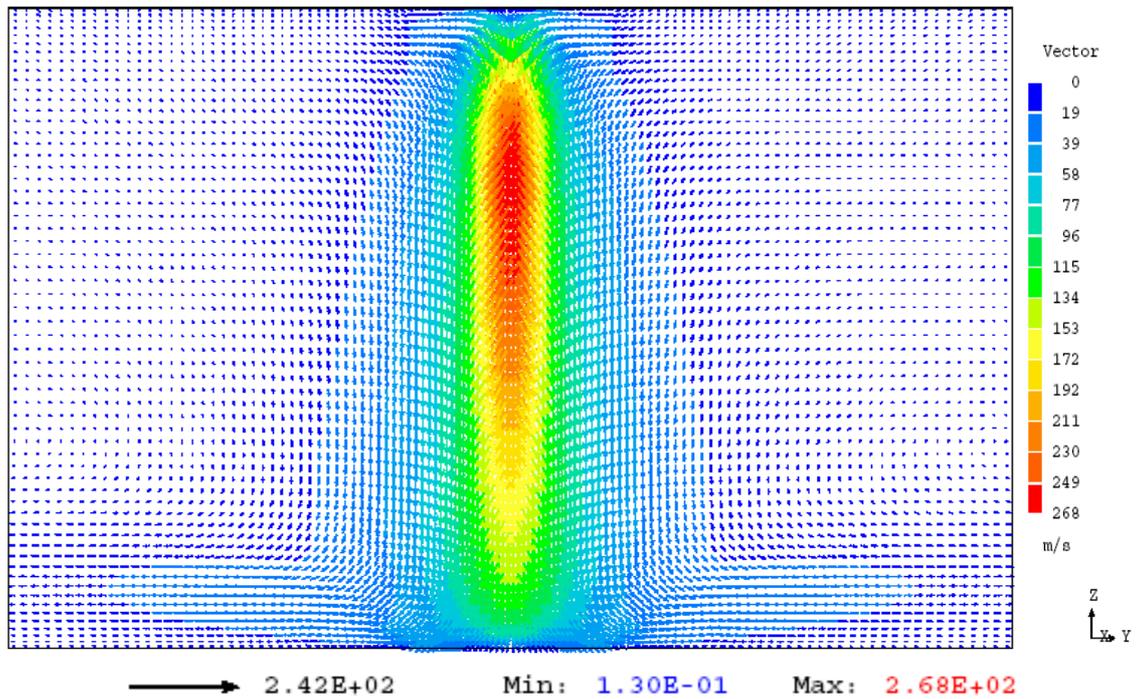


Fig. 34.- Vectores de velocidad en el plasma para el caso Ar, L=1.5cm y I=200A, vector de referencia = 2.42E+02, velocidad máxima en el jet 268 m/s.

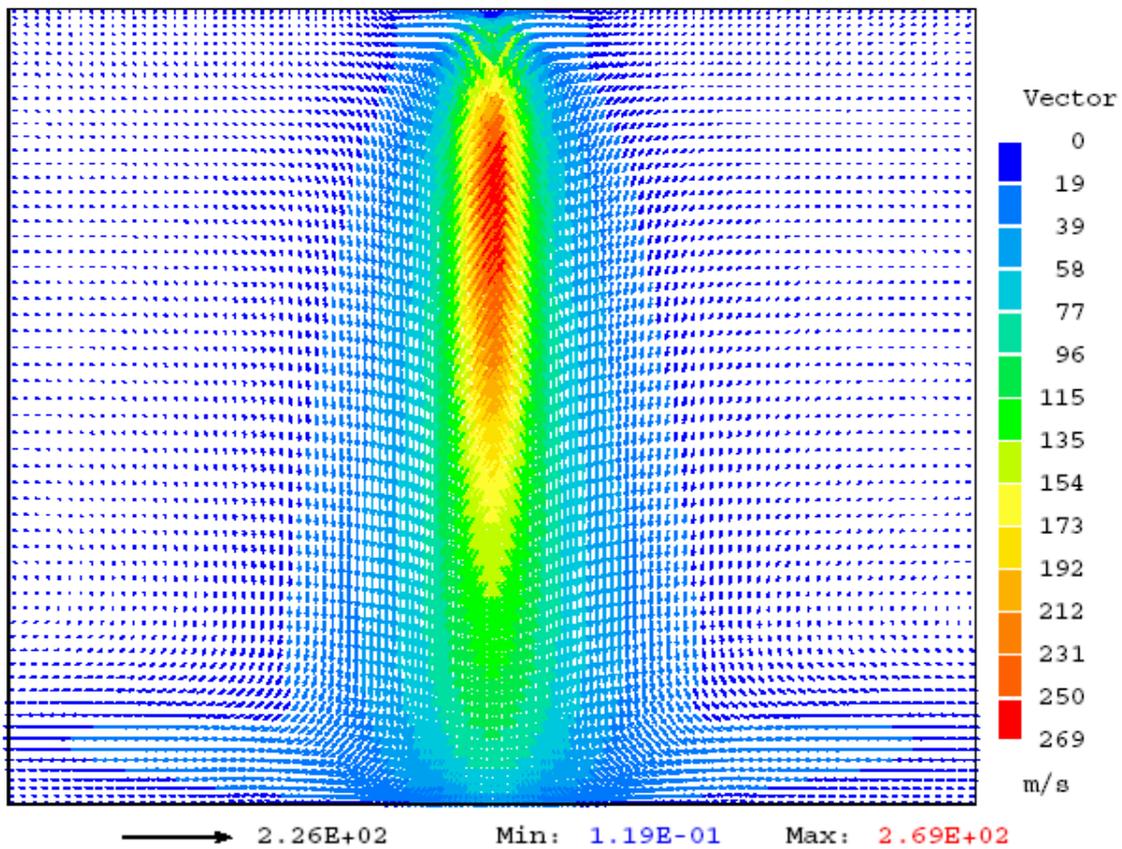


Fig. 35.- Vectores de velocidad en el plasma para el caso Ar, L=2.0cm, y I=200A, vector de referencia = 2.26E+02, velocidad máxima en el jet 269 m/s.

### 1.2.2. Contornos de temperaturas en el arco

En las Figuras 36 a 39 se presentan los contornos de temperatura para soldaduras con argón manteniendo la corriente de arco constante en 200A y variando la longitud de arco desde 0.5 cm (Fig. 36), 1.0 cm (Fig. 37), 1.5cm (Fig. 38), y 2.0cm (Fig. 39).

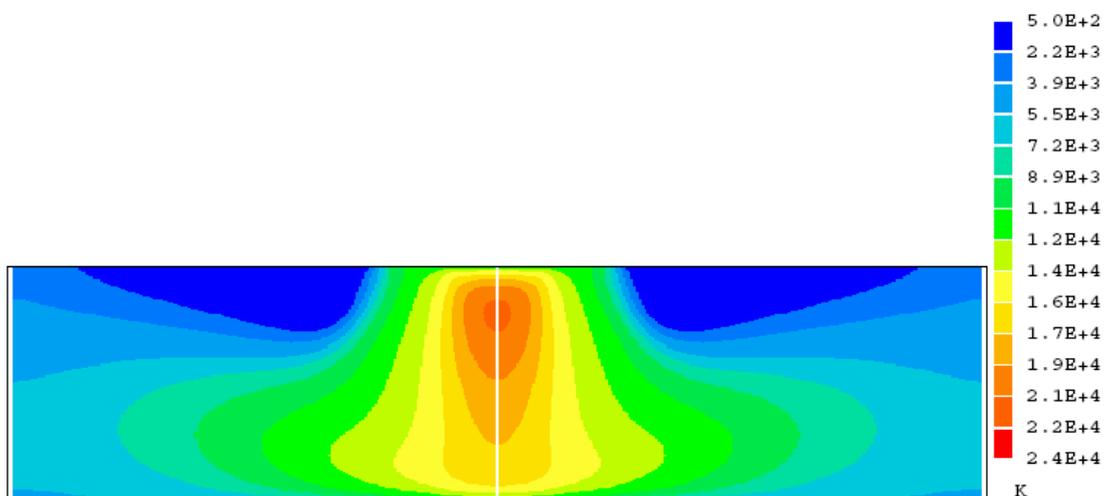


Fig. 36.- Contornos de temperatura en el plasma para el caso Ar,  $L=0.5\text{cm}$  y  $I=200\text{A}$ , rango de temperaturas  $T_i = 500\text{ K}$ ,  $T_f = 24\ 000\text{ K}$ .

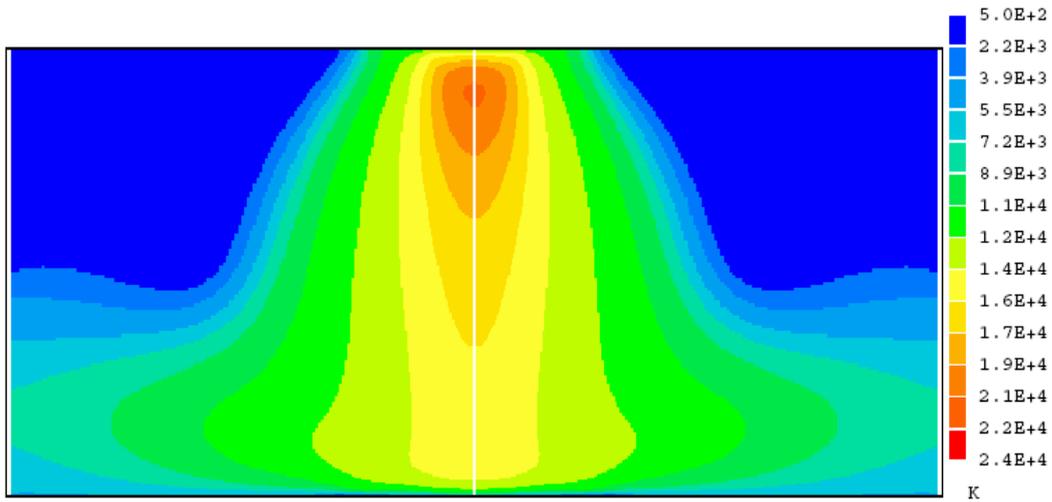


Fig. 37.- Contornos de temperatura en el plasma para el caso Ar,  $L=1.0\text{cm}$  y  $I=200\text{A}$ , rango de temperaturas  $T_i = 500\text{ K}$ ,  $T_f = 24\ 000\text{ K}$ .

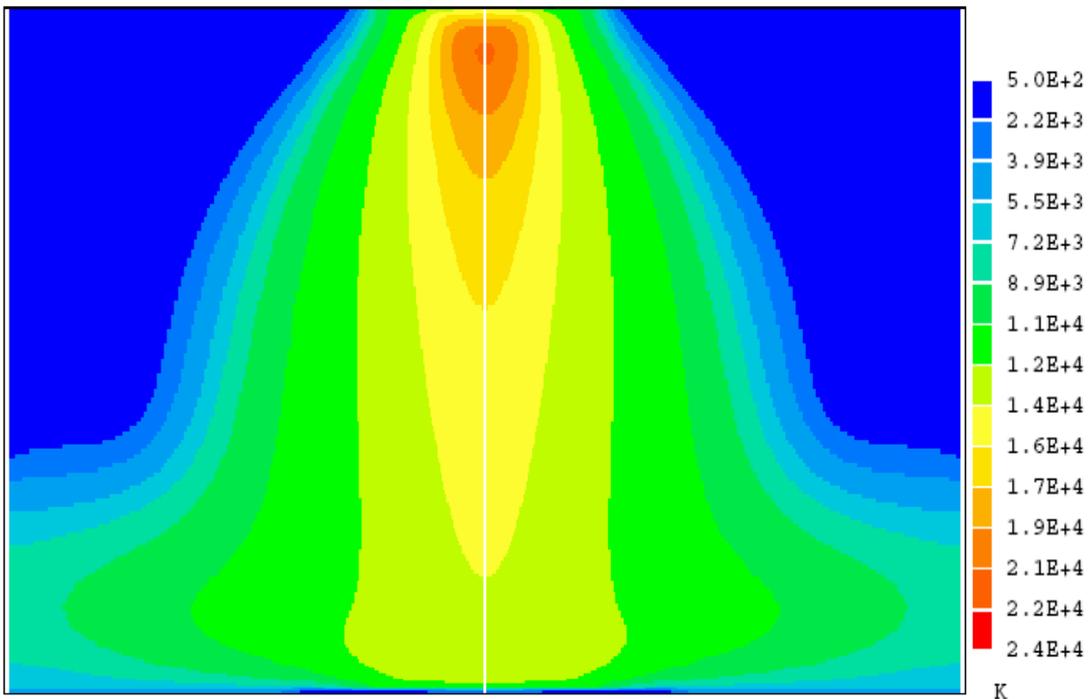


Fig. 38.- Contornos de temperatura en el plasma para el caso Ar,  $L=1.5\text{cm}$  y  $I=200\text{A}$ , rango de temperaturas  $T_i = 500\text{ K}$ ,  $T_f = 24\ 000\text{ K}$ .

