



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
QUÍMICA – METALURGIA

ANÁLISIS CUANTITATIVO DE LOS MECANISMOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR
DENTRO DE ARCOS ELÉCTRICOS DE SOLDADURA

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
ALBERTO VELÁZQUEZ SÁNCHEZ

TUTOR PRINCIPAL
MARCO AURELIO RAMÍREZ ARGAEZ, FACULTAD DE QUÍMICA

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD.MX. SEPTIEMBRE 2020



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. ASCANIO GASCA GABRIEL
Secretario: Dr. AMARO VILLEDA ADRIÁN MANUEL
1 er. Vocal: Dr. RAMÍREZ ARGAEZ MARCO AURELIO
2 do. Vocal: Dr. CAMPILLO ILLANES BERNARDO FABIÁN
3 er. Vocal: Dr. GONZÁLEZ RIVERA CARLOS

Lugar donde se realizó la tesis: LABORATORIO 203. EDIFICIO D. FACULTAD DE QUÍMICA.
UNAM. CDMX. MÉXICO

TUTOR DE TESIS:

Dr. MARCO AURELIO RAMIREZ ARGAEZ

FIRMA

Índice

1. Introducción	1
1.1. Soldadura	1
1.2. Soldadura por Arco Eléctrico	3
1.3. Soldadura por Arco Eléctrico GTAW	5
1.4. Plasma	8
1.5. Revisión Bibliográfica	11
1.6. Hipótesis	18
1.7. Objetivo General	18
1.8. Objetivos Particulares	18
2. Metodología de trabajo	19
2.1. Suposiciones	19
2.2. Ecuaciones Gobernantes	21
2.3. Condiciones de Frontera	26
2.4. Técnica de Solución	28
2.5. Solución	29
2.6. Propiedades de los Gases	31
3. Resultados y Discusión	34
4. Conclusiones	60
5. Bibliografía	62

Lista de figuras

1. Esquema de soldadura por arco eléctrico	5
2. Esquema de soldadura GTAW	6
3. Esquema de un Arco Eléctrico	11
4. Comparación de resultados teóricos en temperatura del plasma con resultados experimentales de Tanaka	13
5. Estructura del arco: capa catódica, columna del arco y capa anódica	15
6. Física de capa catódica. Capa y pre-capa	15
7. Dominio de cómputo en 2D y coordenadas cilíndricas	21
8. Malla utilizada para la región de la soldadura GTAW	24
9. Propiedades físicas de Argón y Helio	33
10. Resultados modelo numérico para Ar, $I=150$ A y $L=7$ mm	35
11. Perfiles radiales a $z=0.0006$ m, 0.002 m, 0.005 m y 0.006 m de un arco de Ar, $I=150$ A y $L=7$ mm	38
12. Perfiles radiales de temperatura y conductividad eléctrica sobrepuestos de un arco de Ar a $I=150$ A y $L=7$ mm	38
13. Mapas de predominancia para cada mecanismo de transferencia de calor dentro de la columna del arco	40
14. Mapa de predominancia para cada mecanismo de transferencia de calor, indicando por color que mecanismo tiene el valor más alto en cada celda	42
15. Mapa de predominancia de los mecanismos de transferencia de calor para tanto entradas como salidas de energía en un arco de Ar a $I=150$ A y $L=7$ mm. Escala logarítmica de colores	44
16. Efecto de la longitud del arco en la predominancia de los mecanismos de transferencia de calor en un arco de Ar a 150 A	46
17. Efecto de la longitud del arco en los valores máximos de los mecanismos de transferencia de calor en un arco de Ar a 150 A.	48
18. Efecto de la intensidad de corriente en los valores máximos de los mecanismos de transferencia de calor en un arco de Ar a 7 mm	50
19. Efecto de la intensidad de corriente en la predominancia de los mecanismos de transferencia de calor en un arco de Ar a 7 mm	51
20. Efecto del gas de cobertura en los valores máximos de los mecanismos de transferencia de calor en un arco a 7 mm y 150 A.	53
21. Efecto del gas de cobertura del arco en la predominancia de los mecanismos de transferencia de calor en un arco a $I=150$ A y $L=7$ mm	54
22. Propiedades en función de la temperatura de Ar y He	55
23. Mapa a 70% de predominancia de los mecanismos de transferencia de calor	56

24. Zonas de interés donde el mecanismo de transferencia de calor es fuertemente dominante tanto de entrada como de salida

57

Lista de Tablas

1. Condiciones de frontera	28
2. Máximos de Temperatura, Velocidad y Presión	36
3. Valores máximos de entrada y salida de energía por cada mecanismo de transferencia de calor en el arco de Ar, $I=150$ A y $L=7$ mm	41
4. Efecto de la longitud del arco en los valores máximos de entrada y salida de energía por cada mecanismo de transferencia de calor en un arco de Ar, $I=150$ A	47
5. Efecto de la intensidad de corriente en los valores máximos de entrada y salida de energía por cada mecanismo de transferencia de calor en un arco de Ar, $L=7$ mm	49
6. Efecto del gas de cobertura en los valores máximos de entrada y salida de energía por cada mecanismo de transferencia de calor en arcos de $I=150$ A y $L=7$ mm	52

1. Introducción

1.1 Soldadura

La soldadura es un proceso de unión de dos o más materiales, que pueden ser metales o termoplásticos con una completa continuidad. La unión de materiales se da de forma interatómica en los bordes de estos y se realiza por medio de calor, aplicación de presión o ambos. En la mayoría de los procesos de soldadura se utiliza el calor como medio para aumentar la cercanía de los átomos y lograr la unión interatómica, esto logrado por medio de la fusión del material base y/o de un material de aporte realizando el empalme de las piezas al solidificarse.

Los procesos de soldadura son multifacéticos y sus variaciones en términos del proceso son inmensas. Cada proceso de soldadura no es igualmente adecuado para cada metal, tipo de unión o aplicación. Es necesario reconocer de los requisitos esenciales que debe de cumplir cada soldadura para elegir el mejor proceso de soldadura.

Cualquier proceso de soldadura debe de cumplir estos 4 requisitos:

1. Un suministro de energía para crear una unión ya sea por fusión o presión.
2. Un mecanismo para remover contaminantes superficiales de la junta.
3. Evitar contaminación atmosférica o sus efectos.
4. Control de la metalurgia de la soldadura.

Demasiados procesos entran a esta definición por lo que se hace la siguiente clasificación [1]. Cuando la aplicación de presión es el mecanismo de unión principal incluye a la soldadura por resistencia, soldadura explosiva, unión por difusión, y soldadura por fricción.

- Soldadura por resistencia. Este método requiere del paso de una alta intensidad de corriente a través de dos piezas de metal

mientras que se presionan juntas. El calor generado por el paso de corriente en la intercara de ambas piezas de metal lleva a su punto de fusión en la zona de contacto solamente.

- Soldadura explosiva. Este método requiere una fuerza para deformar la interfaz de dos placas metálicas la cual es generada por una carga explosiva. La presión generada por la explosión deforma a la placa superior para formar una unión intermetálica con la placa fija.
- Unión por difusión. Se limpia y calientan las superficies a unir en una atmósfera inerte. Se aplica presión a la junta y ocurre una deformación plástica local la cual le sigue la difusión de los materiales en el que los huecos de ambas superficies son eliminados.
- Soldadura por fricción. En este método se genera una alta temperatura en la unión por el movimiento continuo del contacto de las superficies. Cuando las superficies se ablandan, se aplica una presión de forja.

En el caso en el que la presencia de altas temperaturas sea dominante en el sistema incluye a las soldaduras por arco, soldadura por haz de láser, soldadura por haz de electrones, y métodos híbridos.

- Soldadura por Arco Eléctrico. Este proceso consiste en la generación de un arco eléctrico de plasma usado como fuente de calor para derretir parcialmente los componentes metálicos a unir. El intenso calor del arco funde la pieza de trabajo a soldar generando una región de metal fundido referido como “Weld pool”, y al mismo tiempo funde la punta del electrodo la cual se une al metal líquido. Al término del proceso, la región fundida es referida como zona de fusión, y la región que permaneció sólida, pero con su microestructura alterada por la aplicación de calor es referida como la zona afectada por el calor (ZAC).

- Soldadura por haz de láser. Se utiliza un láser como fuente alternativa de calor para la soldadura por fusión, el cual alcanza una densidad de flujo de calor de $10^{12} \frac{W}{m^2}$. Este método es utilizado para hacer micro uniones de componentes electrónicos.
- Soldadura por haz de electrones. En este método se utiliza un haz de electrones acelerado por una alta diferencia de potencial, el cual sirve como fuente de calor para la soldadura. Este método debe ser usado en espacios al vacío para evitar la colisión de los electrones con moléculas de gas encontradas en el ambiente. La aplicación de este método se centra en soldar componentes aeroespaciales.

La soldadura por arco eléctrico es particularmente importante cuando la unión de metales debe tener propiedades mecánicas altas y va a ser sometida a condiciones de operación demandantes, de tal manera que no se comprometa la integridad de la unión soldada y por eso es motivo de extensos estudios científicos alrededor del mundo y es el motivo de estudio de este proyecto, centrándose el presente trabajo en la región del arco eléctrico. A continuación, se describe el proceso de soldadura con arco a detalle.

1.2 Soldadura por Arco Eléctrico

El término de soldadura por arco eléctrico aplica a un gran y diverso grupo de procesos de soldadura que utilizan un arco eléctrico como fuente de calor. La formación del arco eléctrico depende del paso de corriente eléctrica entre dos electrodos, uno en el metal base a unir (ánodo) y otro (cátodo) en el electrodo consumible en forma de alambre que también sirve como material de aporte a la soldadura, o no consumible (W), formando un plasma por medio de la ionización de un gas. De esta forma el arco alcanza temperaturas mayores a los 10,000°C.

Como el metal a altas temperaturas tiende a oxidarse, el uso de una atmósfera protectora es necesaria como medio de cobertura del arco y el metal fundido.

Existe una gran variedad de procedimientos de soldadura, donde la base de la fuente de calor es el arco eléctrico. Todos estos procedimientos se pueden agrupar en dos grupos, por arco descubierto y por arco encubierto.

La soldadura con arco utiliza electrodos revestidos, los cuales proporcionan mejores características y aspecto final al cordón de soldadura. El recubrimiento de los electrodos está constituido generalmente por óxidos minerales, carbonatos, silicatos o diversos compuestos orgánicos. Además, proporciona un efecto protector al material fundido, en forma de escoria fundida. Gracias al uso de recubrimientos en el electrodo se evita la formación de arcos secundarios durante la soldadura, facilita la ionización y la velocidad de enfriamiento disminuye.

El arco eléctrico que se establece en los procesos de soldadura supone una descarga eléctrica que se caracteriza por su elevada intensidad de corriente, bajo potencial eléctrico y gran aporte de calor. El calor provocado por el arco es intenso y localizado, lo que resulta ideal para el proceso de soldadura. En el circuito eléctrico formado por los electrodos a través del arco, la intensidad de corriente depende de la tensión y de la resistencia del circuito. La distancia entre electrodos varía la resistencia del circuito, siendo una de las mayores variables del proceso.

En la Figura 1 se muestra un esquema simplificado de la soldadura por arco eléctrico.

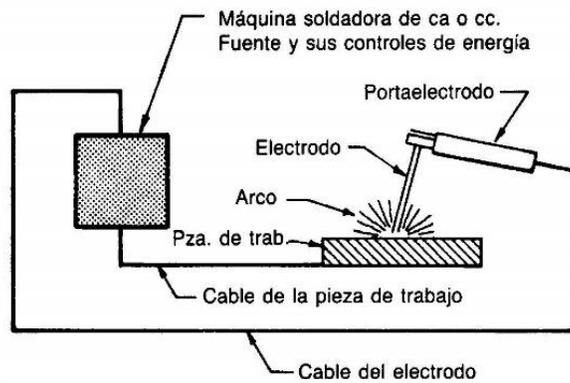


Figura 1. Esquema de soldadura por arco eléctrico

Algunos procesos de soldadura por arco eléctrico son: GTAW (Gas Tungsten Arc Welding) también conocido como soldadura TIG (Tungsten Inert Gas Welding), SMAW (Shielded Metal Arc Welding), SAW (Submerged Arc Welding), GMAW (Gas Metal Arc Welding), entre otras. Cada uno de estos procesos tiene sus diferentes parámetros de operación y aplicaciones. En este trabajo se centra en la soldadura TIG.

1.3 Soldadura por Arco Eléctrico GTAW

En el proceso de soldadura GTAW se realiza mediante el uso de un electrodo no consumible de tungsteno (cátodo) y la pieza de trabajo (ánodo). Gases inertes o mezclas de éstos, usualmente Ar y He, son soplados a través de una tobera situada concéntricamente alrededor del electrodo para evitar la contaminación del exterior, como se representa en la Figura 2.