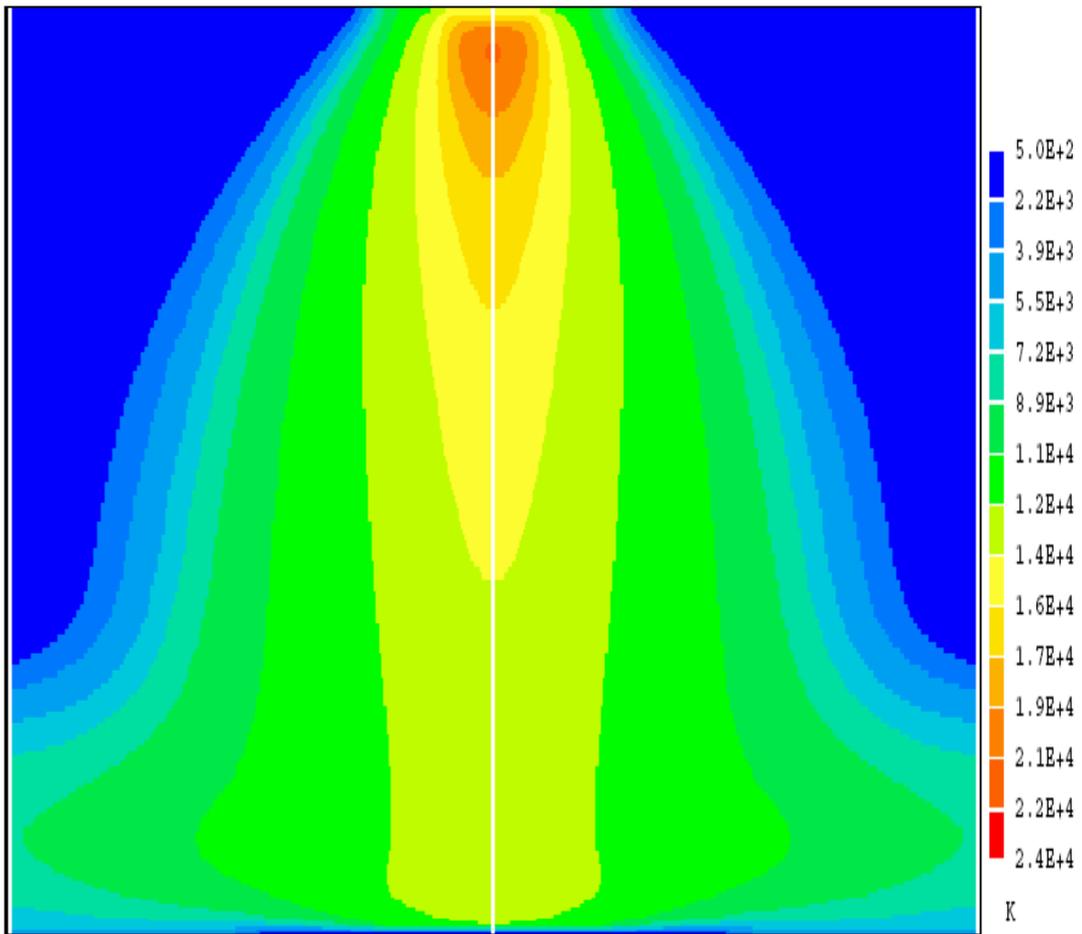


Fig. 39.- Contornos de temperatura en el plasma para el caso Ar,  $L=2.0\text{cm}$  y  $I=200\text{A}$ , rango de temperaturas  $T_i = 500\text{ K}$ ,  $T_f = 24\ 000\text{ K}$ .

### 1.2.3. Contornos de potencial eléctrico en el arco

En las Figuras 40 a 43 se presentan los contornos de potencial eléctrico para soldaduras con argón manteniendo la corriente de arco constante en 200A y variando la longitud de arco desde 0.5cm (Fig. 40), 1.0cm (Fig. 41), 1.5cm (Fig. 42), y 2.0cm (Fig. 43).

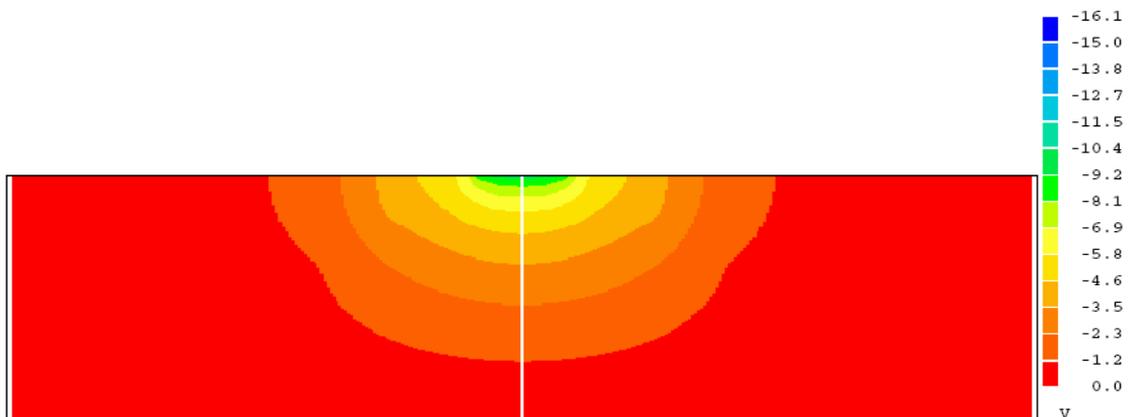


Fig. 40.- Contornos de potencial eléctrico en el arco para el caso Ar,  $L=0.5\text{cm}$  y  $I=200\text{A}$ , rango de potencial  $V_i = -16.1\text{V}$ ,  $V_f = 0.0\text{V}$ .

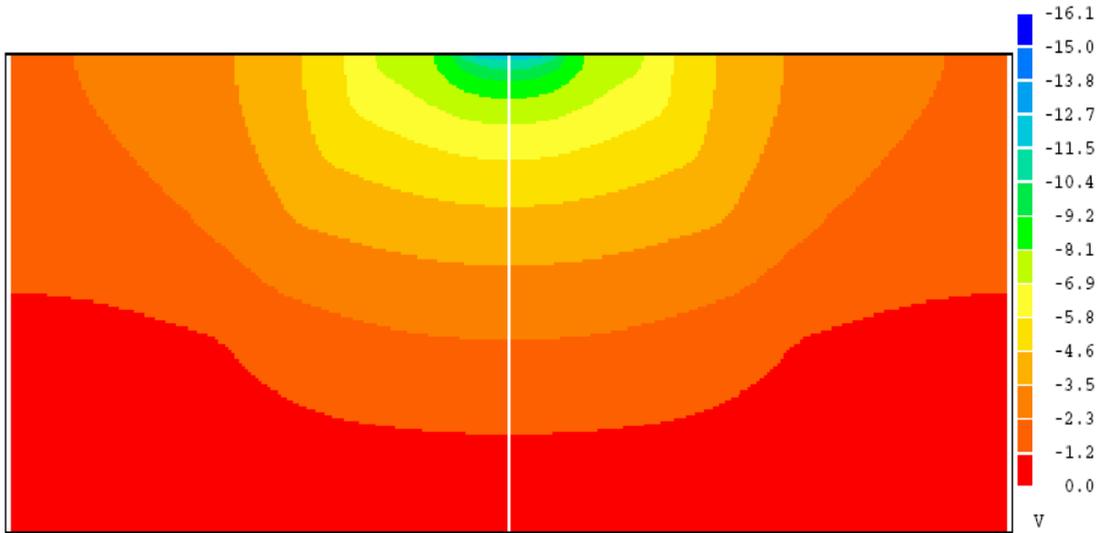


Fig. 41.- Contornos de potencial eléctrico en el arco para el caso Ar,  $L=1.0\text{cm}$  y  $I=200\text{A}$ , rango de potencial  $V_i = -16.1\text{V}$ ,  $V_f = 0.0\text{V}$ .

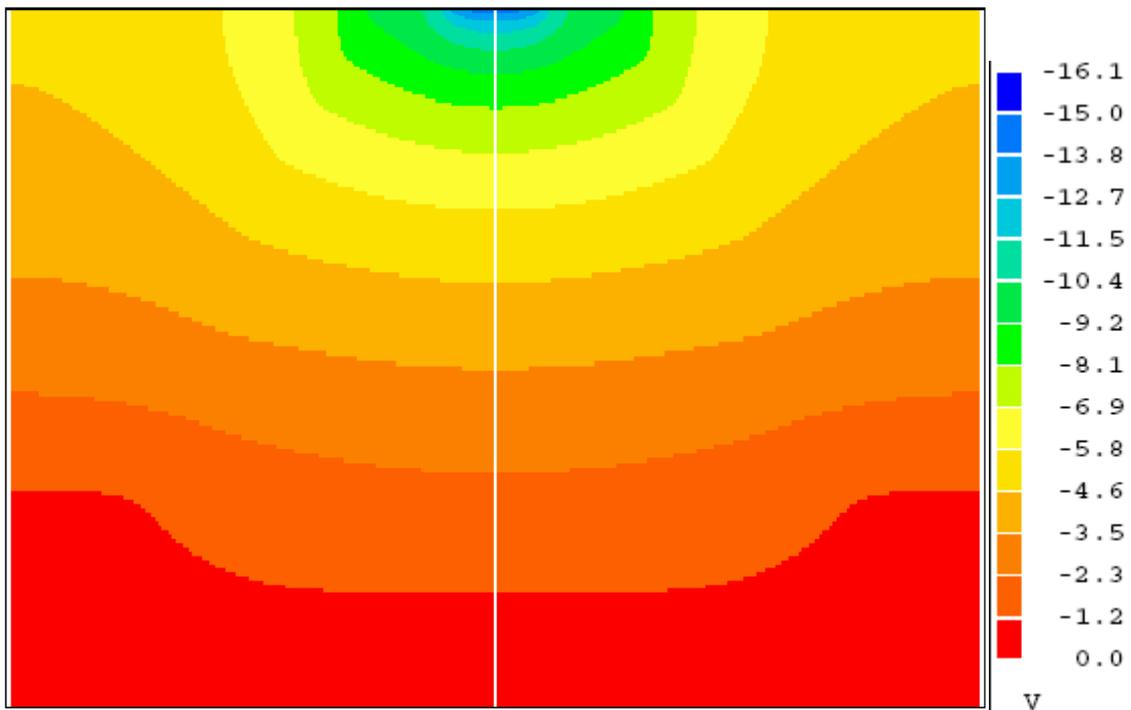


Fig. 42.- Contornos de potencial eléctrico en el arco para el caso Ar,  $L=1.5\text{cm}$  y  $I=200\text{A}$ , rango de potencial  $V_i = -16.1\text{V}$ ,  $V_f = 0.0\text{V}$ .

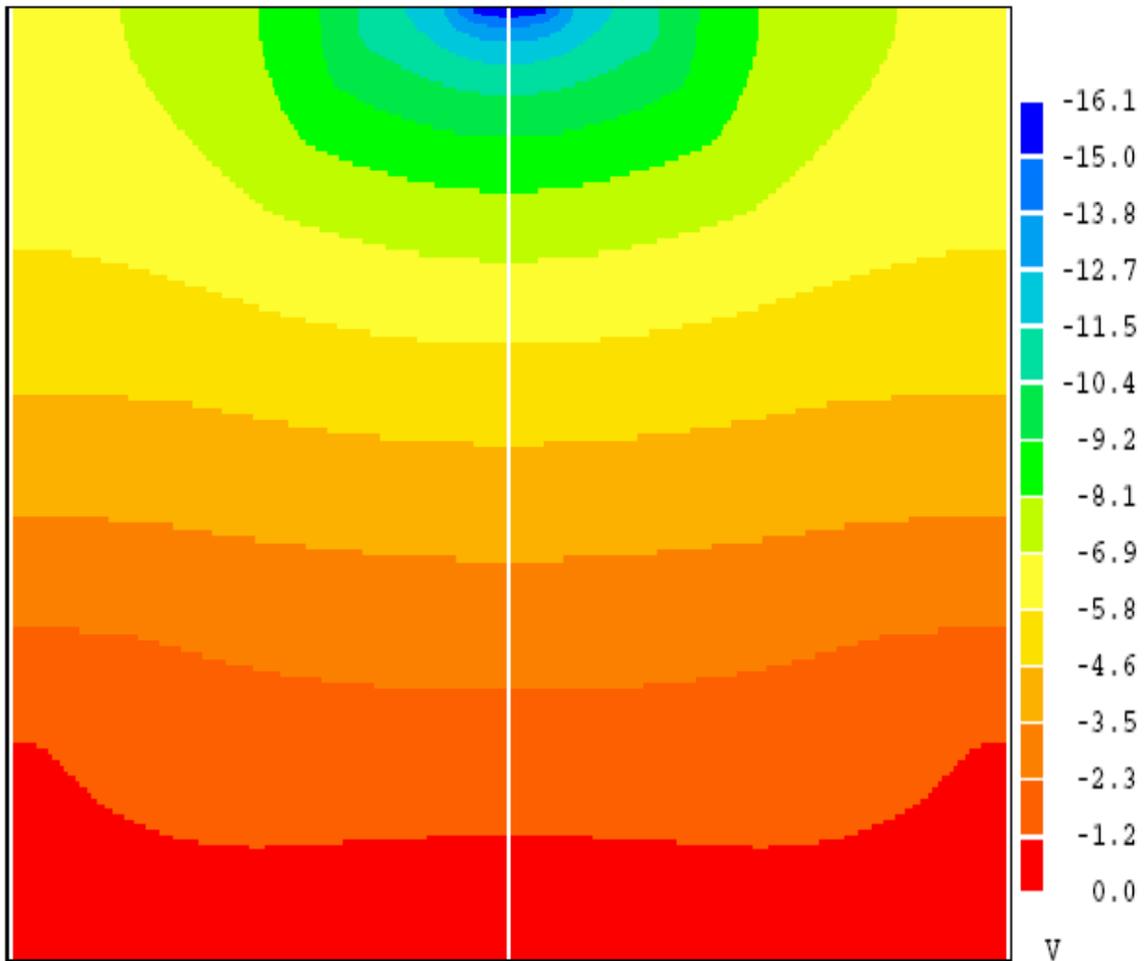


Fig. 43.- Contornos de potencial eléctrico en el arco para el caso Ar,  $L=1.5\text{cm}$  y  $I=200\text{A}$ , rango de potencial  $V_i = -16.1\text{V}$ ,  $V_f = 0.0\text{V}$ .