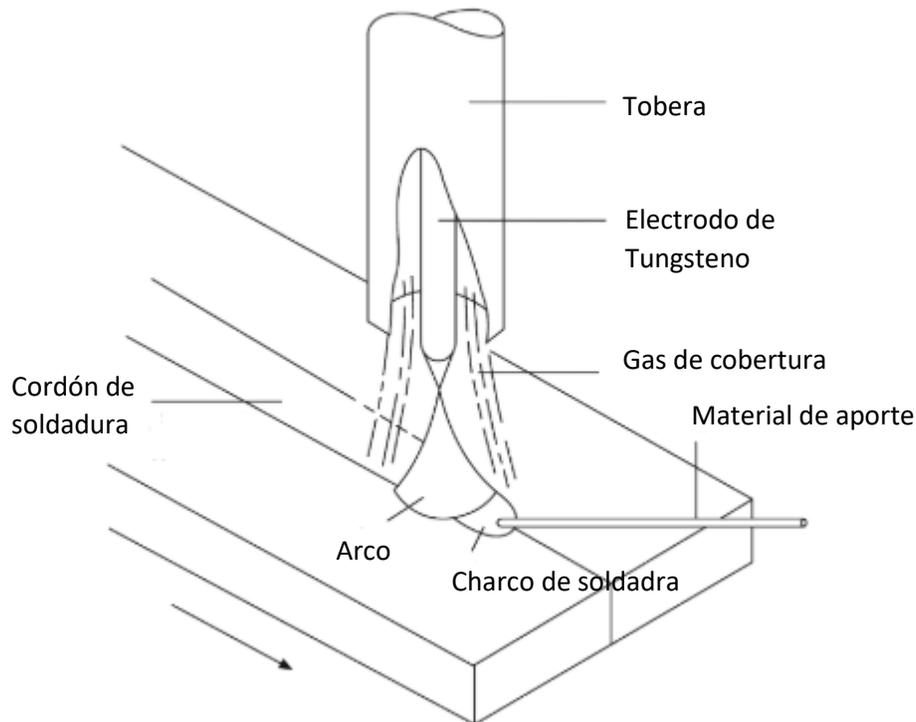


Figura 2. Esquema de Soldadura GTAW

La gran ventaja de este método de soldadura es la obtención de cordones más resistentes, más dúctiles y menos sensibles a la corrosión, debido al gas protector que impide el contacto entre el oxígeno de la atmósfera y el charco de soldadura. Además, dicho gas simplifica notablemente la soldadura de metales ferrosos y no ferrosos, por no requerir el empleo de desoxidantes, con las inclusiones de escoria que esto pueda implicar.

En contraste con los gases ordinarios a presión y temperatura atmosféricas, los plasmas (gases a muy elevadas temperaturas) son conductores eléctricos debido a la presencia de iones y partículas cargadas eléctricamente. Los plasmas a muy altas temperaturas 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. 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.

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 [2-4].

En la soldadura GTAW se emplea un electrodo no consumible de Tungsteno habitualmente Tungsteno-Toriado aunque también se manufacturan electrodos de Tungsteno-Lantano, Tungsteno-Cerio, Tungsteno-Torio que contienen hasta un 3% de Torio (W-3Th, azul), debido al alto punto de fusión del Tungsteno (3422°C).

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

- Tungsteno puro EWP (verde)
- 1%Th EWTh1 (amarillo)
- 2%Th EWTh2 (rojo)
- Stripped EWTh3 (azul)
- Zirconio EWZr (café)

En GTAW se utilizan gases inertes, como el Argón (Ar), Helio (He) y Nitrógeno (N₂). Esto implica que es posible soldar haciendo pasar electricidad por alguno de estos gases.

Particularmente, el argón es el más común en la soldadura GTAW para soldaduras no ferrosas y aleaciones inoxidable. La energía del arco de Ar es dispersada menos uniformemente que la del arco de He debido a la baja conductividad del Ar, lo que da como resultado que el arco de Ar tenga un centro de alta energía y un manto de baja energía térmica. Esto ayuda a producir una transferencia de gotas de metal más estable y axial a través de un arco de Ar. Para los metales ferrosos, el He produce salpicaduras y el Ar produce abatimientos en las líneas de fusión. Añadiendo O₂ o CO₂ al Ar reducen las desventajas. Acero de bajo carbono son soldados comúnmente con CO₂, debido a sus altas velocidades de soldar, mayor penetración y bajo costo. Dado que el CO₂ produce un gran nivel de salpicadura, una diferencia de potencial relativamente baja es utilizada para minimizar la salpicadura. Algunas veces son aplicadas algunas mezclas de estos gases como Argón-Helio, Argón-Hidrógeno y Argón-CO₂ para obtener diversos efectos.

1.4 Plasma

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

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

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

La 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 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.

En la Figura 3 se presenta un esquema simplificado de la región del arco eléctrico en una soldadura con arco. Se establece una diferencia de potencial entre el cátodo y el ánodo, y como el gas de cobertura Ar o He no conduce la electricidad, los electrones se acumulan en el cátodo y este se comienza a calentar a temperaturas muy elevadas (para electrodos de tungsteno son del orden de 4000K). A esa temperatura los electrones altamente energéticos se empiezan a emitir desde el cátodo hacia el ánodo y esta emisión, llamada termiónica, causa colisiones con las moléculas de gas que provocan su ionización. Solamente a altas presiones como la atmosférica existe un estado tal de colisiones que las temperaturas de los electrones y de los iones se equilibran generando el equilibrio termodinámico local. El gas ya convertido en un conductor moderado de la corriente eléctrica permite el paso de una elevada densidad de corriente del orden de $1 \times 10^7 \text{ A/m}^2$, lo cual genera un enorme calor Joule provocado por el paso de tal cantidad de flux de carga. El efecto Joule calienta al gas ionizado, desde ahora llamado plasma a temperaturas mayores a 10,000K y hasta 30,000K. Esas temperaturas también promueven un mecanismo de calor por radiación del arco a la soldadura. Los electrones calientes (10,000K a 30,000K) entran al charco de

soldadura (baja temperatura comparada con la del arco) y al entrar al metal soldado calienta al charco de soldadura por dos mecanismos, uno de ellos llamado efecto Thomson (energía que traen los electrones) y por la condensación de electrones (calor liberado por los electrones al pasar del plasma a la soldadura metálica, lo que implica una caída de potencial que se conoce como función trabajo).

Por otra parte, y de manera paralela, el paso de la enorme densidad de corriente induce un campo magnético angular, también muy grande. El producto cruz entre la densidad de corriente y el campo magnético produce fuerzas electromagnéticas (llamadas fuerzas de Lorentz) que actúan como fuerzas de cuerpo sobre el fluido creando movimiento de fluidos que se traduce en un jet de plasma caliente de alta velocidad que va desde el cátodo hacia el ánodo (para arcos de corriente directa) y que calienta al charco de soldadura por el último mecanismo que se conoce como convección.

Entonces, con esta descripción de la física que gobierna la transferencia de calor desde el arco al charco de soldadura, el arco es un proceso que involucra los fenómenos de flujo de fluidos promovidos por fuerzas electromagnéticas, lo que se denomina magnetohidrodinámica, acoplados a la transferencia de energía y fenómenos electromagnéticos. En cuanto a la transferencia de calor desde el arco al charco de soldadura podemos decir que hay cuatro mecanismos participantes que son: convección, radiación, efecto Thomson y condensación de electrones o función trabajo.

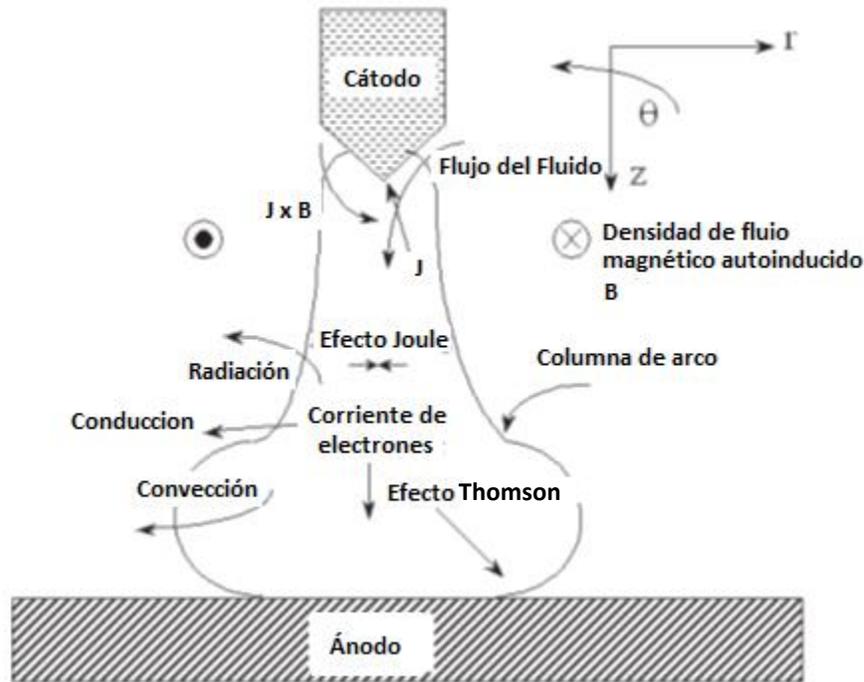


Figura 3. Esquema de un Arco Eléctrico

1.5 Revisión Bibliográfica

Derivado de su gran importancia tecnológica, los procesos de soldadura por arco han sido estudiados desde mediados del siglo pasado con el objetivo de comprender los fenómenos involucrados y así poder optimizar el proceso para la obtención de soldaduras de calidad sin defectos. Ha habido intentos para entender y explicar la física involucrada en este complejo fenómeno, presente en el arco de soldadura, a través de soluciones analíticas simples, soluciones numéricas y mediciones experimentales.

Inicialmente varios autores [5-11] desarrollaron modelos para predecir fluxes de calor desde la columna del arco al charco de soldadura utilizando Ar como gas de cobertura a bajas intensidades de corriente, con el fin de determinar la penetración de la soldadura. Para esto se agregaron ecuaciones que describieran el enfriamiento de la superficie del cátodo por emisión termiónica y radiación, al igual que el calentamiento por emisión termiónica y enfriamiento por radiación de la superficie del ánodo. Para validar estos

modelos, se realizaron experimentos bajo condiciones controladas de arco (cátodo de tungsteno estacionario con solo 20 segundos de experimento para evitar la formación de vapores de la superficie del ánodo, ánodo de cobre enfriado con agua, 5 mm de longitud de arco, flujo de Ar como gas de cobertura a 15 l/min [10]) con el uso de cámaras infrarrojas, para que pudieran medir la temperatura de arco y la temperatura de la zona afectada por el calor (ZAC) a través de termopares. Los resultados obtenidos de estos experimentos aún son utilizados para validar modelos matemáticos, un ejemplo de esto se muestra en la Figura 4 [10].

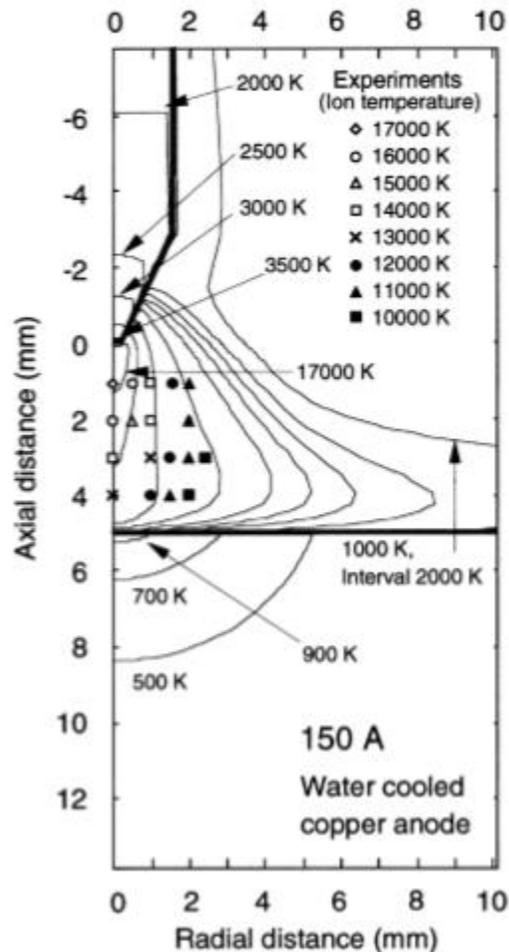


Figura 4. Comparación de resultados teóricos en temperatura del plasma con resultados experimentales de Tanaka [10]

Una de las principales metas ha sido estudiar el arco de soldadura a través de modelos numéricos para predecir la cantidad de energía que se transfiere

del arco a la pieza a soldar, para así poder tener un mejor control en el cordón de soldadura y poder obtenerlo con la menor cantidad de defectos. Esto es posible solo si el modelo describe precisamente los campos de temperatura y ambos vectores de campo de la densidad de corriente y velocidad dentro de la columna del arco [12-15].

La transferencia de calor dentro de la columna del arco y de las interfases plasma-electrodo es controlada por diversos mecanismos de transferencia de calor: conducción, convección, efecto Joule, efecto Thomson y radiación. [16] La resistencia del paso de corriente entre el cátodo y el ánodo produce un calentamiento por efecto Joule el cual incrementa la temperatura del arco, siendo este el principal mecanismo de entrada de calor a la columna del arco. Las altas temperaturas alcanzadas en la columna del arco son responsables de la alta emisión de radiación del plasma hacia los alrededores, la cual es probablemente uno de los principales mecanismos de remoción de calor de la columna del arco. Fuerzas electromagnéticas o fuerzas de Lorentz ($J \times B$) formadas en la punta del cátodo, las cuales comprimen al plasma generando altas presiones en el cátodo impulsan un jet de plasma de alta velocidad (hasta 500 m/s) con dirección al ánodo que promueve el mecanismo de transferencia de calor por convección en la columna del arco. Cuando el jet de plasma choca en el ánodo la energía del arco es transferida hacia la pieza a soldar por convección y también conducción en dirección radial, mientras que por los abruptos gradientes de temperatura y altas densidades de corriente en la interfase arco-electrodo el efecto Thomson surge en forma de enfriamiento de la columna del arco.

Los modelos numéricos han jugado un rol clave en entender la física de un arco eléctrico. Los primeros modelos describen el arco eléctrico de una manera realista usando Ar como gas de cobertura y asumiendo que se tiene un Equilibrio Termodinámico Local (ETL) en toda la columna del arco [12-15]. Es bien sabido que predicciones precisas de la distribución de corriente eléctrica son muy importantes para cuantificar la transferencia de calor a la

pieza a soldar [13] ya que la distribución de corriente está asociada a los mapas de temperatura de la columna del arco por el calentamiento por efecto Joule. Además, se sabe que la distribución de temperaturas está altamente asociada a la distribución de corriente eléctrica a través de la conductividad eléctrica que presenta el plasma a diferentes temperaturas.

Murphy [17] presenta una revisión en el estado del arte de modelos numéricos de plasmas térmicos, donde se analiza la importancia de la influencia de las propiedades físicas del plasma; propiedades termodinámicas, coeficientes de transporte y coeficiente neto de emisión por radiación, en las características del arco, particularmente las que más afectan la transferencia de calor y flujo de fluidos hacia y dentro del charco de soldadura. Siendo ésta la presencia de vapor metálico proveniente del charco de soldadura que afecta las propiedades del gas al aumentar la emisión de energía por radiación además de aumentar las zonas de baja temperatura dentro del arco debido a la baja energía de ionización que necesitan los vapores metálicos. Por lo anterior, algunos modelos recalculan las propiedades físicas del principal gas de cobertura del plasma considerando los vapores metálicos generados por el charco de soldadura [18-20].

Adicionalmente Murphy [17] presenta una visión más completa de las dificultades que los modelos numéricos tienen en el modelado de las regiones cercanas a los electrodos. A la hora de modelar las capas catódicas y anódicas se tiene una gran problemática, por la física tan compleja que se tiene, no es posible asumir ETL ya que la temperatura de los iones del gas como los electrones no se encuentran a la misma temperatura por lo que se estudian por separado de la columna del arco. Estas capas usualmente se dividen en 2, una pequeña capa de espacio cargado (~ 10 nm) y una pre-capa llamada capa de dos temperaturas (~ 100 μ m); donde la capa de espacio cargado se nombra así por la acumulación de cationes cerca de los electrodos, y la pre-capa corresponde al lugar donde la temperatura de los electrones es mucho mayor a la temperatura de las especies pesadas. En la

Figura 5 se muestra un esquema simplificado del arco mostrando la capa y pre-capas catódica y anódica, como también la columna del arco. En la Figura 6 se muestra la capa y la pre-capas catódica esquematizando la física involucrada.

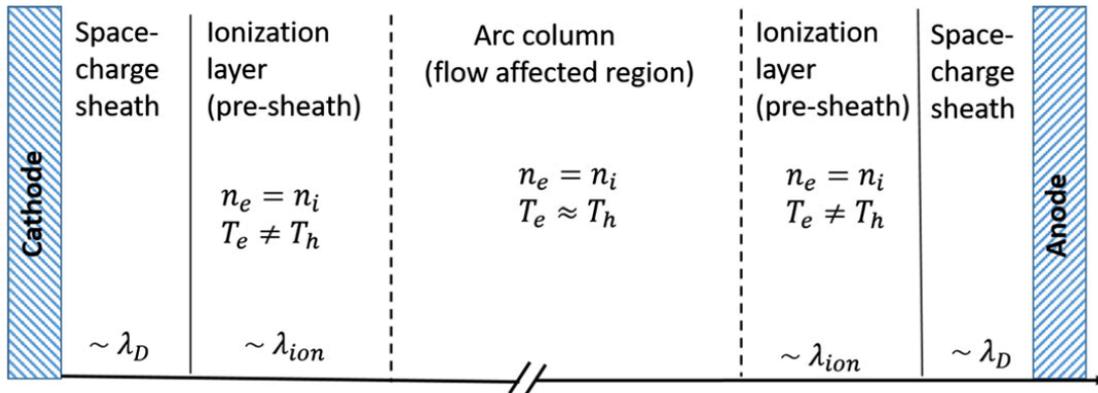


Figura 5. Estructura del arco: capa catódica, columna del arco y capa anódica.

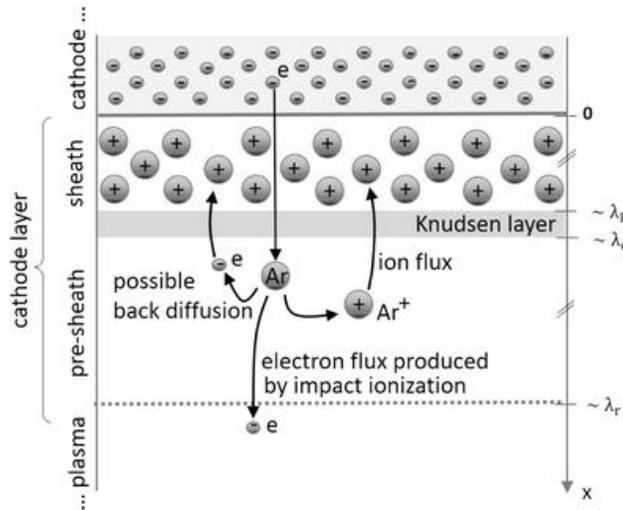


Figura 6. Física de capa catódica. Capa y pre-capas

Para tratar las capas anódicas y catódicas se han empleado dos enfoques: el primero, el más común, es negar la física a detalle presente en las capas, esto se logra por medio de tomar un tamaño de malla adecuado para que el primer nodo se encuentre afuera de la región de la capa; el segundo es incluir a detalle la física de las capas dentro del modelo, lo que ha llevado a desarrollar modelos de dos temperaturas, llamados así porque calculan la

temperatura de los electrones y de las especies pesadas por separado. Hay grandes diferencias de las propiedades del arco dependiendo el enfoque utilizado, el primero no calcula la caída de potencial eléctrico de las capas, pero la temperatura de la columna del arco es similar a las mediciones experimentales; mientras que el segundo predice correctamente las caídas de potencial eléctrico, pero las temperaturas de la columna del arco predichas por los modelos son menores a las mediciones [21-23].

En trabajos más recientes se están desarrollando modelos que consideren el movimiento, geometría y ángulo de inclinación del cátodo intentando asemejarse más a las condiciones reales de operación en una soldadura GMAW, con el fin de predecir las dimensiones finales del cordón de soldadura. Al predecir las dimensiones finales del cordón de manera correcta, una optimización en la elección de las variables sería posible. [24] elaboraron un software CFD, ArcWeld, especializado para modelado de soldadura MIG, creando un modelo magnetohidrodinámico en 3D que fue capaz de calcular las interacciones entre arco, electrodo y pieza de trabajo, además de obtener valores muy cercanos a los experimentales en dimensiones del cordón de soldadura. Teniendo como resultado la optimización de los principales parámetros en soldadura MIG a diferentes aleaciones.

Por último, algunos modelos intentan analizar el arco como fuente de calor para el charco de soldadura [25-30] sin tomar en cuenta la temperatura dentro de la columna del arco, teniendo un enfoque directo al ánodo y la distribución de calor que entra a este. Este enfoque ha sido utilizado para calcular la energía que entra al ánodo y de esta forma poder predecir las dimensiones del charco de soldadura y la ZAC. [30] calcularon la energía transferida al cátodo y al charco de soldadura desde el arco. Basados en sus resultados ellos afirman que el cátodo es calentado asemejando una distribución de flux de calor Gaussiana mientras que la fuente de calor en la columna del arco presenta una forma elipsoidal presentando un máximo de fuente calor en el centro de esta. Sin embargo, la explicación acerca de la obtención de la forma

elíptica no es clara y no se ve relación alguna con la forma Gaussiana obtenida en el cátodo, por lo que se tiene un trabajo incompleto en el análisis de la transferencia de energía en la columna del arco. Como bien dijo Murphy [17], ver al arco como fuente de calor es correcta si nos limitamos al contexto de control de proceso. Pero en el amplio contexto de entender, mejorar y aplicar el arco de soldadura, estudiar el arco de plasma, incluyendo su temperatura, es crítica. El arco de plasma es muy importante por sus interacciones con el cátodo y la pieza de trabajo. La razón por la cual es incorrecto tomar al arco solo como una fuente de calor es debido a que estas interacciones van en los dos sentidos; en otras palabras, el arco afecta al cátodo y al ánodo, pero también esto afectan al arco. Por ejemplo, los vapores metálicos despedidos tanto por la punta del cátodo como el charco de soldadura tendrán un efecto en la temperatura del arco y la distribución de corriente eléctrica, las cuales afectan la densidad de corriente y flujo de calor en la superficie del charco de soldadura. Claramente, no es posible tomar estos efectos en consideración si no se tiene un buen entendimiento del plasma del arco y sus propiedades, por lo cual, aún no se tiene presente en la literatura especializada, un trabajo que describa y cuantifique la importancia de los mecanismos de transferencia de calor dentro de la columna del arco que ayuden a comprender la física de la transferencia de energía.

En este trabajo, se presenta un análisis detallado de la predominancia de los mecanismos de transferencia de calor en la región del arco con el fin de comprender la física del arco y poder interpretar la contribución relativa de cada uno de los mecanismos de transferencia de calor del arco al charco de soldadura. Además, se analiza el efecto de la corriente del arco, la longitud del arco y gas de cobertura en la predominancia de los mecanismos de transferencia de calor dentro del arco. Por último, se presenta una propuesta de balances de energía simples en zonas específicas de interés dentro del arco para así obtener un entendimiento básico de la física dentro del arco eléctrico.

1.6 Hipótesis

En la simulación de arcos eléctricos de soldadura es posible obtener características físicas del arco a partir de ecuaciones sencillas y simples que se basen en los mecanismos de transferencia de calor que se encuentran dentro de la columna del arco.

1.7 Objetivo General

Simular arcos eléctricos de soldadura que presenten una distribución de los mecanismos de transferencia de calor dentro de la columna del arco usando un modelo matemático basado en la magnetohidrodinámica del proceso, a través de resolver las ecuaciones de conservación de masa, cantidad de movimiento, leyes de Maxwell, ley de Ohm y ley de conservación de carga resueltas numéricamente mediante CFD.

1.8 Objetivo Particulares

- Obtener para cada punto del arco de soldadura las contribuciones que se tienen por cada mecanismo de transferencia de calor en W/m^3 .
- Mapear las zonas de predominancia de cada mecanismo de transferencia de calor dentro del arco de soldadura.
- Analizar el efecto de la corriente del arco, la longitud del arco y gas de cobertura en la predominancia de los mecanismos de transferencia de calor dentro del arco.
- Obtener una serie de fórmulas simplificadas, a partir de la distribución de los mecanismos de transferencia de calor que permitan predecir características del arco aplicado a la soldadura.

2. Metodología de trabajo

Un modelo matemático previamente desarrollado representando un arco eléctrico en soldadura TIG fue usado para realizar el análisis [31]. El modelo matemático se basa en los principios fundamentales de flujos de fluidos, conservación de energía, conservación de masa, conservación de carga eléctrica, así como las leyes que rigen el electromagnetismo, es decir, el modelo incluye las ecuaciones de continuidad, de Navier-Stokes, de conservación de energía, la ecuación de conservación de carga eléctrica, la ley de Ohm y las leyes de Maxwell, Ley de Gauss, Ley de Faraday y Ley de Ampere. El conjunto de ecuaciones gobernantes sujeto a condiciones de frontera se resolvió de manera numérica empleando la técnica conocida como volumen de control e implementada en código PHOENICS.

2.1 Suposiciones

A continuación, se presenta un listado con las suposiciones más importantes.

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

5. Estado estacionario.
6. Propiedades físicas en función de la temperatura.
7. Los efectos de gravedad y disipación de calor debido a la viscosidad son despreciables.
8. Presión atmosférica.
9. Gas de cobertura sin impurezas gaseosas ni evaporación de piezas metálicas a soldar.
10. Superficie del ánodo plana, sin deformación del charco de soldadura.
11. Sistema de corriente directa, además de tener electrodo estático.
12. El plasma es ópticamente delgado, es decir, no se lleva a cabo la absorción de radiación dentro del arco, la radiación puede ser modelada en una forma aproximada, definiendo las pérdidas de radiación por unidad de volumen.
13. La densidad de corriente en un punto del cátodo se considera constante con un valor de $6.5 \times 10^7 \text{ A/m}^2$.
14. El electrodo se excluye del dominio ya que no tiene un efecto crítico sobre la región del arco.

En la Figura 7 se presenta el dominio de cómputo a resolver en dos dimensiones en coordenadas cilíndricas polares, mostrando las fronteras del sistema. La superficie catódica es representada de la sección A-C, teniendo una división de A-B el cual representa al "spot" del cátodo, explicado más adelante. La superficie anódica de F-E. La sección A-F representa un eje de simetría. Por último, C-D y D-E son fronteras abiertas al ambiente.