#### 1.2.4. Fluxes de calor en el ánodo $Q$ .

En las Figuras 44 a 47 se presentan los perfiles de los fluxes de calor totales y por cada mecanismos de transferencia de calor (convectivo, radiante, efecto thompson y función trabajo), para soldaduras con argón manteniendo la corriente de arco constante en 200A y variando la longitud de arco desde 0.5cm (Fig. 44), 1.0cm (Fig. 45), 1.5cm (Fig. 46), y 2.0cm (Fig. 47).

En la Figura 48 se presentan los fluxes totales de calor para casos de soldadura con arco y gas argón, manteniendo la corriente de arco constante en 200A y variando la longitud de arco desde 0.5, 1.0, 1.5, y 2.0cm.

Argón L=0.005m I=200A

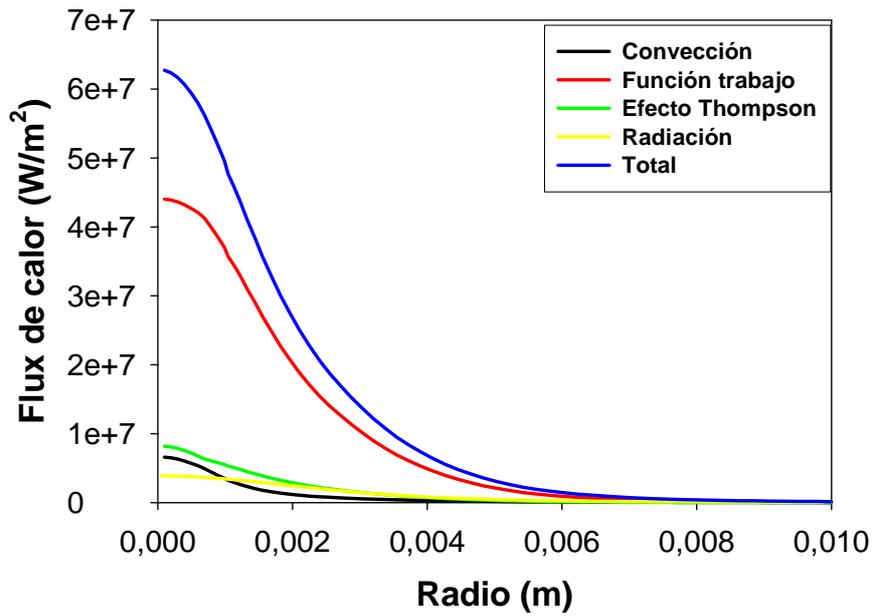


Fig. 44.- Fluxes de calor en el ánodo para el caso Ar, L=0.5cm y I=200 A.  
Argon L=0.01m I=200A

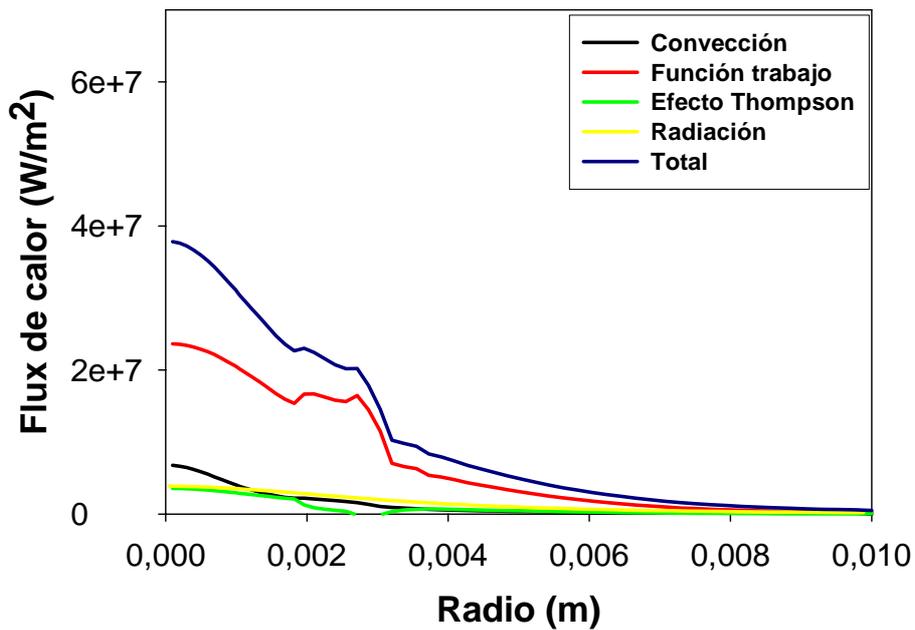


Fig. 45.- Fluxes de calor en el ánodo para el caso Ar, L=1.0cm y I=200 A.

Argón L=0.015m I=200A

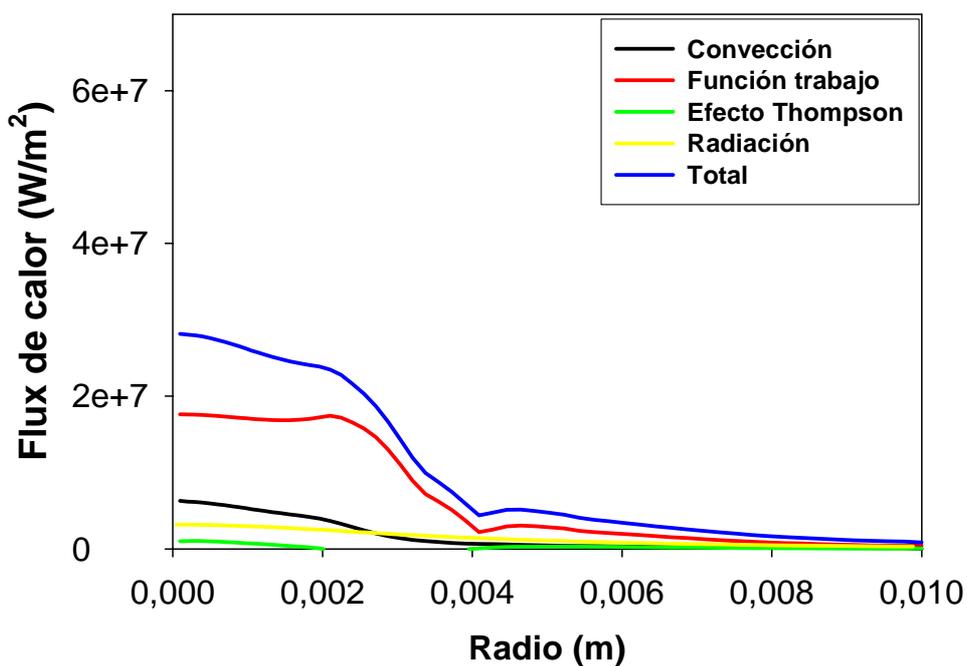


Fig. 46.- Fluxes de calor en el ánodo para el caso Ar, L=1.5cm y I=200 A.

Argon L=0.02m I=200A

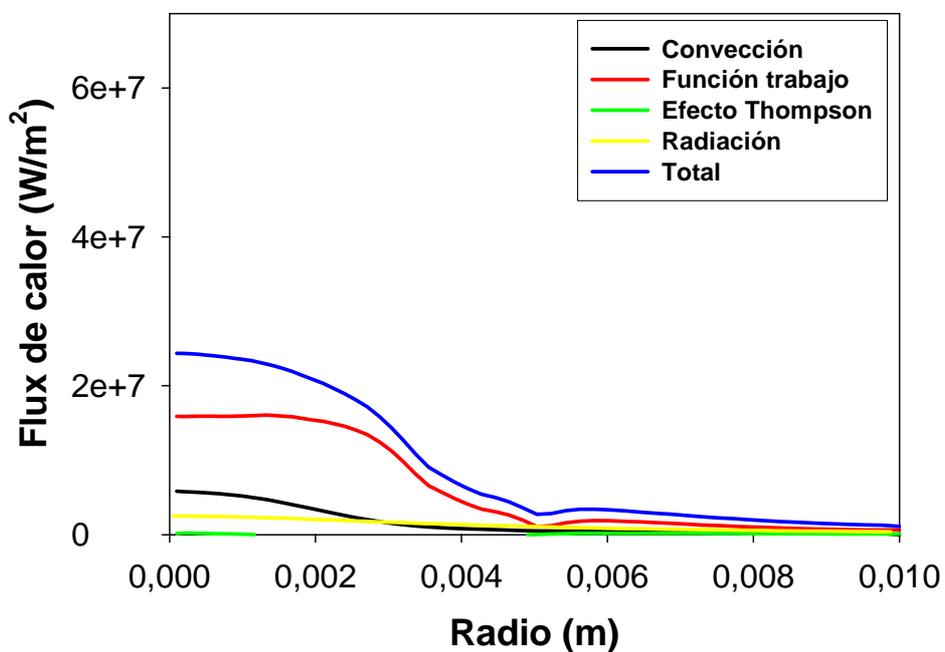


Fig. 47.- Fluxes de calor en el ánodo para el caso Ar, L=2.0cm y I=200 A.

Argón Flux total I=200A

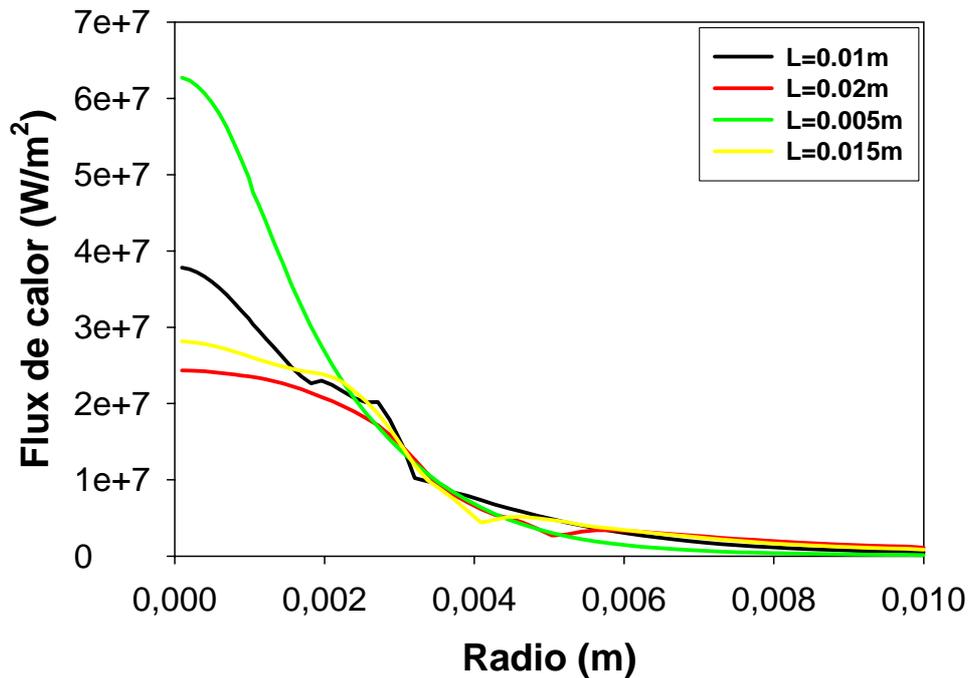


Fig. 48.- Fluxes de calor en el ánodo para arcos con Ar, manteniendo la corriente constante en I=200A y variando la longitud del arco de 0.5, 1.0, 1.5, y 2.5cm.

### 1.3. Efecto de la intensidad de corriente, caso Nitrógeno (N<sub>2</sub>).

A continuación se presentarán vectores de velocidad del jet, fluxes de calor en el ánodo o pieza de trabajo, contornos de temperatura y de potencial eléctrico para soldadura con arco usando nitrógeno como gas de cobertura. Se estudia el efecto de la corriente del arco con soldaduras de 100, 150, 200 y 250 A, y manteniendo la misma longitud de arco de 1cm.

#### 1.3.1. Patrones de flujo del jet

En las Figuras 49 a 52 se presentan los patrones de flujo a través de vectores de velocidad para soldaduras con nitrógeno manteniendo la longitud de arco constante en 1cm y variando la corriente de arco desde 100A (Fig. 49), 150A (Fig. 50), 200A (Fig. 51), y 250A (Fig. 52).

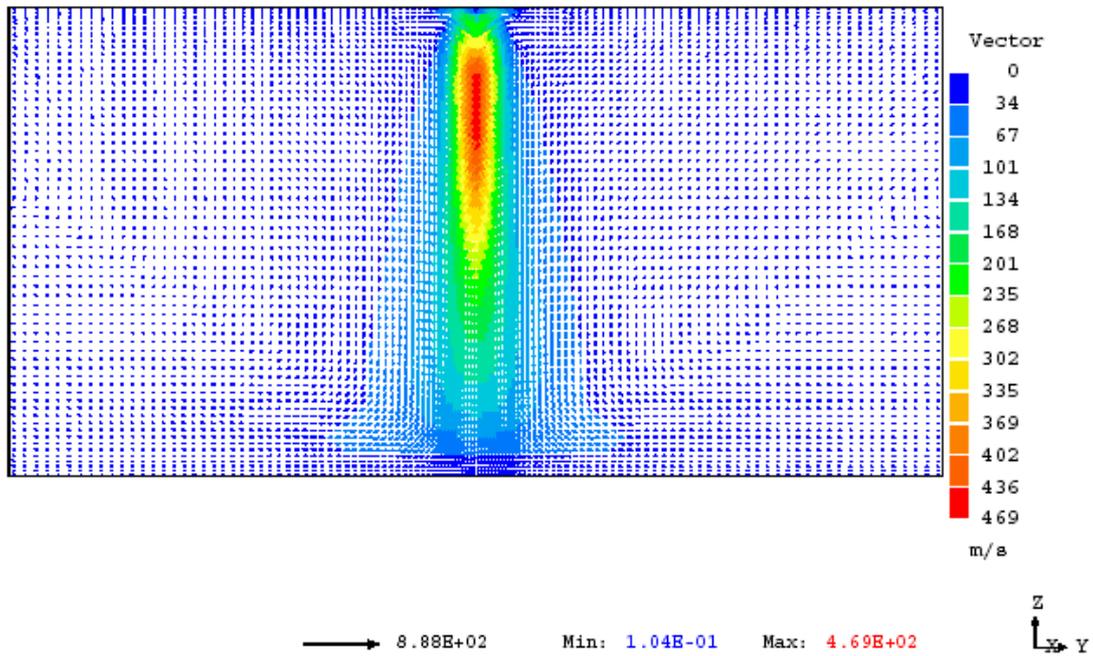


Fig. 49.- Vectores de velocidad en el arco para el caso  $N_2$ ,  $L=1\text{cm}$  y  $I=100\text{A}$ , vector de referencia =  $8.88\text{E}+02$ , velocidad máxima en el jet  $469\text{ m/s}$ .

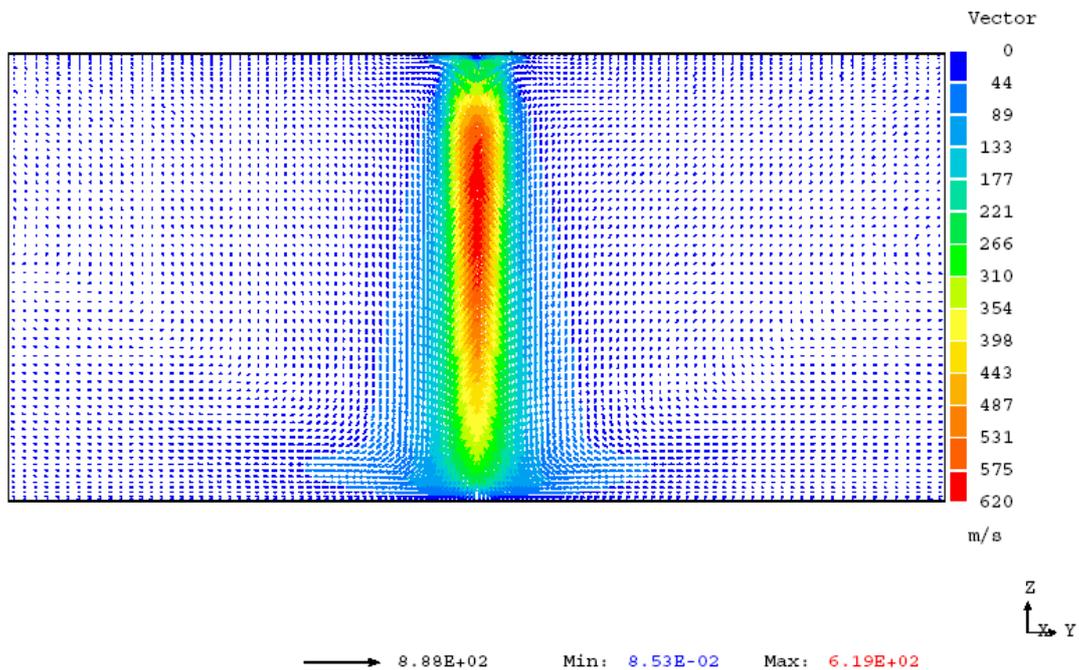


Fig. 50.- Vectores de velocidad en el plasma para el caso  $N_2$ ,  $L=1\text{cm}$  y  $I=150\text{A}$ , vector de referencia =  $8.88\text{E}+02$ , velocidad máxima en el jet  $620\text{ m/s}$ .

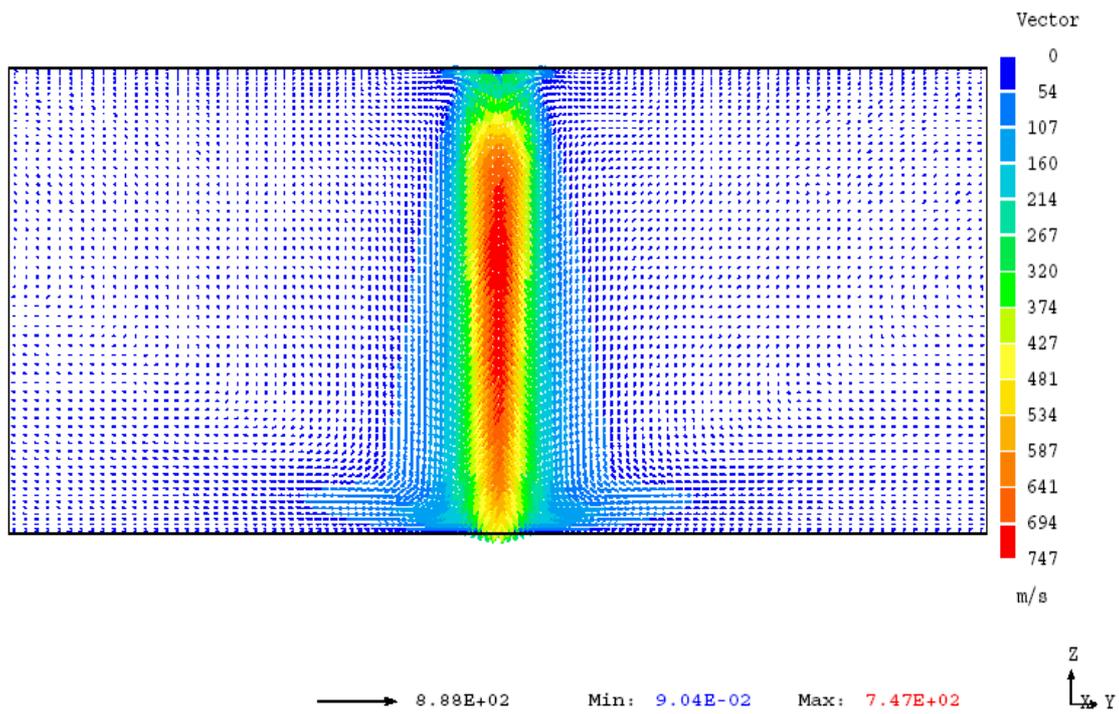


Fig. 51.- Vectores de velocidad en el plasma para el caso  $N_2$ ,  $L=1\text{cm}$  y  $I=200\text{A}$ , vector de referencia =  $8.88\text{E}+02$ , velocidad máxima en el jet  $747\text{ m/s}$ .

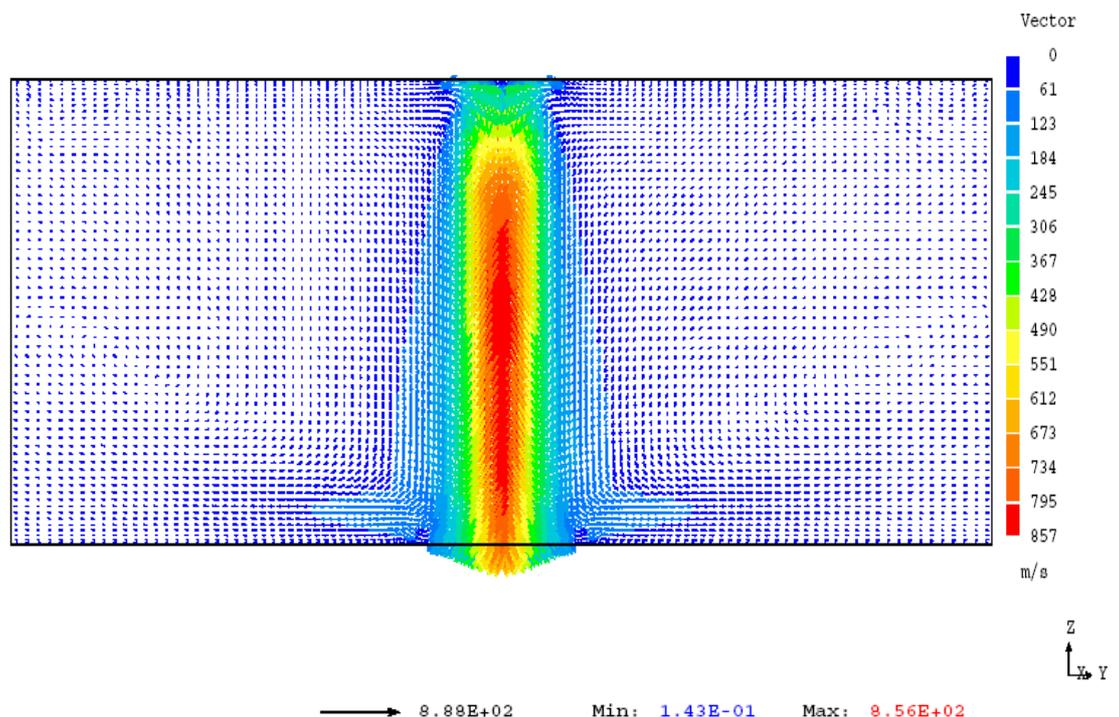


Fig. 52.- Vectores de velocidad máxima en el plasma para el caso  $N_2$ ,  $L=1\text{cm}$  y  $I=250\text{A}$ , vector de referencia =  $8.88\text{E}+02$ , velocidad máxima en el jet  $857\text{ m/s}$ .

### 1.3.2. Contornos de temperaturas en el arco

En las Figuras 53 a 56 se presentan los contornos de temperatura para soldaduras con nitrógeno manteniendo la longitud de arco constante en 1cm y variando la corriente de arco desde 100A (Fig. 53), 150A (Fig. 54), 200A (Fig. 55), y 250A (Fig. 56).

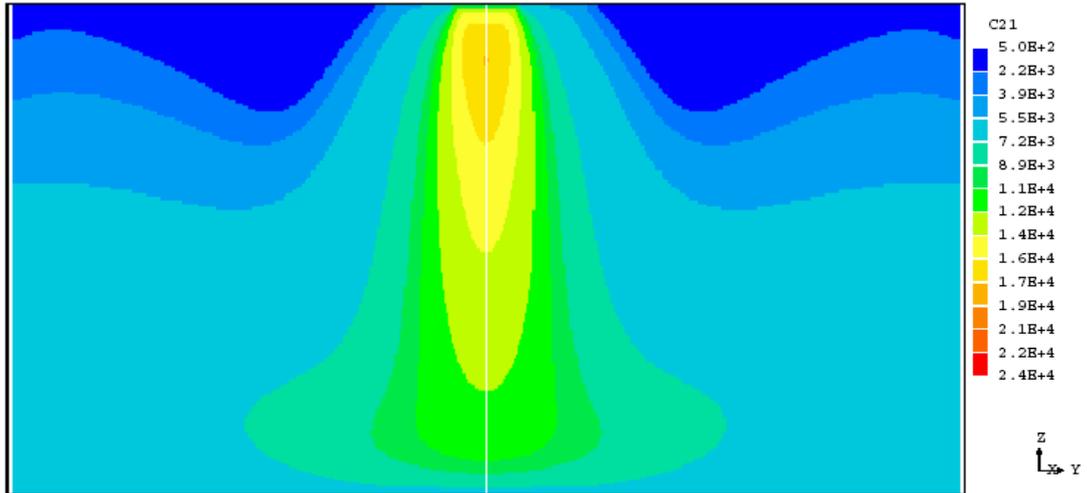


Fig. 53.- Contornos de temperatura en el arco para el caso  $N_2$ ,  $L=1\text{cm}$  y  $I=100\text{A}$ , rango de temperaturas  $T_i = 500\text{ K}$ ,  $T_f = 24\ 000\text{ K}$ .