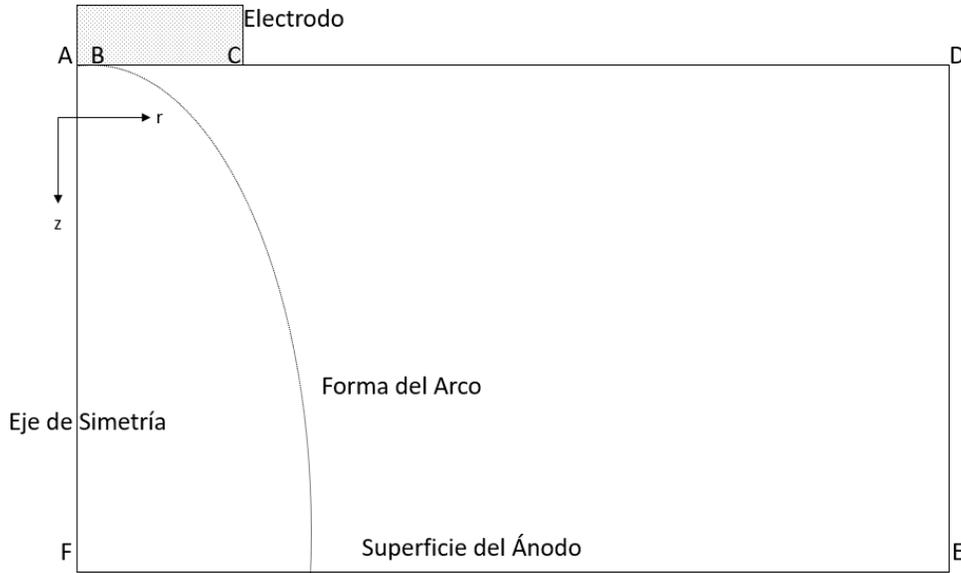


Figura 7. Dominio de cómputo en 2D y coordenadas cilíndricas.

2.2 Ecuaciones gobernantes

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

Ecuación de continuidad:

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

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

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

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

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

donde v_r y v_z son los componentes de velocidad radial y axial respectivamente, P es la presión, ρ es la densidad, J_z y J_r son los componentes de densidad de corriente axial y radial respectivamente, B_θ es la densidad de flux magnético azimutal, y μ es la viscosidad del plasma. Las variables independientes son el tiempo, t , y las coordenadas axial z y radial r .

Ecuación de conservación de energía:

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

En este trabajo se tiene gran importancia al análisis de los mecanismos de transferencia de calor en un arco eléctrico para soldadura TIG, por lo que se debe de nombrar a cada mecanismo de transferencia de calor relevante involucrado en cualquier columna de arco eléctrico. En este sentido, los términos de la izquierda en la Ec. 4 son los términos de convección, mientras que los dos primeros de la derecha en la Ec. 4 son los términos de conducción. El término fuente S_t , es representado en Ec. 5 y tiene los últimos 3 mecanismos en los términos de la derecha; siendo estos, de izquierda a derecha efecto Joule, pérdidas por radiación, y efecto Thomson.

El término fuente S_t se representa por:

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

donde, h es la entalpía, C_p es el calor específico, S_r es el poder emisivo por unidad de volumen del plasma, k es la conductividad térmica, σ es la

conductividad eléctrica, k_B es la constante de Boltzmann y e es la carga del electrón.

Ecuaciones de Maxwell:

Ley de Faraday:

$$\bar{\nabla} \times \bar{E} = 0 \quad (\text{Ec.6})$$

Ley de Ampere:

$$\bar{\nabla} \times \bar{H} = \bar{J} \quad (\text{Ec.7})$$

Ley de Gauss-Flujo del campo magnético:

$$\bar{\nabla} \cdot \bar{B} = 0 \quad (\text{Ec.8})$$

Ecuación de conservación de carga:

$$\bar{\nabla} \cdot \bar{J} = 0 \quad (\text{Ec.9})$$

Ley de Ohm:

$$\bar{J} = \sigma \bar{E} \quad (\text{Ec.10})$$

Donde \bar{E} es el vector de campo eléctrico, \bar{J} es el vector de densidad de corriente, \bar{H} es el vector de campo magnético y \bar{B} es el vector de densidad de campo magnético.

A partir de las ecuaciones de Maxwell, la conservación de carga y la ley de Ohm, es posible determinar las características eléctricas del arco.

Al combinar la ecuación de conservación de carga (Ec. 9) y la ley de Ohm (Ec. 10), es posible derivar la formulación de campo eléctrico [31]:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\sigma r \frac{\partial \phi}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\sigma \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) = 0 \quad (\text{Ec.11})$$

donde ϕ es el potencial eléctrico relacionado al campo eléctrico a través de la siguiente ecuación:

$$\bar{E} = -\nabla \phi \quad (\text{Ec.12})$$

Resolviendo Ec. 11, es decir, obteniendo el campo de potencial eléctrico, ϕ , es posible obtener los componentes de la densidad de corriente con la ayuda de la ley de Ohm (Ec. 13 y 14):

$$J_r = -\sigma \left(\frac{\partial \phi}{\partial r} \right) \quad (\text{Ec.13})$$

$$J_z = -\sigma \left(\frac{\partial \phi}{\partial z} \right) \quad (\text{Ec.14})$$

Finalmente, debido al hecho de que la mayoría de la corriente es axialmente directa, la densidad del flux del campo magnético puede ser integrada a partir de la ley de Ampere (Ec.7):

$$B_\theta = \frac{\mu_0}{r} \int_0^r J_z r dr \quad (\text{Ec.15})$$

donde μ_0 es la permeabilidad del vacío.

De esta manera, el problema electromagnético es resuelto completamente. En resumen, la aproximación de potencial eléctrico resuelve la ecuación de continuidad (Ec. 1), dos ecuaciones de Navier-Stokes (Ec. 2 y 3), la ecuación de conservación de energía (Ec. 4 y 5), además la ecuación de potencial eléctrico (Ec. 11, 13 - 15) son usadas para obtener el resto de la información electromagnética necesaria para los términos fuentes de las ecuaciones de Navier-Stokes y conservación de energía, que configuran un fenómeno altamente acoplado. Debido a la relación no lineal de las propiedades físicas con la temperatura hacen al problema altamente no lineal, por lo que la solución numérica presenta problemas de convergencia.

Región del charco de soldadura (frontera del ánodo)

En el ánodo se deben considerar varios mecanismos de transporte de calor para una representación realista del flujo de calor desde el arco. Esto es especialmente importante en el acoplamiento del arco con la región del charco de soldadura. Los diversos mecanismos de transferencia de calor son

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

- Caída anódica (anode fall)
- Condensación de electrones
- Transferencia de calor por convección
- Transferencia de calor por radiación
- Energía transportada por electrones

Caída anódica. Es la caída de tensión que está presente en el ánodo. Los electrones que pasan esta caída de voltaje liberan energía en el proceso. La energía liberada debido a la caída del ánodo se expresa de manera análoga:

$$Q_a = J_a V_a \quad (\text{Ec. 16})$$

donde J_a es la densidad de corriente en el ánodo, la cual depende de las condiciones del arco dadas para la solución del modelo del arco. V_a es el valor en volts de la caída de voltaje en el ánodo.

Condensación de electrones. Este mecanismo de transferencia de calor es resultado de la condensación de los electrones al moverse del arco al charco de soldadura. El proceso de condensación genera un flux de calor proporcional a la caída de potencial (función trabajo o work function) al pasar del plasma al charco de soldadura:

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

donde V_ϕ es la función trabajo del charco de soldadura.

Convección. La alta velocidad del jet incidiendo en la superficie del ánodo calienta el charco de soldadura por convección y este calor es calculado asumiendo que el calor transferido es gobernado por una correlación empírica de un jet vertical sobre una superficie horizontal [6]:

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

Donde h y σ_{HW} son la entalpía y número de Prandtl y los sufijos b denotan la posición en el borde de la capa límite del plasma gaseoso, mientras w representa la posición en la superficie del charco.

Transferencia de calor por radiación. La radiación proveniente del arco a la superficie del charco es calculada integrando en todo el volumen del plasma por la aproximación de factores de visión estereográficos sobre cada elemento del ánodo, descrita por la siguiente ecuación:

$$Q_{rad} = \int_{V_j} \frac{S_r}{4\pi r_{i,j}^2} \cos \Psi \, dV_j \quad (\text{Ec.19})$$

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

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

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

donde el parámetro α representa el rango entre la temperatura del electrón y la temperatura del plasma en la caída del ánodo. Para los cálculos un valor de 1.2 fue establecido para α , sacado del trabajo de J. Ushio en 1981[32].

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

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

2.3 Condiciones de Frontera

En la Tabla 1 se muestra las condiciones a la frontera de todas las variables. Las fronteras son las líneas que están marcadas con letras mayúsculas en la Figura 7. Las condiciones de frontera más críticas son para ϕ y B en la región

catódica, y para la densidad de corriente en la misma se supone que existe un pequeño círculo en el cátodo “spot”, con densidad de corriente, J_c , describiendo un perfil parabólico con un valor máximo de $6.5 \times 10^7 \text{ A/m}^2$, que fue usada como flux para el campo eléctrico ϕ , y también fue utilizada en la ley de Ampere para obtener B en la punta. En las superficies anódica y catódica se establecen velocidades iguales a cero, en el eje de simetría se suponen gradientes igual a cero para todas las variables y velocidad radial cero. En el eje de simetría, se asumen gradientes cero para todas las variables excepto para B (que vale 0) y la velocidad radial, que son iguales a 0. En las fronteras abiertas a la atmósfera se deja escapar gas que se lleva energía por convección. Finalmente, en la superficie del ánodo se aplica la condición de no deslizamiento para el plasma, se aplican las ecuaciones correspondientes a los 5 mecanismos de transferencia de calor (Ec. 16 - 20). En especial destaca la convección en la que se emplea una correlación de jets calientes verticales incidiendo en una superficie plana con un punto de estancamiento (Ec. 18). En esa misma frontera se pone el potencial eléctrico con valor arbitrario de cero. Para la entalpía se utilizaron valores fijos como condiciones de frontera en el cátodo ($7.2 \times 10^6 \text{ Jkg}^{-1}$ correspondientes a 4000 K) y en el ánodo ($5.2 \times 10^5 \text{ Jkg}^{-1}$ correspondiente a 1000 K).

En el cátodo el potencial eléctrico se hace variar para asegurar que la corriente deseada pase a través de un punto con radio conocido, el cual depende exclusivamente de la densidad de corriente que pase a través del cátodo J_c . La relación entre el radio en ese punto, R_c , y la corriente del arco I , de la siguiente forma:

$$R_c = \left(\frac{I}{\pi J_c}\right)^{0.5} \quad (\text{Ec. 22})$$

Tabla 1 Condiciones a la frontera del modelo de arco eléctrico basadas en el arreglo geométrico de la Figura 7.

	Vr	Vz	P	H	Φ
AB	0	0		T=4000 K o h=7.2x10 ⁶ J/kg $Q_{ef} = J_z V_c$	$\frac{\partial \Phi}{\partial z} = -\frac{J_c}{\sigma}$
BC	0	0		T=4000 K o h=7.2x10 ⁶ J/kg	$\frac{\partial \Phi}{\partial z} = 0$
CD	0	$\frac{\partial V_z}{\partial z} = 0$	Presión atmosférica fija	$\frac{\partial h}{\partial z} = 0$	$\frac{\partial \Phi}{\partial z} = 0$
DE	$\frac{\partial V_r}{\partial r} = 0$	$\frac{\partial V_z}{\partial r} = 0$	Presión atmosférica fija	$\frac{\partial h}{\partial r} = 0$	$\frac{\partial \Phi}{\partial r} = 0$
EF	0	0		T=1000 K o h=5.2x10 ⁵ J/kg $Q_{anodo} = ec. 21$	$\frac{\partial \Phi}{\partial r} = 0$
AF	0	$\frac{\partial V_z}{\partial r} = 0$		$\frac{\partial h}{\partial r} = 0$	$\Phi = 0$

2.4 Técnica de solución

La codificación de la resolución numérica se basa en el método numérico Volumen de Control. En esta técnica divide al sistema en un número finito de pequeños volúmenes sin traslape, de tal manera que hay sólo un volumen de control rodeando a cada nodo. También el tiempo se divide o discretiza

en pequeños segmentos. Todas las ecuaciones de conservación que gobiernan al problema se integran sobre cada volumen. El resultado de tal integración es la transformación de un sistema de ecuaciones parciales a varios sistemas lineales de ecuaciones algebraicas, los cuales pueden resolverse por medio de técnicas numéricas iterativas. Cuando los sistemas lineales de ecuación son resueltos, la solución consiste en obtener los valores de las variables dependientes en los nodos. La característica más atractiva de esta técnica es que la solución resultante implica la conservación integral de la cantidad conservada dentro del volumen de control y por lo tanto en todo el dominio.

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

$$\nabla \cdot \Gamma \Phi + S_{\Phi} = \frac{\partial \rho \Phi}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \nabla \Phi) \quad (\text{Ec. 23})$$

Donde Γ , Φ , S_{Φ} , son el coeficiente difusivo de transporte general, la variable dependiente general y el término fuente respectivamente. Entonces, la generación de cada ecuación de transporte consiste en asignar valores adecuados de Γ , Φ , S_{Φ} . La ecuación representa un balance de Φ , en donde se aprecian el término transitorio (o acumulación de Φ), seguido del término de entradas netas por transporte convectivo de Φ , el término de entradas netas de transporte difusivo de Φ , y el término fuente de generación de Φ .

2.5 Solución

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

Posteriormente, se implementa en el software CFD PHOENICS, donde todos los términos fuente, condiciones de frontera no lineales y propiedades físicas

dependientes de la temperatura son preparadas por subrutinas escritas en lenguaje Fortran. Además, las subrutinas en Fortran fueron escritas para calcular cada término de la ecuación de conservación de energía individualmente, conducción, convección, efecto Joule, efecto Thomson y radiación en W/m^3 .