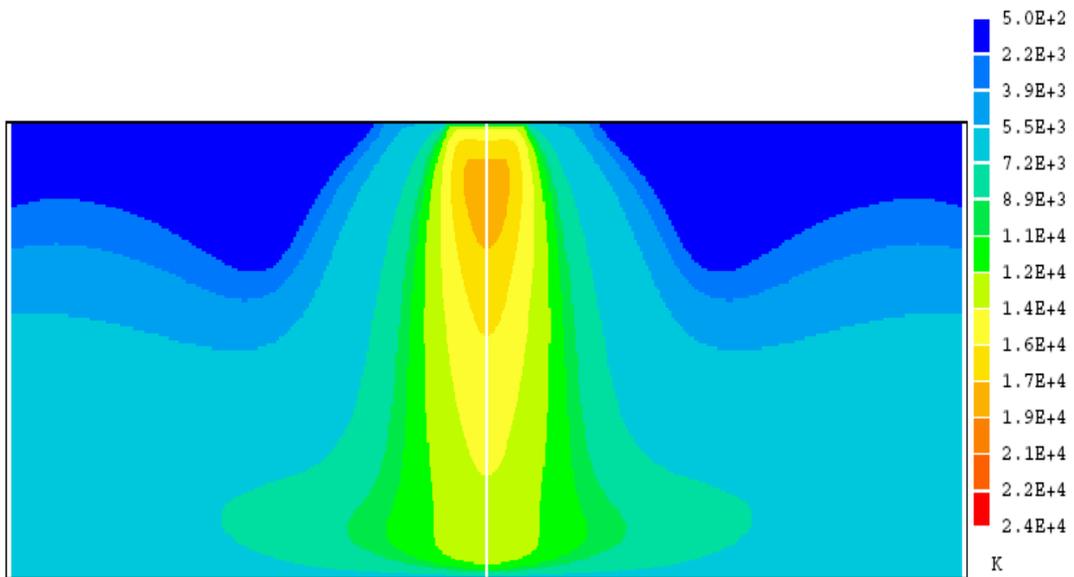


Fig. 54.- Contornos de temperatura en el arco para el caso  $N_2$ ,  $L=1\text{cm}$  y  $I=150\text{A}$ , rango de temperaturas  $T_i = 500\text{ K}$ ,  $T_f = 24000\text{ K}$ .

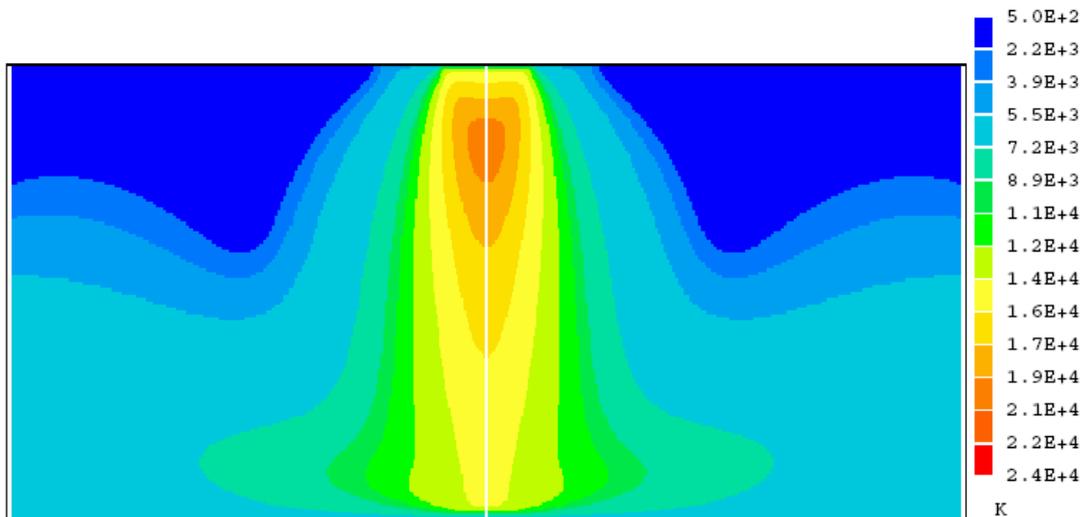


Fig. 55.- Contornos de temperatura en el arco para el caso  $N_2$ ,  $L=1\text{cm}$  y  $I=200\text{A}$ , rango de temperaturas  $T_i = 500\text{ K}$ ,  $T_f = 24000\text{ K}$ .

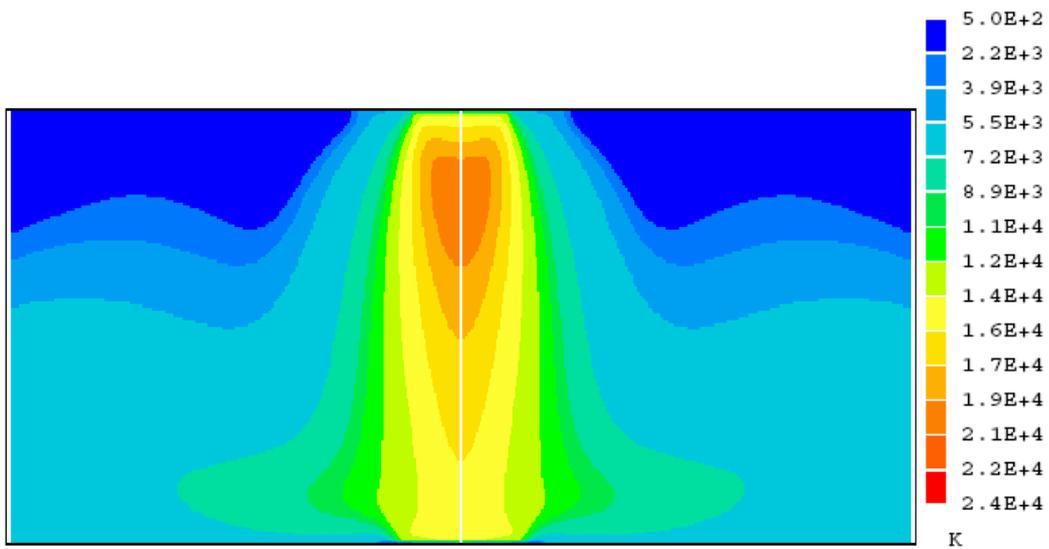


Fig. 56.- Contornos de temperatura en el arco para el caso  $N_2$ ,  $L=1\text{cm}$  y  $I=250\text{A}$ , rango de temperaturas  $T_i = 500\text{ K}$ ,  $T_f = 24000\text{ K}$ .

### 1.3.3. Contornos de potencial eléctrico en el arco

En las Figuras 57 a 60 se presentan los contornos de potencial eléctrico para soldaduras con nitrógeno manteniendo la longitud de arco constante en 1cm y variando la corriente de arco desde 100A (Fig. 57), 150A (Fig. 58), 200A (Fig. 59), y 250A (Fig. 60).

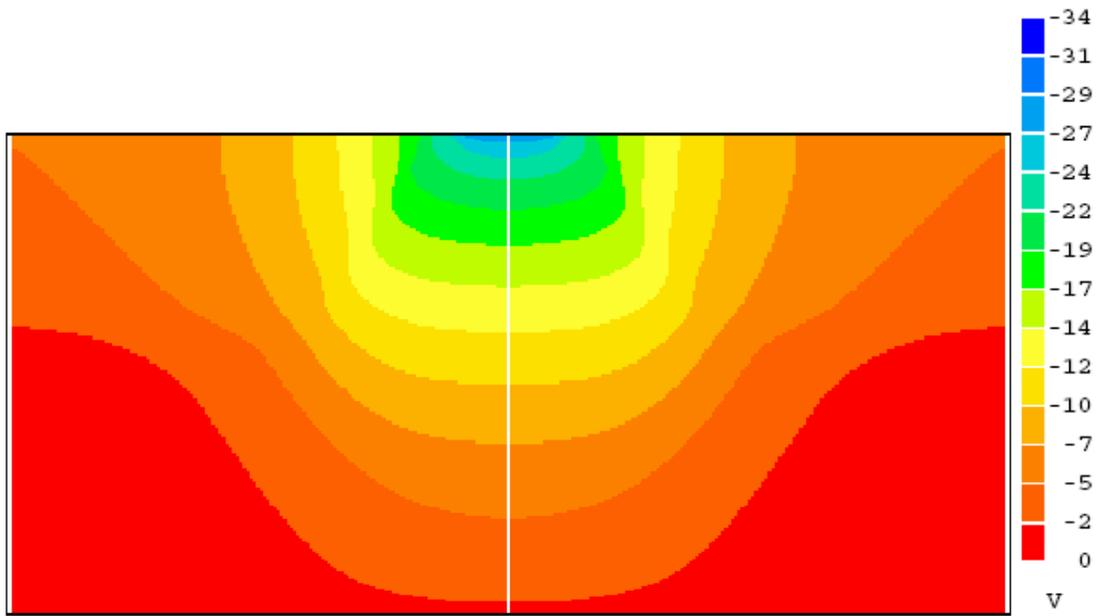


Fig. 57.- Contornos de potencial eléctrico en el arco para el caso N<sub>2</sub>, L= 1.0cm y I=100A, rango de potencial  $V_i = -34V$ ,  $V_f = 0.0 V$ .

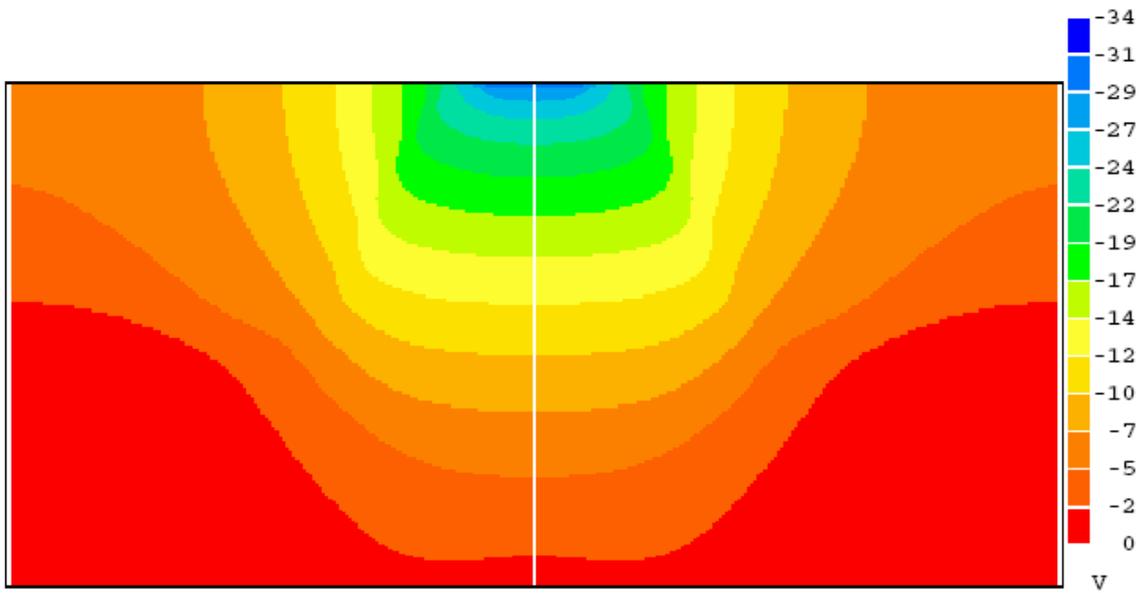


Fig. 58.- Contornos de potencial eléctrico en el arco para el caso N<sub>2</sub>, L=1.0cm y I=150A, rango de potencial  $V_i = -34V$ ,  $V_f = 0.0 V$ .

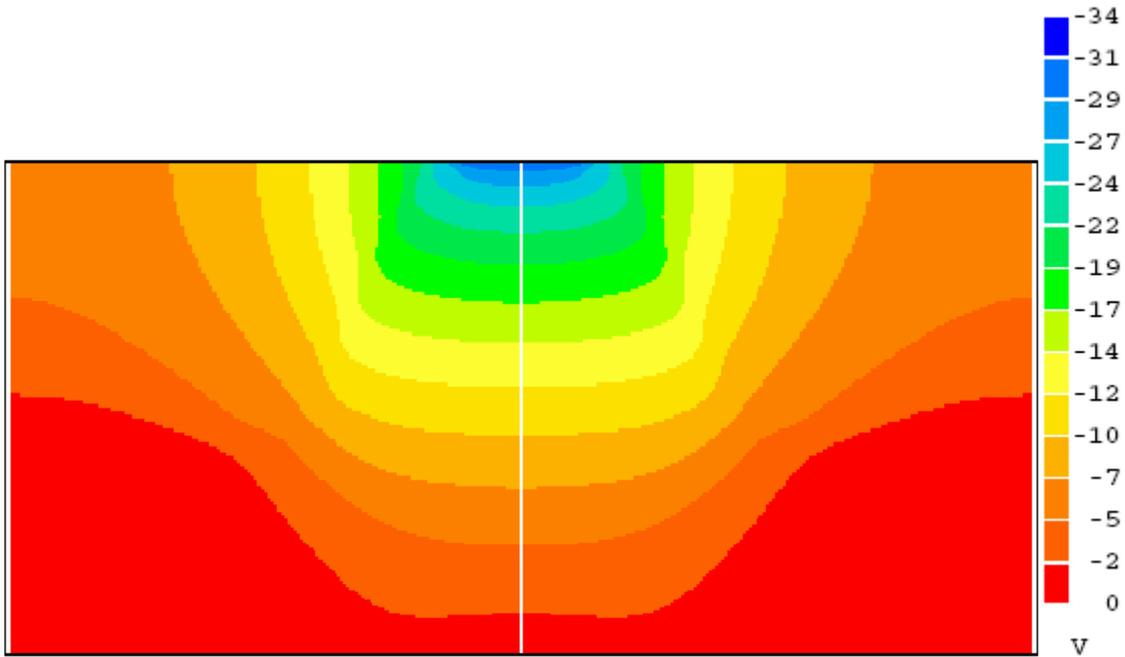


Fig. 59.- Contornos de potencial eléctrico en el arco para el caso N<sub>2</sub>, L=1.0cm y I=200A, rango de potencial  $V_i = -34V$ ,  $V_f = 0.0 V$ .

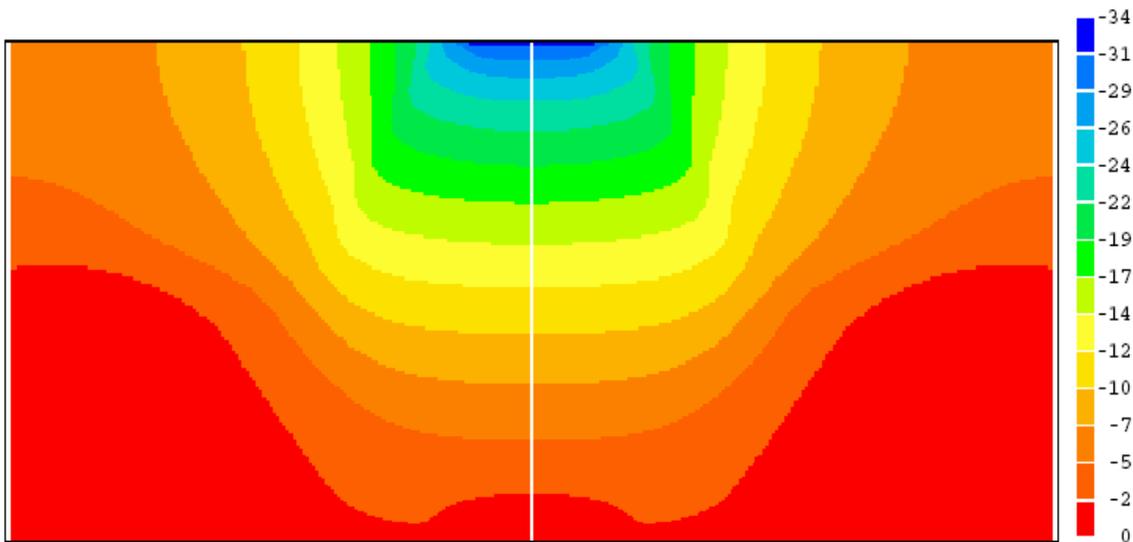


Fig. 60.- Contorno de potencial eléctrico en el arco para el caso N<sub>2</sub>, L=1.0cm y I=250A, rango de potencial  $V_i = -34V$ ,  $V_f = 0.0 V$ .

#### 1.3.4. Gráficas de flujos de calor $Q$ .

En las Figuras 61 a 64 se presentan los perfiles de los fluxes de calor totales y por cada mecanismos de transferencia de calor (convectivo, radiante, efecto thompson y función trabajo), para soldaduras con nitrógeno manteniendo la longitud de arco constante en

1cm y variando la corriente de arco desde 100A (Fig. 61), 150A (Fig. 62), 200A (Fig. 63), y 250A (Fig. 64).

En la Figura 65 se presentan los fluxes totales de calor para casos de soldadura con arco y gas nitrógeno, manteniendo la longitud constante en 1cm y variando la corriente desde 100, 150, 200, 250 y 300A.

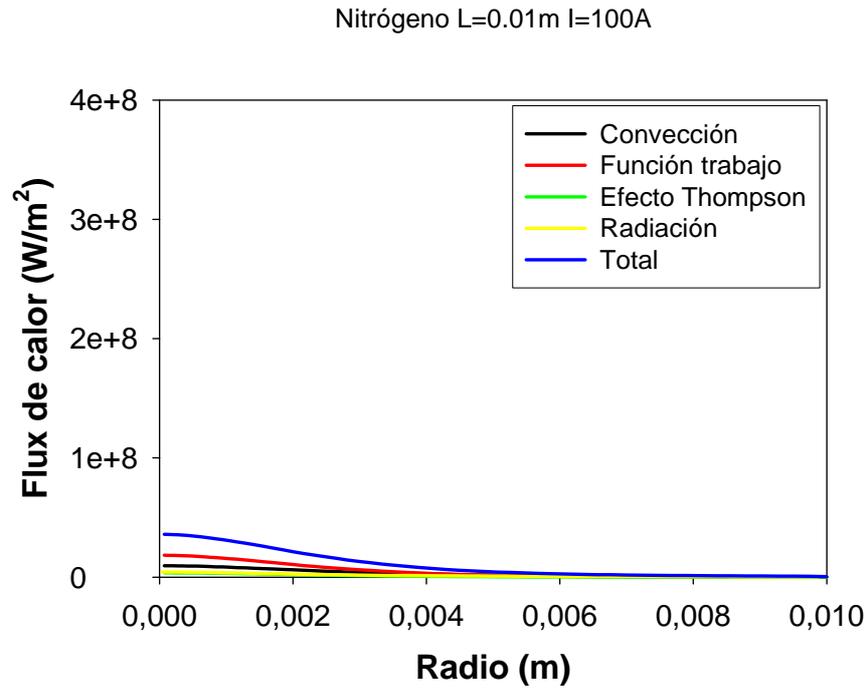


Fig. 61.- Fluxes de calor en el ánodo para el caso N<sub>2</sub>, L=1.0cm y I=100A.

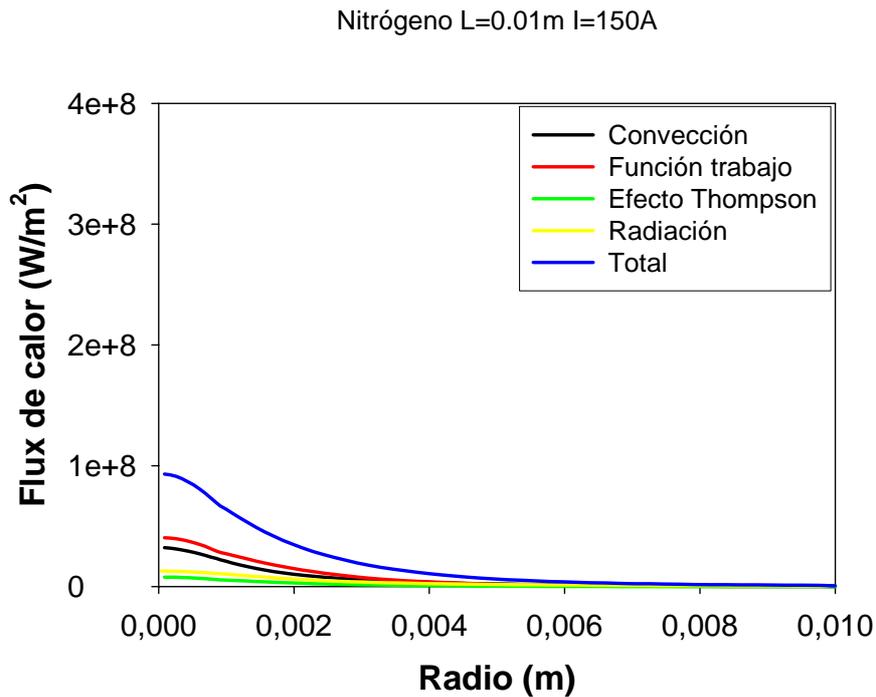


Fig. 62.- Fluxes de calor en el ánodo para el caso N<sub>2</sub>, L=1.0cm y I=150A.

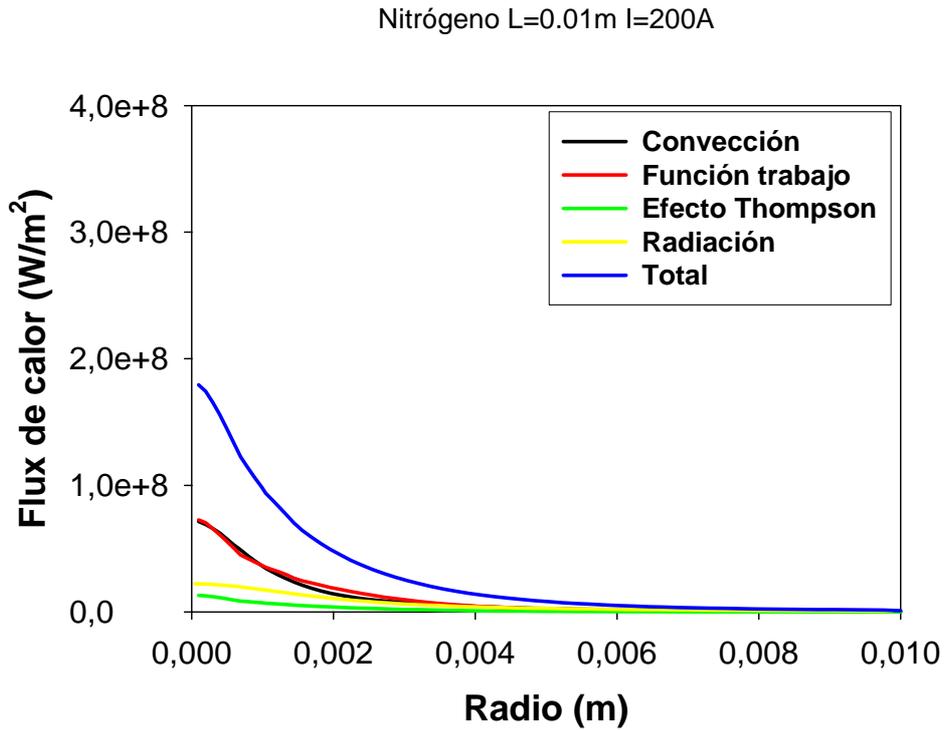


Fig. 63- Fluxes de calor en el ánodo para el caso N<sub>2</sub>, L=1.0cm y I=200A.

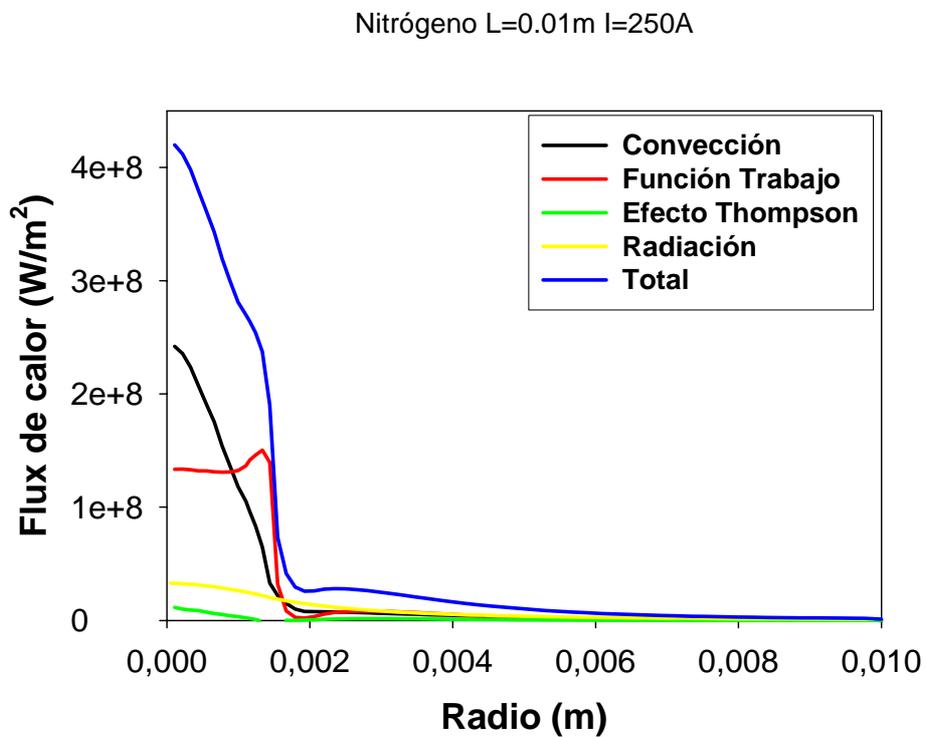


Fig. 64- Fluxes de calor en el ánodo para el caso N<sub>2</sub>, L=1.0cm y I=250A.