La convergencia de los datos se alcanzó hasta que el porcentaje de error de cada una de las variables, presión (P1, en notación del software, asociada a la ecuación de continuidad), velocidad radial (V1, en notación del software, asociada a la componente radial de la ecuación de Navier-Stokes), velocidad axial (W1, en notación del software, asociada a la componente axial de la ecuación de Navier-Stokes), entalpía (H1, en notación del software, asociada a la ecuación de conservación de energía) y campo magnético (C27, en notación del software, asociada a la ecuación de potencial eléctrico, Ec. 11), sea menor al 0.01% al resolver las 5 ecuaciones simultáneamente. Cada simulación tomó alrededor de 50,000 iteraciones, las cuales tomaron alrededor de 3 horas de tiempo de CPU en una PC con una velocidad de reloj de 3.30 GHz y una RAM de 4 GB.

La geometría utilizada se definió como se muestra en la Figura 7, con una longitud en Y de 10 mm y una dirección en Z de 7 mm, recordando que son en coordenadas cilíndricas. En cuanto a la malla, se utilizaron 115 nodos en dirección "Y" y 70 nodos en dirección "Z". Colocando 10 nodos en el spot, punto A al punto B en la Figura 4, y 105 nodos para el resto de la longitud en "Y", punto B al punto D en la Figura 7; en cada una de las regiones radiales los nodos se tiene una malla uniforme. En dirección "Z" se dividió en 2 regiones, esto con el fin de poder colocar 2 mallas de 35 nodos cada una para poder afinar éstas, tanto cerca del ánodo como del cátodo, siendo éstos nuestros puntos de interés, esto se definió en un estudio de sensibilidad de malla [33], para converger la simulación. Por lo que la malla utilizada se muestra a continuación en la Figura 8.

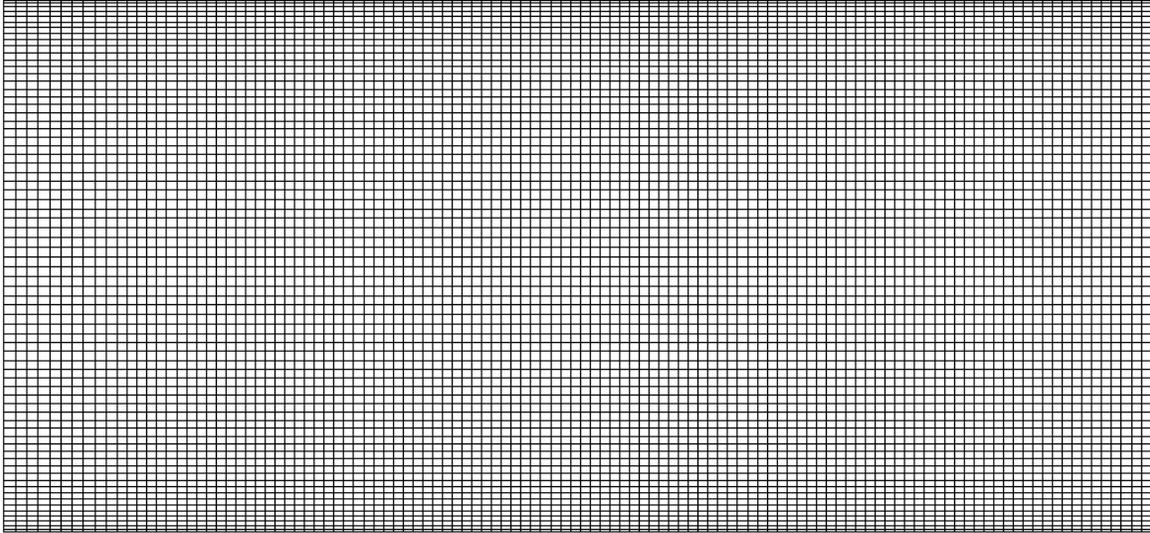


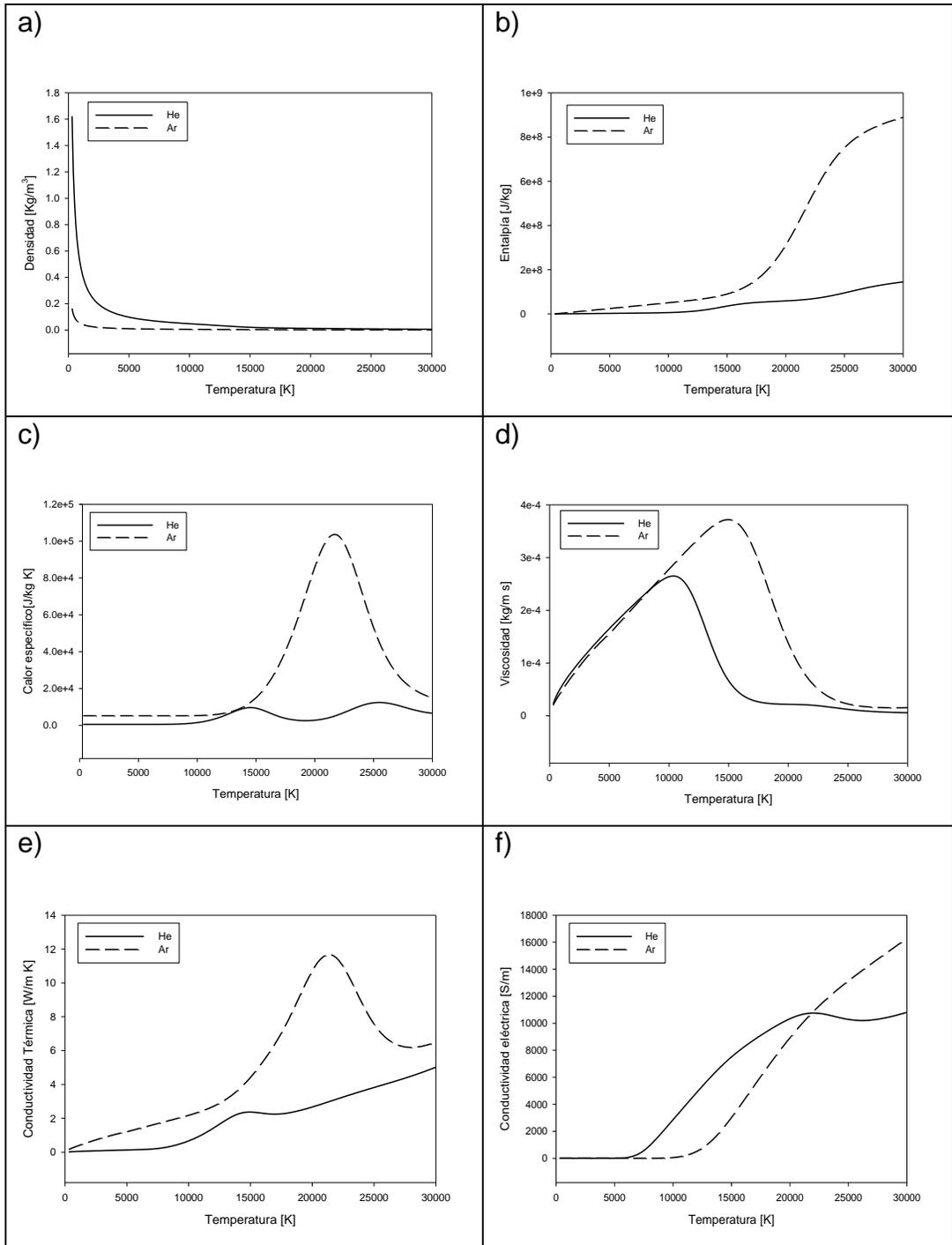
Figura 8. Malla utilizada para la región de la soldadura GTAW

Por último, se realizó la captura de las propiedades en función de la temperatura (densidad, viscosidad, calor específico, entalpía, conductividad eléctrica y radiación) de cada uno de los gases, Ar y He, en una subrutina.

2.6 Propiedades de los gases

Siendo que el comportamiento de las propiedades varía con respecto a la naturaleza de cada uno de los gases, entender este comportamiento es necesario para una buena selección de gases para la soldadura GTAW.

Las propiedades de los arcos cuando se utilizan diferentes gases son determinadas por las propiedades termofísicas (densidad, entalpía y calor específico), los coeficientes de transporte (viscosidad, conductividad térmica y conductividad eléctrica) y el coeficiente de emisión de radiación de cada uno de los gases utilizados. En este trabajo se utilizaron como gases Ar y He completamente puros, por lo que se presenta a continuación la diferencia de propiedades que posee uno con respecto al otro en un rango de temperaturas de 300 a 30,000 K Figura 9. Las propiedades de los plasmas se calcularon y fueron proporcionadas por el investigador A. Murphy, 2017 a través de una comunicación personal con otro académico participante en esta investigación (Patricio Méndez de la Universidad de Alberta en Canadá).



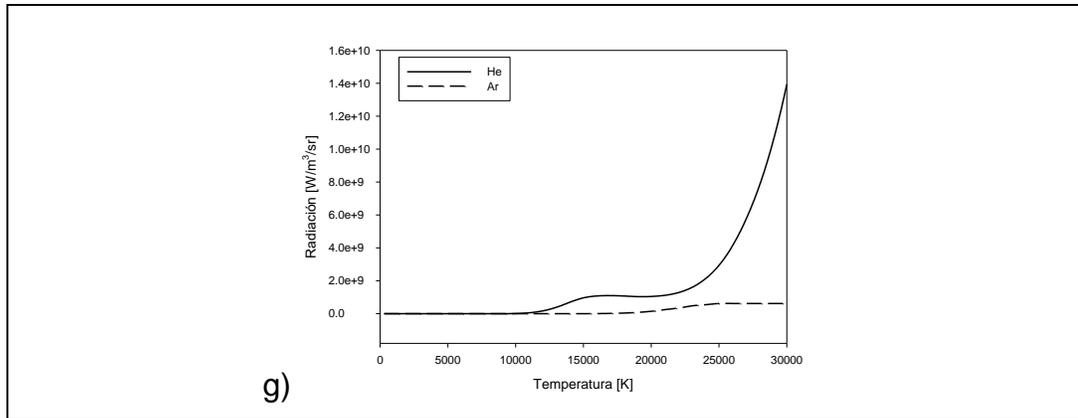


Figura 9. Propiedades físicas para argón y Helio en función de la temperatura. a) densidad, b) entalpía, c) calor específico, d) viscosidad, e) conductividad térmica y f) conductividad eléctrica.

Los datos provistos de radiación tenían unidades de $W/m^3/sr$, siendo que los estereorradianes (sr) representa la medición de ángulo sólido en un modelo tridimensional, representado por una esfera. Se realizó un ajuste de unidades para poder utilizar los datos provistos, siendo que se tenía que eliminar los estereorradianes, a lo cual se multiplicó cada coeficiente por un 4π , y así obteniendo los valores utilizados.

Para realizar el análisis, se corrieron casos de arcos con gas de Ar fijando la corriente a 150 A y longitudes de arco de 5, 7 y 10 mm, y fijando la longitud de arco a 7 mm a intensidad de corriente de 150, 200, 250 y 300 A, para estudiar el efecto de la longitud de arco e intensidad de corriente que tiene en los mecanismos de transferencia de calor dentro del arco. Además, un caso de un arco eléctrico con gas He con longitud de arco de 7 mm e intensidad de corriente de 150 A, con el fin de comprender el efecto del gas de cobertura en los mecanismos de transferencia de calor dentro del arco.