Nitrogeno L=0.01m

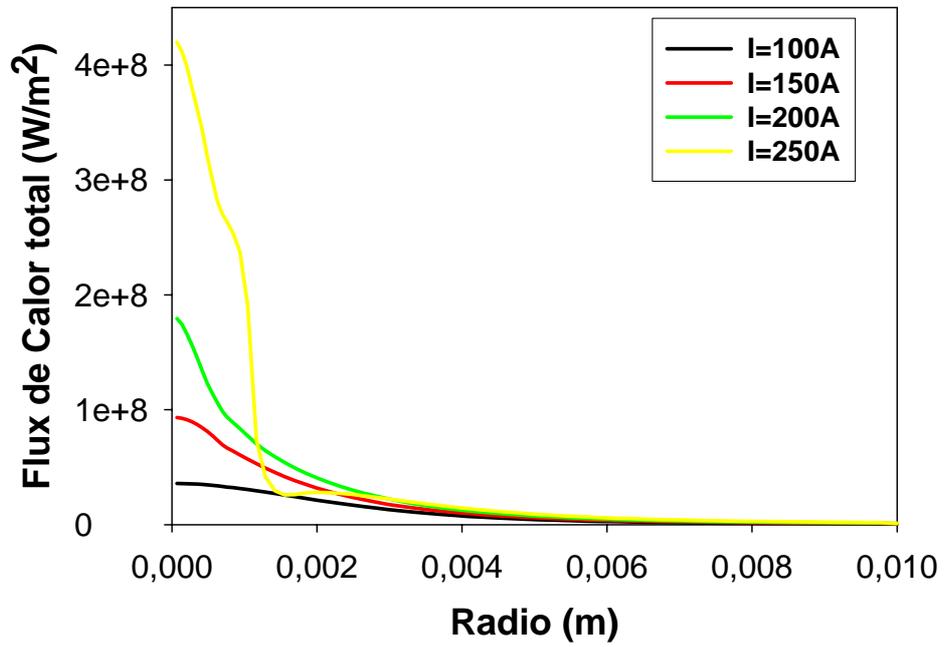


Fig. 65.- Fluxes de calor en el ánodo para arcos con  $\text{N}_2$ , manteniendo la longitud constante en  $L=1.0\text{cm}$  y variando la corriente del arco de 100, 150, 200, y 250.

## Capítulo 6

# VI. Análisis de Resultados

### 6.1. Discusión de Resultados

Los resultados muestran que la fenomenología presente en el arco está muy interrelacionada, es decir, los fenómenos electromagnéticos están fuertemente acoplados con los fenómenos de flujo de fluidos y de transferencia de calor. El paso de corriente eléctrica induce un campo magnético y el producto cruz de la densidad de corriente con el campo magnético genera fuerzas de cuerpo (fuerzas de Lorentz) que mueve al gas de cobertura hacia el ánodo formando un jet de plasma de muy alta velocidad. Por otra parte, el paso de corriente eléctrica requiere que el gas este ionizado, lo cual se logra al producirse colisiones entre los electrones que viajan desde el cátodo y que ioniza al gas formando un plasma que contiene iones, electrones y demás partículas cargadas. Este plasma no es excelente conductor y debido a eso, la resistencia ohmica en el arco es enorme y esto crea un gran calentamiento por efecto Joule, que explica las temperaturas del orden de 20000K que se presentan en el arco. El calor se transfiere desde el arco a la pieza a soldar por medio de varios mecanismos de transporte: a) convección debido al jet de plasma dirigido al ánodo, b) radiación desde el arco caliente, c) energía que entra a la soldadura por el paso de electrones desde el arco al metal (función trabajo y caída de voltaje del ánodo) y d) energía que llevan los electrones calientes (Efecto Thompson. Es decir, el aporte de calor desde el arco, que es por cierto parte del propósito de este, esta ligado a los fenómenos electrónicos (efecto Thompson y función trabajo) y a los fenómenos de flujo de fluidos (convección).

Por lo tanto, el arco de la soldadura es un proceso muy complejo en su fenomenología que aún requiere y recibe mucha atención a través de proyectos de investigación aplicados en todo el mundo.

*6.1.1. Efecto de la intensidad de corriente en los patrones de flujo, temperatura, potencial eléctrico y fluxes de calor en soldaduras con Argón (Ar)*

De las Figuras 15 a 18 se aprecian los vectores de velocidad para soldaduras con argón manteniendo la longitud de arco constante en 1cm y variando la corriente de arco desde 100A (Fig.15), 150A (Fig. 16), 200A (Fig. 17), y 250A (Fig. 18), y se ve con claridad que conforme aumenta la corriente del arco a longitud constante, se aumenta la velocidad en el jet. La razón de esta observación es que se incrementan las fuerzas de Lorentz que son proporcionales a la densidad de corriente, es decir, a mayores corrientes de arco, mayores fuerzas de Lorentz y por ende mayor velocidad del jet (ver Tabla 2). Por otro lado el jet se comporta de manera típica, ya que conforme el fluido avanza desde el cátodo hacia el ánodo este se va expandiendo. Cuando el jet choca con la soldadura, se desliza de manera radial, pero el choque genera una presión sobre la soldadura, la cual dependerá de la magnitud de la velocidad con la que se impacta el jet. Esta presión puede deformar la alberca de la soldadura y si esta deformación es grande puede provocar diversos defectos en la unión soldada.

De las Figuras 19 a 22 se ven los contornos de temperatura para soldaduras con argón manteniendo la longitud de arco constante en 1cm y variando la corriente de arco desde 100A (Fig. 19), 150A (Fig. 20), 200A (Fig. 21), y 250A (Fig. 22), y es evidente que al aumentar la corriente las temperaturas de arco crecen (ver Tabla 2). La temperatura del

arco es principalmente dictada por la potencia del arco, la cual es igual al producto de la resistencia por el cuadrado de la corriente. La resistencia está dada por la longitud del arco y el tipo de gas, pero en estos casos tanto el gas como la longitud permanecieron constantes, por lo que la potencia se incrementó con el cuadrado de la corriente. Es decir, para un arco con la misma longitud aumentar la corriente implica tener un arco mucho más caliente. Por otro lado, la isoterma de los 10,000K representa la zona del arco que emite luz y se cree que es arriba de esta temperatura que el plasma conduce la corriente eléctrica, por lo que la forma del arco visible es de una campana y esta se hace más ancha conforme aumenta la corriente, es decir, se expande la zona de conducción de carga eléctrica. La forma del arco se puede explicar por la presencia del jet de plasma que se va expandiendo y que al chocar con el ánodo lo esparce de manera radial, generando la característica campana del arco.

De las Figuras 23 a 26 donde se presentan los contornos de voltaje para soldaduras con argón manteniendo la longitud de arco constante en 1cm y variando la corriente de arco desde 100A (Fig. 23), 150A (Fig. 24), 200A (Fig. 25), y 250A (Fig. 26), la tendencia indica que al aumentar la corriente aumenta el voltaje en la soldadura (ver Tabla 2). Dicha tendencia es lógica ya que pasar mayor corriente con la misma resistencia se requiere obviamente mayor diferencia de potencial eléctrico. La zona de conducción está definida por las isolíneas horizontales de potencial, que cerca del cátodo son cortas pero cerca del ánodo se hace largas indicando efectivamente que la zona de conducción de carga eléctrica se va expandiendo.

En las Figuras 27 a 30 se presentan los perfiles radiales de los fluxes de calor totales y por cada mecanismos de transferencia de calor (convectivo, radiante, efecto thompson y

función trabajo), para soldaduras con argón manteniendo la longitud de arco constante en 1cm y variando la corriente de arco desde 100A (Fig. 27), 150A (Fig. 28), 200A (Fig. 29), y 250A (Fig. 30). Se observa que de manera lógica, al aumentar la corriente aumenta la potencia eléctrica del arco y mayores son los flujos de calor que se suministran a la pieza a soldar (ánodo). Se debe destacar que el mecanismo dominante de transferencia de calor son los electrónicos y en segundo plano se encuentran la convección y la radiación. La radiación parece dominar a bajas corrientes pero conforme aumenta la corriente y el jet fluye a mayor velocidad, la convección empieza a predominar como mecanismo de transferencia de calor. Es también lógico afirmar que mientras más caliente este el arco (a mayor corriente) mayor radiación va a existir y que al aumentar la corriente mayor calor por convección se transfiere ya que el jet de plasma es más intenso, y finalmente que al aumentar la cantidad de carga mayor será la energía aportada por los electrones.

En la Figura 31 se presentan los fluxes totales de calor para casos de soldadura con arco y gas argón, manteniendo la longitud constante en 1cm y variando la corriente desde 100, 150, 200, 250 y 300A, donde se ratifica que al aumentar la corriente más calor se aporta a la pieza soldada (manteniendo el mismo gas y longitud de arco). Cabe destacar que la variable de proceso que se controla en la soldadura es el voltaje y no la corriente, sin embargo, ya se ha señalado que al aumentar una, aumenta la otra de manera casi lineal, por lo que el análisis hecho es válido si en lugar de corriente se pone voltaje de arco como variable de proceso.

En la Tabla 2, se ven los valores de voltaje, velocidad máxima del plasma y de temperatura máxima del plasma como función de la corriente del arco manteniendo la misma longitud de 1cm y en argón.

Tabla 2.- Variación de las características del arco con la corriente de arco con Ar

Corriente de arco (I)	Velocidad máxima del arco $V_{max}$ (m/s)	Temperatura máxima del arco $T_{max}$ (K)	Voltaje del arco (V)
100	125	17600	10.2
150	200	19000	11.3
200	267	21000	12.4
250	330	22500	13.3

*6.1.2. Efecto de la longitud del arco sobre los patrones de flujo, temperatura, potencial eléctrico y fluxes de calor en soldaduras con Argón (Ar)*

El jet de plasma formado en el arco proviene de las Fuerzas de Lorentz que predominan cerca del cátodo y por ende la fuerza del jet solo depende de la corriente del arco. Entonces en los casos de las Figuras 32 a 35 donde la corriente se mantuvo y solo varió la longitud del arco, la potencia del jet es la misma y eso queda en evidencia al ver que la velocidad máxima en cada uno de estos jets es prácticamente la misma. Donde si cambia el patrón de flujo es cerca del ánodo. Para arcos cortos como el de  $L=0.5\text{cm}$  (Figura 32) el jet choca con más fuerza sobre el ánodo ya que apenas se está desarrollando cuando encuentra a la pieza soldada, mientras que para arcos largos como el que tiene  $L=2\text{cm}$  (Figura 35) el jet se desarrolla, se expande y pierde fuerza antes de chocar con el ánodo, por lo que esta colisión es débil. Es decir, con arco cortos se puede correr el peligro de generar una enorme depresión en la alberca de soldadura y crear numerosos defectos de soldadura mientras que para arco largos esto no sucederá.

Las temperaturas máximas encontradas en los arcos manteniendo la misma corriente pero incrementando la longitud son similares ya que nuevamente la zona caliente cerca del cátodo depende en gran medida de la corriente del arco que genera el efecto Joule que calienta al arco, tal y como se aprecia en la Tabla 3 y en los contornos de temperaturas de las 36 a 39. Sin embargo, la forma de la campana se modifica mucho al variar la longitud del arco, siendo corta y ancha para un arco corto ( $L=0.5\text{cm}$  de la

Figura 36), mientras que los arcos largos presentan una campana larga y delgada (L=2cm de la Figura 39)

Los voltajes de los arcos se incrementan al aumentar la longitud de los arcos manteniendo la corriente constante como se aprecian en los contornos de voltaje de las Figuras 40 a 43 y en la Tabla 3. Este hecho se explica totalmente al revisar la ley de ohm ( $\text{Voltaje} = \text{Resistencia} * \text{Corriente}$ ), en la cual establece que para una corriente constante, el voltaje aumenta solo si aumenta la resistencia ohmica. Entonces, al aumentar la longitud del arco lo que está aumentando es la resistencia al paso de corriente, ya que la carga eléctrica recorre mayor distancia a través del plasma, el cual no es un conductor eléctrico tan eficiente. Otra observación que se desprende de analizar los contornos de voltaje de las figuras 39 a 43, es que al aumentar la longitud del arco sin variar la corriente la zona de conducción se expande.