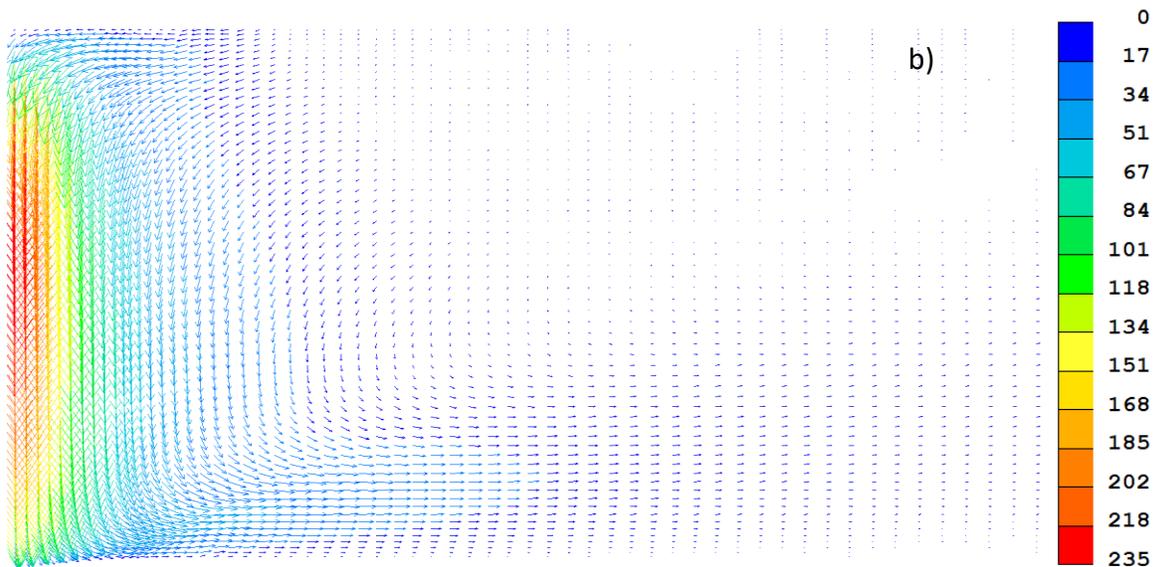
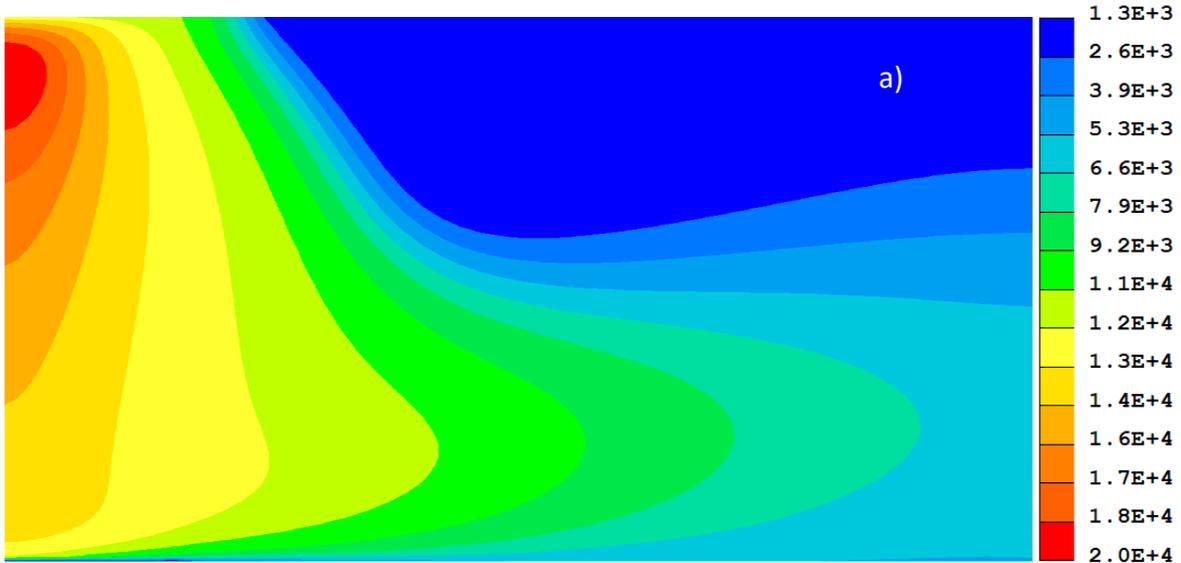
3. Resultados y Discusión

Acorde al modelo numérico se pudieron calcular las principales características de un arco, para un arco de Ar con corriente de 150 A y 7 mm de longitud; temperatura del plasma (Figura 10a), campo vectorial de velocidad del plasma (Figura 10b), campo magnético (Figura 10c) y campo vectorial de corriente de arco (Figura 10d). Estas características son necesarias para comprender los mecanismos de transferencia de calor, ya que están involucradas en las expresiones pertinentes (Ec. 4 y 5).

El mapa de temperatura muestra la bien conocida forma de campana (Figura 10a) explicando el mecanismo de convección a través del campo de velocidades; un jet es formado por las fuerzas de Lorentz generadas en el cátodo con dirección al ánodo y cuando el jet choca con el charco de soldadura es desviado radialmente y de esta forma la convección deforma las isotermas de la manera que se muestra en la Figura 10b. El mapa presenta sus valores más altos a un radio 0 y a un área cercana al cátodo (0.6 mm de distancia del cátodo) llegando a una temperatura máxima de 19,700 K. Mientras que el campo vectorial de velocidad del plasma muestra una velocidad máxima de 235 m/s a un radio 0 y a una distancia del cátodo de 2 mm. El mapa de temperatura permite explicar el comportamiento tanto de los mecanismos de transferencia de calor por conducción como de radiación, mientras que la velocidad y la temperatura definen el término de convección.

Los campos de corriente (Figura 10c) y magnetismo (Figura 10d) conducen al jet de plasma a través del producto cruz $\mathbf{J} \times \mathbf{B}$, definido como fuerzas de Lorentz, con un máximo cerca del cátodo; estas fuerzas de Lorentz generan un punto de alta presión cerca del cátodo, razón por la cual el jet de plasma alcanza velocidades tan altas. Las máximas temperaturas también se encuentran cerca del cátodo y la principal razón es la presencia de la intensidad de corriente en ese lugar. El calentamiento por efecto Joule depende del campo de densidades de corrientes, el cual también sirve para

comprender el efecto Thomson. Por otra parte, el campo de densidades de corriente brinda información acerca de las zonas dentro del dominio de cálculo que presentan conducción eléctrica, de esta forma se delimita el radio del arco. En la **Tabla 2** se muestran los valores máximos de velocidad, temperatura y presión del arco de Ar con densidad de corriente de 150 A y 7 mm.



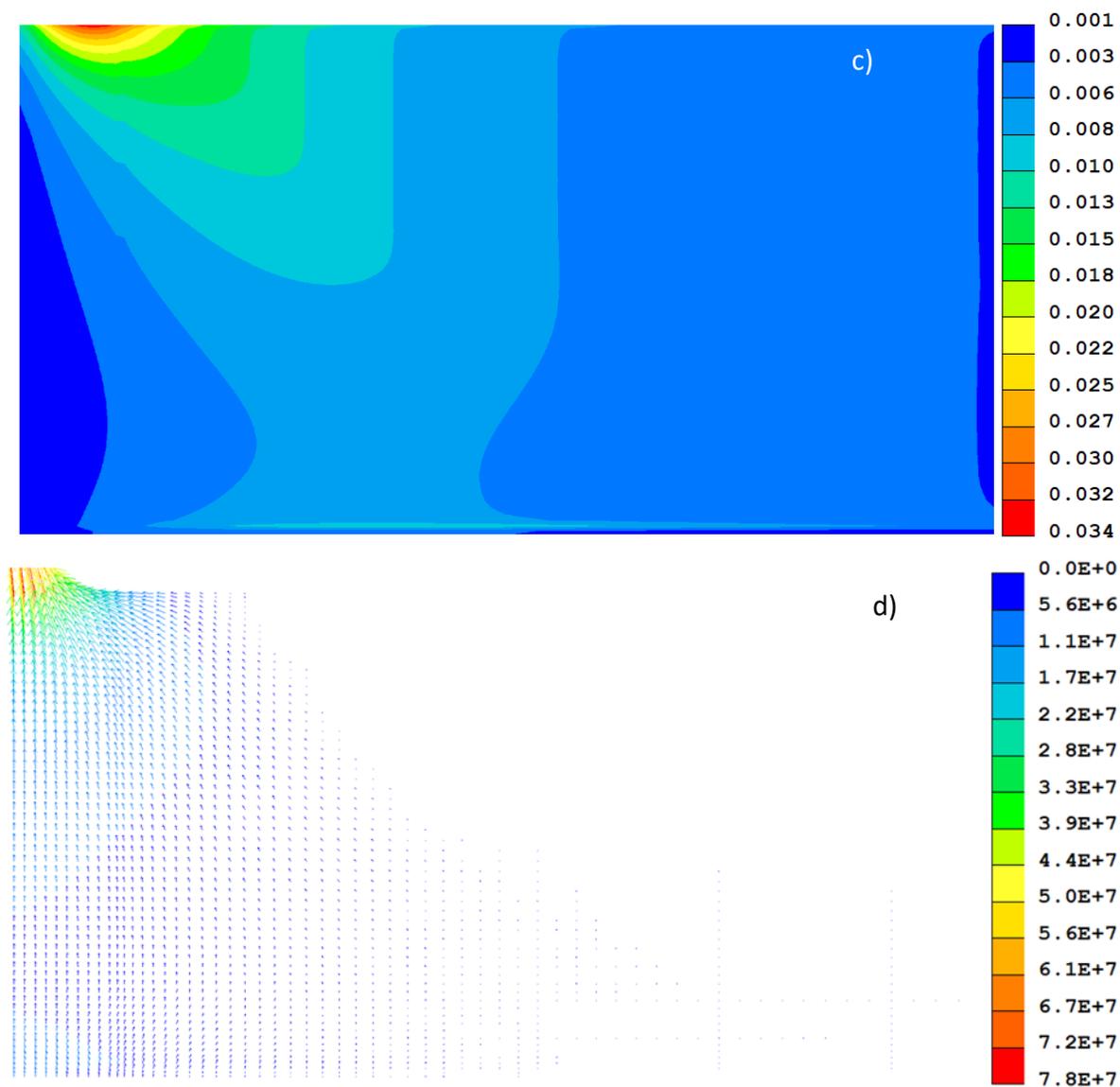


Figura 10. Resultados modelo numérico para Ar, $I=150$ A, $L=7$ mm. a) Mapa de temperatura [K], b) Campo vectorial de velocidad de plasma [m/s], c) Campo magnético [T], d) Campo vectorial de densidad de corriente del arco [A/m^2].

Tabla 2. Máximos de Temperatura, Velocidad y Presión del modelo numérico para Ar, $I = 150$ A, $L = 7$ mm

Temperatura		Velocidad		Presión	
Valor	Distancia desde el cátodo	Valor	Distancia desde el cátodo	Valor	Distancia desde el cátodo
19,700 K	0.0006 m	235 m/s	0.002 m	558.85 Pa	9.3E-10 m

En todos los trabajos reportados hasta el momento se ha tomado la isoterma de 10,000 K como la isoterma que define el radio del arco eléctrico de Ar [7,8 y 19], debido a que los límites de esta isoterma definen al arco que es ópticamente visible [7]. Evaluando la conductividad eléctrica del Ar, se observa que a 10,000 K este tiene un valor de 2,856 S/m mucho mayor a 0, por lo que extrapolando la conductividad eléctrica a un valor de 0 llegamos a un valor de temperatura de 7,200 K. El Ar empieza a conducir electricidad a los 7,200 K, por lo que se puede decir que existe un arco eléctrico a temperaturas mayores a esta, aunque este no sea ópticamente visible.

Para corroborar lo anterior se presenta en la Figura 11 los perfiles radiales de temperatura (Figura 11a) y conductividad eléctrica del arco (Figura 11b), a 4 alturas del arco representativas; la primera a una longitud de 0.0006 m acorde a la temperatura máxima, la segunda a 0.002 m acorde a la velocidad máxima y las últimas dos, distancias cercanas al ánodo (0.005 y 0.006 m). Al sobreponer el perfil radial de conductividad eléctrica sobre el perfil radial de temperatura (Figura 12) se puede observar que cuando la conductividad eléctrica es 0 se tiene una temperatura aproximadamente de 7,200 K, en el caso de las alturas cercanas al cátodo. Mientras más nos acerquemos al ánodo las temperaturas son un poco más altas de 7,200 K, ya que a estas alturas la transferencia de calor es dominada por el mecanismo de convección y no hay densidad de corriente eléctrica. De aquí, que podemos establecer que la isoterma de 7,200 K es el verdadero límite del arco de Ar con una intensidad de corriente de 150 A y 7 mm de longitud. Por lo que se evaluarán los diferentes comportamientos en el arco a 10,000 K y 7,200 K.

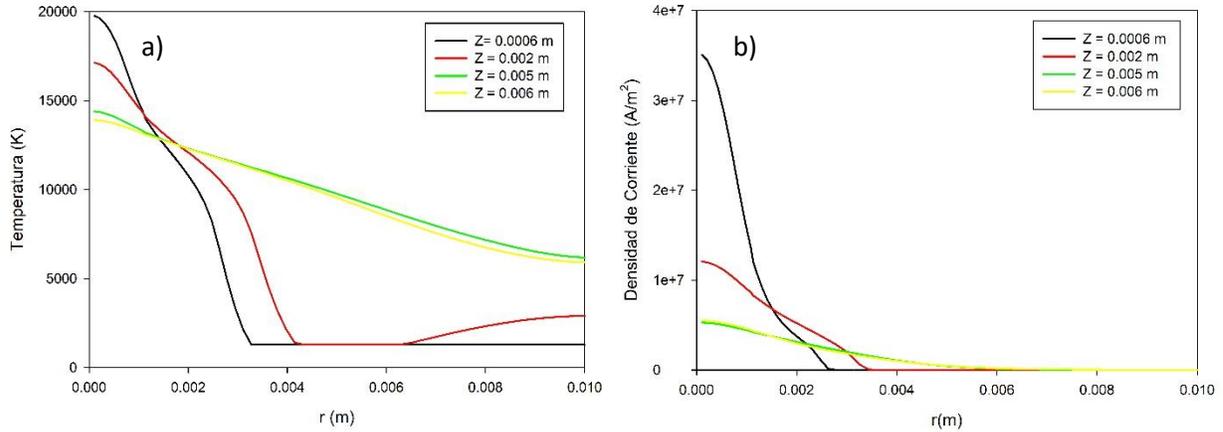


Figura 11. Perfiles radiales a $z = 0.0006\text{m}$, 0.002m , 0.005m y 0.006m de un arco de Ar, $I=150\text{ A}$ y $L=7\text{mm}$. a) Temperatura, b) Densidad de corriente

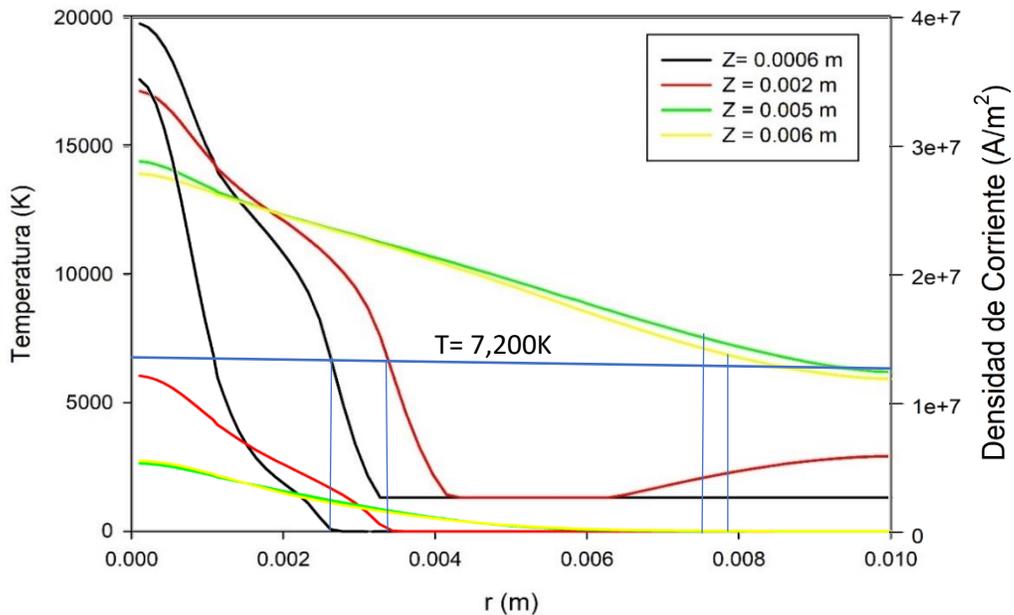


Figura 12 Perfiles radiales de temperatura y conductividad eléctrica sobrepuestas de un arco de Ar a $I=150\text{ A}$ y $L=7\text{ mm}$. Se muestra que, a una temperatura de $7,200\text{K}$ la conductividad eléctrica a las alturas de 0.0006 m y 0.002 m son prácticamente 0.

La Figura 13 muestra los mapas de contribución de energía para cada uno de los mecanismos de transferencia de calor presente en la columna del arco, siendo conducción (Figura 13a), convección (Figura 13b), efecto Joule (Figura 13c), efecto Thomson (Figura 13d) y radiación (Figura 13e). Estos contornos que se muestran ilustran un arco de Ar con $I=150\text{ A}$ y $L=7\text{mm}$, donde los valores positivos son las entradas de calor y los valores negativos las salidas de energía. Se muestran los límites del arco, discutidos

previamente, delimitados por las isotermas de 10,000 K (línea punteada) y de 7,200 K (línea sólida) para tomar en cuenta únicamente las contribuciones de los mecanismos de transferencia de calor que se encuentren dentro del arco. Solamente uno de los 5 mecanismos de transferencia de calor tiene una contribución 100% positiva en el calentamiento del arco, el efecto Joule, el cual contribuye en el calentamiento del arco en la zona cercana al cátodo debido a las altas densidades de corrientes presentes en esta zona (Figura 10c). Igualmente, un único mecanismo de transferencia de calor que tiene una contribución 100% en la remoción del calor, el cual es la radiación, concentrándose en el eje de simetría donde las temperaturas del arco son las máximas (Figura 10a). Tres mecanismos de transferencia de calor presentan tanto entradas como salidas en el balance de energía dentro del arco, efecto Thomson, convección y conducción. El efecto Thomson y conducción solo contribuyen cerca de los electrodos y no son importantes en la columna del arco. En el caso del efecto Thomson, estas pequeñas regiones de salidas de energía en el cátodo y entradas en el ánodo son casi imperceptibles, ya que están restringidas a una pequeña zona acoplada a los electrodos. La entrada de energía por convección del arco en el ánodo hacia el charco de soldadura es debido a las altas velocidades y temperaturas con las que el jet choca en este, mientras que se remueve energía cerca del cátodo por convección ya que se bombea gas frío a la columna del arco.

Estos mapas individuales de los mecanismos de transferencia de energía sugieren dominancia en ciertas regiones del arco por mecanismos específicos, tanto en la entrada como en la salida de energía.

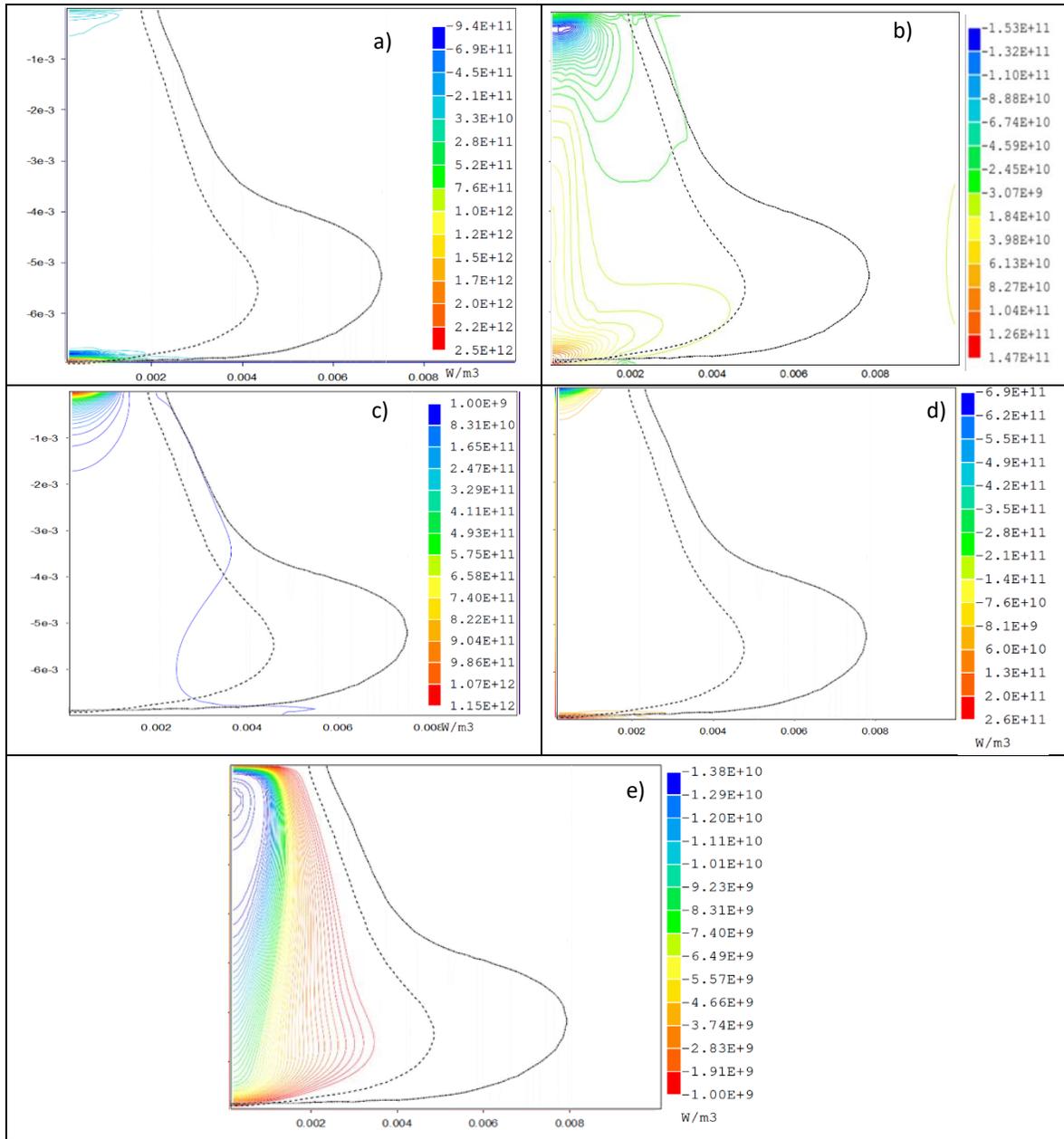


Figura 13. Mapas de predominancia para cada mecanismo de transferencia de calor dentro de la columna del arco. Entradas de calor tienen valores positivos y salidas de calor valores negativos. Condiciones del arco son gas de Ar, 150 A y 7 mm de longitud de arco. a) Conducción, b) Convección, c) Efecto Joule, d) Efecto Thomson, e) Radiación.

Con la finalidad de distinguir el mecanismo que tuviera el valor mayor de energía (en el caso de entrada de energía) o el menor (en el caso de salidas de energía) en cada una de las celdas del dominio de cálculo se desarrolló un programa en Matlab, el cual permitió distinguir para cada celda del dominio de cálculo el tipo de mecanismo de transferencia de calor dominante y poder ver el resultado visualmente.

En la Figura 14 se muestra un mapa indicando la mayor dominancia de cada uno de los mecanismos de transferencia de calor por cada celda, tanto de entrada como de salida de energía en el mismo arco de gas de Ar $I=150$ A y $L=7$ mm. Esta figura es más comprensible a simple vista denotando en que zonas son gobernantes cada uno de los mecanismos de entrada de energía (lado izquierdo del eje de simetría) y salida de energía (lado derecho del eje de simetría) al presentarlos de un color diferente a cada uno. La entrada de energía en el arco de cátodo a ánodo es dominada por el efecto Joule, después por convección y en el ánodo por efecto Thomson, mientras que las salidas de energía son gobernadas de cátodo a ánodo por el efecto Thomson, convección, radiación y conducción. Aunque esta representación ayuda a distinguir el principal mecanismo de transferencia de calor y de esta información cualitativa el balance de energía puede ser derivado de una forma simple, esta representación tiene muchos inconvenientes. Primero, las regiones que se encuentran fuera del arco no son de interés. El orden de magnitud de los valores de cada uno de los mecanismos es otro aspecto importante que no es posible percibir en la figura, como se muestra en la **Tabla 3** donde se encuentran todos los valores máximos y mínimos de cada mecanismo. Además, como se observa en la Figura 13 el calentamiento por efecto Joule tiene una gran importancia cercano al cátodo debido a las grandes concentraciones de densidades de corriente, en cambio, no tiene ninguna relevancia en zonas fuera del arco donde no hay flujo de corriente. Por lo tanto, la zona verde de la esquina superior izquierda de la Figura 14 no tiene significado físico alguno por lo que no es de interés. El mismo razonamiento se puede aplicar para la zona intermedia de lado derecho que representa al efecto Thomson que debe de ser casi 0.

Tabla 3. Valores máximos de entrada y salida de energía por cada mecanismo de transferencia de calor en el arco de Ar, $I=150$ A y $L=7$ mm.

	Conducción [W/m ³]	Convección [W/m ³]	Efecto Joule [W/m ³]	Efecto Thomson [W/m ³]	Radiación [W/m ³]
Entrada	2.46E+12	1.48E+11	1.15E+12	2.65E+11	0
Salida	9.38E+11	1.53E+11	0	6.91E+11	1.38E+10

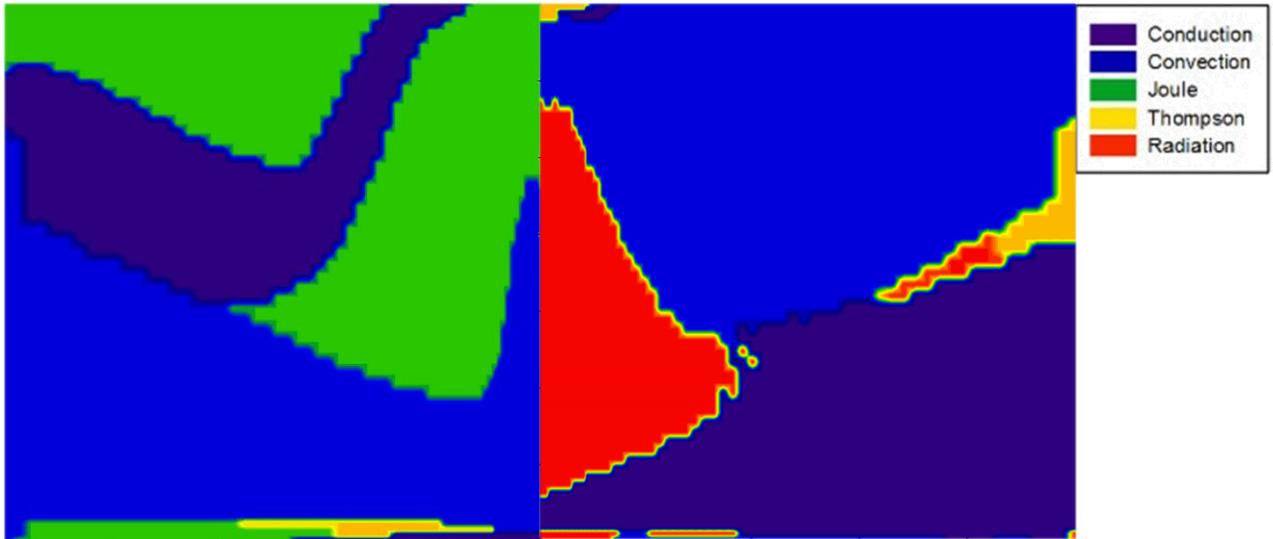


Figura 14. Mapa de predominancia para cada mecanismo de transferencia de calor, indicando por color que mecanismo tiene el valor más alto en cada celda (entradas lado izquierdo, salidas lado derecho).