En relación a los flujos de calor, se ve que al incrementar la longitud del arco disminuye el máximo en el flux de calor sobre el ánodo, pero la distribución se hace más ancha. Los mecanismos de transferencia de calor dominantes siguen siendo los electrónicos dejando en segundo plano a la convección y radiación (ver Figuras 44 a 47). Cuando se comparan los fluxes totales sobre el ánodo variando la longitud del arco y manteniendo la misma corriente (Figura 48), se aprecia que efectivamente al aumentar la longitud del arco el máximo en el flux de calor disminuye pero su distribución se hace más dispersa, lo que significa que se distribuye más uniformemente el calor en una mayor área de soldadura.

Tabla 3.- Variación de las características del arco con la longitud de arco con Ar

Longitud de arco, L (cm)	Velocidad máxima del arco $V_{\max}$ (m/s)	Temperatura máxima del arco $T_{\max}$ (K)	Voltaje del arco (V)
0.5	268	21000	9.7
1.0	267	21000	12.4
1.5	268	21000	14.4
2.0	269	21000	16.1

6.1.3. *Efecto de la intensidad de corriente en los patrones de flujo, temperatura, potencial eléctrico y fluxes de calor en soldaduras con Nitrógeno ( $N_2$ )*

Esencialmente todas las observaciones hechas para analizar las soldaduras con Ar en la sección 6.1.1 son válidas en el caso del nitrógeno, es decir, al aumentar la corriente manteniendo la longitud constante, se incrementa la velocidad del jet de plasma (Figuras 49 a 52), se incrementa la temperatura del plasma (Figuras 53 a 56), se incrementa el voltaje (Figuras 57 a 60) y se incrementan los fluxes de calor al ánodo (Figuras 61 a 65). La Tabla 4 presenta las características del plasma de nitrógeno variando la corriente del arco.

Tabla 4.- Variación de las características del arco con la corriente de arco con  $N_2$

Corriente de arco (I)	Velocidad máxima del arco $V_{\max}$ (m/s)	Temperatura máxima del arco $T_{\max}$ (K)	Voltaje del arco (V)
100	469	17000	27.5
150	620	18500	29.0
200	747	19500	31.5
250	857	21000	34.0

6.1.4 *Comparación entre los arcos de argón y de nitrógeno (manteniendo I y L constantes)*

Cabe señalar que aunque las soldaduras con N son muy poco referidas en la literatura y en la práctica se prefiere al Ar, He y otros gases. El propósito de este cálculo es ver el efecto potencial que la atmósfera del arco puede provocar en la soldadura.

Para analizar el efecto de la atmósfera que cubre al gas se comparan las características de los arcos de Ar y N<sub>2</sub> mostradas en la Tabla 5 en donde la longitud de arco se mantiene en 1cm y se varían las corrientes de 100, 150, 200 y 250A.

Tabla 5.- Variación de las características del arco con la atmósfera (Ar azul y N<sub>2</sub> rojo)

Corriente de arco (I)	Velocidad máxima del arco V <sub>max</sub> (m/s)	Temperatura máxima del arco T <sub>max</sub> (K)	Voltaje del arco (V)
100 Ar	125	17600	10.2
100 N	469	17000	27.5
150 Ar	200	19000	11.3
150 N	620	18500	29.0
200 Ar	267	21000	12.4
200 N	747	19500	31.5
250 Ar	330	23000	13.3
250 N	857	21000	34.0

De la Tabla 5 se ve que el arco de N genera jets más intensos y mayores voltajes que el de Ar, pero al mismo tiempo el arco de N está más frío que el de Ar para las mismas condiciones de longitud y de corriente. Lo anterior se explica si se mira a las propiedades físicas de ambos gases (Figuras 6 y 9). A cualquier temperatura el Ar presenta mayor conductividad eléctrica que el N, lo cual explica porque para mismas condiciones de corriente y longitud de arco el arco de N siempre presenta mayores caídas de potencial. Esto debería calentar más el arco de N<sub>2</sub> porque posee más potencia (Potencia = voltaje \* corriente), sin embargo, la explicación de que se encuentra más frío el arco de N que el de Ar es debido a que el Cp de N es mayor que el de Ar con lo cual aunque el arco de N tiene más energía (entalpía) que el de Ar para mismas I y L este primero está a menor temperatura.

Finalmente, en la Figura 66 se comparan los fluxes totales de calor para arcos ardiendo en N y en Ar usando la misma longitud del arco y con distintas corrientes de 100, 150, 200 y 250A. Se ve con claridad que los fluxes de calor alcanzados con arcos de N (líneas con triángulos) son casi un orden de magnitud mayores que los alcanzados con Ar con las mismas condiciones (líneas con círculos). Este resultado es muy relevante

pues indica que para las mismas condiciones de corriente de arco y longitud de arco la soldadura de N es mucho más potente energéticamente que la de Ar. Por lo tanto, es evidente que el gas de cobertura juega un papel vital en las características de calentamiento y en los posibles defectos en la soldadura por lo que se requiere de un estudio más profundo a nivel experimental y científico.

### Comparación entre Ar y N

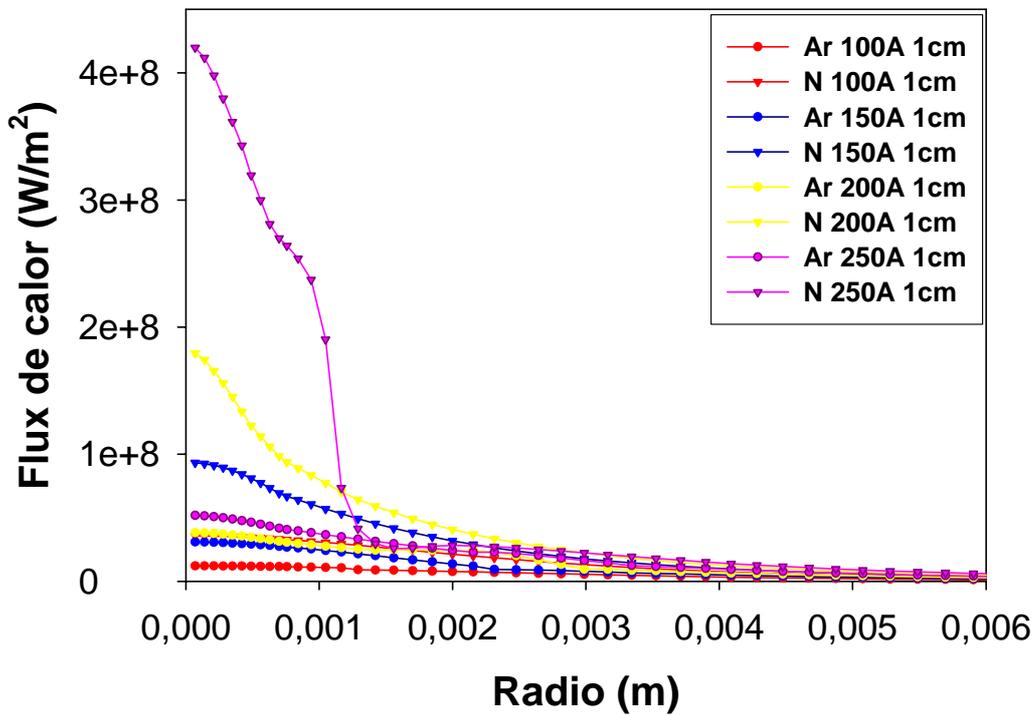


Fig. 66.- Comparación de flujos totales de calor entre soldaduras de N y Ar.

## Capítulo 7

### VII. Conclusiones

- Aumenta la velocidad del jet de plasma y por ende la transferencia de calor convectiva
- Aumenta la temperatura del plasma ya que el arco tiene más potencia y por ende también aumenta la radiación desde el arco al ánodo
- Aumenta el voltaje del arco
- Aumenta el flux de calor debido a la carga eléctrica transportada
- Aumenta el flux de calor sobre el ánodo

Se estudió el efecto de la longitud del arco sobre las principales características del arco y se encontró que un aumento en la longitud manteniendo la corriente y la atmósfera constantes provoca lo siguiente:

- Aumenta la resistencia y el voltaje del arco; y por lo tanto la potencia del arco también aumenta
- La velocidad del jet de plasma y por ende la transferencia de calor convectiva no se ven afectadas por el cambio en la longitud del arco. Aunque un arco corto choca con gran momentum sobre la pieza y puede crear defectos de soldadura
- Los fluxes de calor se distribuyen mejor a través del ánodo conforme se aumenta la longitud del arco

Finalmente, se estudió el efecto de la atmósfera del arco sobre las principales características del mismo y se encontró que un cambio en el gas de cobertura impacta fuertemente su comportamiento.

## BIBLIOGRAFÍA

### I. Libros

1. M. Cross; **Learning the art of Mathematical modelling**; John Wiley and Sons Inc. 1985.
2. D. R Gaskell; **An introduction to transport phenomena in materials engineering**. Mc Graw-Hill. 1992.
3. J. Szekely; **Fluid Flow phenomena in metals processing**; TN673 S93; Ed. D Facultad de Quimica; UNAM pag 458-457
4. M. I. Boulos, P. Fauchais, E. Pfender; **Termal Plasmas Fundamentals and Applications**, Vol 1, Plenum Press 1994.
5. Suhas V. Patankar; **Numerical Heat Transfer and Fluid Flow**, Taylor and Francis 1978.
6. Baker, **Finite Element Computational Fluid Mechanics**, Taylor Francis .
7. Pepper and Heinrich, **The Finite Element Method**, Basic concepts and Aplications.
8. ASM Handbook; **Welding Brazing and Soldering**; TT211 W45, V6.
9. Horwits; **Soldadura aplicaciones y práctica**; TS227.2; H67; pp. 109 (Soldadura con arco e tungsteno y gas).
10. I. Mrivnak; **Theory of weldability of metals** TS 227.2; H 7513.
11. AWS, American Welding Society, **Welding Handbook V. 1 8 ed.**; TS227; W454.
12. H. Maecker: **Z Phys.**, 1995, vol. 141, pp. 198-216.
13. D.A. Anderson; J.C. Tannehill and R.H. Pletcher. **Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer**; Series in Computational Methods in Mechanics and Thermal Sciences. Hemisphere Publishing Corporations. 1984.
14. W. M. Rosenhow and J.P. Hartnett: **Handbook of Heat Transfer**, McGraw-Hill, New York, NY, 1973, pp. 8-126.

## II. Artículos

15. J. Szekely; **The role of mathematical models in new process development** in productivity and technology in the metallurgical Industry M. Koch and J.C. Taylor (editors) T. M. S 1989. p 105-143; TN 605 I 59, F. Quimica, UNAM.
16. X.J.R. Avala; **Mathematical Modeling**; Encyclopedia of Physical Science and Technology Vol. 7. 1987. p 719-728.
17. P.F. Mendez, M.A. Ramírez, G. Trapaga, y T.W. Edgar; **Order-of-Magnitude-Scaling of the cathode Region in an Axisymmetric Transferred Electric Arc**; Transactions Jun 01 Vol. 32 B, psg 547-554.
18. Lowke John; **Prediction of Gas Tungsten Arc Welding Properties in Mixtures of Argon and Hydrogen**; IEEE Transactions on plasma science, Vol. 25, Oct 1997, p. 925-930.
19. K.C. Hsu, K. Etemadi, E. Pfender; **Study of the free-burning high-intensity argon arc**, American Institute of Physics, Heat Transfer División, D. of Mechanical Engineering, University of Minnesota 1983, p. 1293-1300.
20. S .Y. Lee, S. J. Na; **A Numerical Analysis of a Stationary Gas Tungsten Welding Arc Considering Various Electrode Angles**, Transporting phenomena from a gas tungsten arc to the base plate are simulated considering the geometric parameters, AWS Welding Research, Supplement of the welding journal 1996, p. 269s-279s.
21. Kim, W.H., H.G. Fan, and S.J. Na, **A mathematical model of gas tungsten arc welding considering the cathode and the free surface of the weld pool**.
22. Ushio, M., y Matsuda, F. 1982. **Mathematical modelling of heat transfer of welding arc (part 1)**. Trnas. JWM 11 (1): 7-15.
23. Marco A. Ramírez, Gerardo Trapaga, y John Mckellight. **A comparison between two different numerical formulations of welding arc simulation**, Institute of Physics Publishing, UK, 2006, pp. 275-296.
24. Tassell, W.V. and A. Pallone, *Similar Solutions of the Compressible Laminar Boundary Layer Equations*. Avco/RAD-TM, 1961. **22(61)**.
25. H. A. Dinulescu and E. Pfender. Jnl. Appl. Phys..1984, vol. 55 pp. 714-22.

26. R.T.C. Choo, J. Szekely, and R.C. Westhoff, **In the calculation of the free surface temperature of Gas-Tungsten-Arc Weld Pools from the first principles: Part I. Modeling the Welding Arc**, Metallurgical Transactions B, Department of Metallurgy and Material Science, MIT, Vol. 23b, June 1992, pp 357-369.