Para superar los inconvenientes anteriormente mencionados de la Figura 14, en la Figura 15 se presenta el mismo arco, mostrando los mismos mapas de predominancia para todos los mecanismos de transferencia de calor que contribuyen a la entrada (izquierda) o salida de calor (derecha). Sin embargo, varias mejoras fueron implementadas en la Figura 14 para el mapa de la Figura 15. Primero, se definió el límite del arco donde la conductividad eléctrica era 0 (7,200 K) presentada como línea punteada, pero también la isoterma de 10,000 K es presentada como línea discontinua, la cual es ampliamente aceptada como el límite del arco, pero también coincide con el límite visible del arco. Segundo, la magnitud de cada uno de los mecanismos de transferencia de calor gobernante es incluida a través de una escala logarítmica de colores sólidos que se difuminan a blanco indicando su valor en W/m^3 . Para lograr esto se divide el valor del mecanismo gobernante entre el mayor valor del mismo mecanismo. Este procedimiento ayudó a eliminar todos los colores que se encontraban fuera del arco dado que las magnitudes de los mecanismos de transferencia de calor fuera del arco son mínimos a comparación de los valores dentro del arco. Cabe mencionar, en el límite de predominancia entre dos mecanismos, cuando estos tienen un 50% de predominancia, el color que se muestra es blanco ya que ambos son

igualmente predominantes, entonces en el límite de ambos no se muestra ninguna predominancia de ningún mecanismo de transferencia de calor. Finalmente, el hecho que un color predomine en cierta región no indica que sea el único mecanismo que esté actuando en esa región. Puede ser el caso que un mecanismo contribuya un 55% y otro mecanismo que no sea graficado al no ser el dominante contribuya un 45%. En términos prácticos, ambos mecanismos dominarían la entrada de energía, pero solo uno, el mayor contribuidor es graficado. Para incluir la importancia relativa de cada mecanismo de transferencia de calor con respecto a los demás mecanismos que no son graficados en el mapa, isolíneas de esta importancia relativa son incluidas. Por ejemplo, la isolínea de nombre de valor 0.8, significa que, en estas líneas, 80% de la entrada o salida de energía es debido al mecanismo de transferencia de calor predominante.

En resumen, este complejo mapa nos permite tener valiosa información: a) brinda la forma visible del arco, b) la forma del arco conductor, c) el mayor mecanismo de transferencia de calor (entradas izquierda y salida derecha) y su importancia relativa en cada celda comparada con su máximo valor en el dominio completo (escala logarítmica), y d) la importancia relativa de cada mecanismo comparado con el resto de los mecanismos en cada celda (isolíneas etiquetadas como 0.8 para 80% o 0.6 para 60% de predominancia).

En el caso particular del arco presentado en la Figura 13, la entrada de calor es dominada por la convección cerca del ánodo y efecto Joule cerca del cátodo, mientras que predomina la salida de calor del cátodo al ánodo por efecto Thomson (zona del spot del cátodo), conducción (región exterior del cátodo), convección, radiación y conducción cerca del ánodo. Es claro que el calor proviene del efecto Joule cerca del cátodo y que el jet de plasma juega un rol importante en calentar la columna del arco y transferir el calor al ánodo, mientras que la mayoría de la pérdida de calor en la columna del arco es debido a la radiación. También, las capas límites de momentum y calor son

la razón por la cual en el ánodo la convección y conducción son los principales mecanismos como resultado del choque y deflexión radial del jet formando ambas capas límites. Sin embargo, en el cátodo, las capas límites no dominan la transferencia de calor del arco, la cual es dominada por los mecanismos eléctricos de transferencia de calor, Joule (entrada) y Thomson (salida).

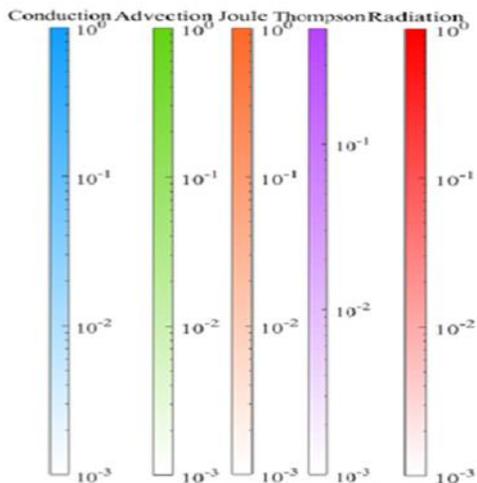
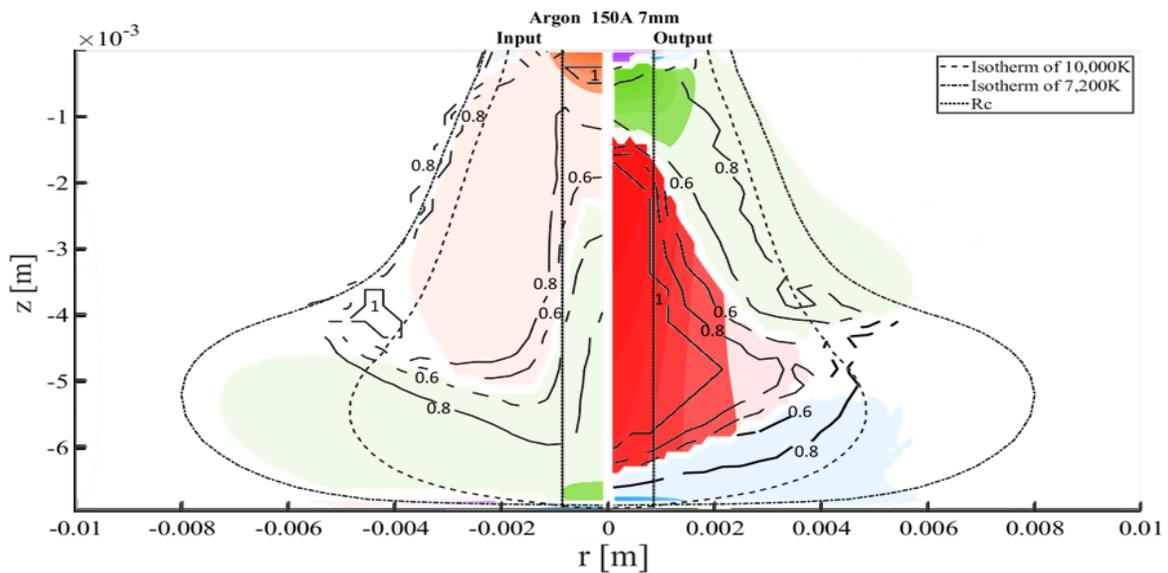


Figura 15. Mapa de predominancia de los mecanismos de transferencia de calor para tanto entradas como salidas de energía en un arco de Ar a $I=150$ A y $L=7$ mm. La escala logarítmica de colores para cada mecanismo representa el valor relativo de este mecanismo en todo el arco, mientras que las isólineas representan el grado de predominancia de este mecanismo respecto a los demás mecanismos. También, el límite de la zona de conducción del arco (7,200K) y el límite visible del arco (10,000K) son graficados.

Para comprender mejor el comportamiento de los mecanismos de transferencia de calor dentro del arco se hizo un estudio del efecto de la longitud de arco, intensidad de corriente y naturaleza del gas en el arco. Primero, para un arco de Ar se fijó la intensidad de corriente a 150 A y se

evaluó el efecto de la longitud de arco. En la Figura 16 se presenta el efecto de la longitud del arco en la zona relativa de predominancia del principal mecanismo de transferencia de calor en el arco a diferentes longitudes del arco, 5 mm (Figura 16a), 7 mm (Figura 16b) y 10 mm (Figura 16c). La distribución de energía tanto en la entrada como en la salida no varía significativamente con las variaciones en la longitud del arco. Dejando de lado las entradas de calor, la predominancia es la misma sin importar la longitud y muestra el calentamiento por efecto Joule en la parte superior del arco y convección en la región inferior de este. Similarmente, las salidas presentan un mapa de predominancia similar sin importar la longitud del arco, pero con una estructura más compleja. En el caso de salidas, cerca del cátodo, los mecanismos son Thompson en la región del spot del cátodo y conducción en la región de fuera de esta. Debajo del cátodo la convección es dominante y después la radiación es la principal pérdida de energía en la columna del arco. Finalmente, la conducción predomina cerca del ánodo. Por lo tanto, se puede decir que la longitud de arco no modifica en gran medida la predominancia de los mecanismos de transferencia de calor en la salida. Solo afecta en el tamaño de cada zona los cuales varían dependiendo de la longitud de arco. Lo mismo puede ser dicho para las entradas, exceptuando a la convección. La convección en el ánodo es más fuerte conforme la longitud del arco sea más pequeña. Esto se debe a que se tiene un choque del jet más inercial en el ánodo conforme la longitud del arco decrece.

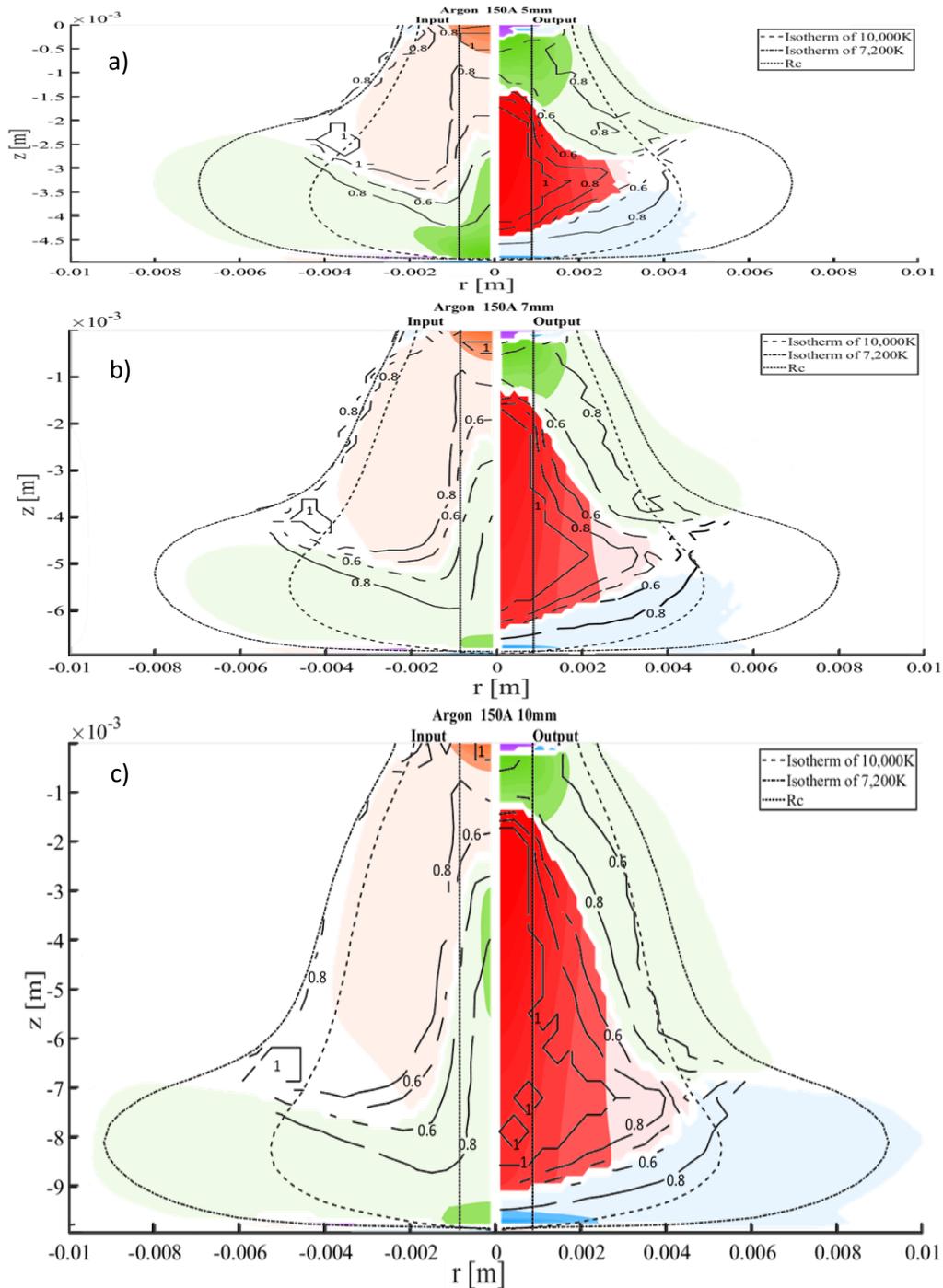


Figura 16. Efecto de la longitud del arco en la predominancia de los mecanismos de transferencia de calor en un arco de Ar a 150 A. a) 5 mm, b) 7 mm, c) 10 mm. Entradas izquierda, salidas derecha.

Las magnitudes máximas que se obtienen por cada mecanismo de transferencia de calor se muestran en la Tabla 4 y se grafican en la Figura 17, donde las líneas sólidas son entradas y las salidas son líneas discontinuas. De la figura 17 se observa que el mecanismo de conducción es

el que muestra el mayor efecto por la longitud, tanto en la entrada como en la salida, siendo mayor en la entrada que disminuye drásticamente por el aumento de la longitud del arco. Es de notarse que la longitud por conducción, cerca del ánodo, se ve afectada por los gradientes de temperatura; a menor gradiente de temperatura menor transferencia de energía por conducción. Sin embargo, es posible observar una disminución en la entrada de energía por efecto Joule; se mantiene una misma intensidad de corriente en los tres casos, pero la densidad de corriente presente cambia al irse deformando la malla cerca del cátodo por los cambios de longitudes. Por lo tanto, es posible decir que la longitud del arco solo afecta los valores de entrada y salida de conducción al presentar menores temperaturas del arco cerca del ánodo al aumentar la longitud de este.

Tabla 4. Efecto de la longitud de arco en los valores máximos de entrada y salida de energía por cada mecanismo de transferencia de calor en un arco de Ar, $I=150$ A.

Longitud de arco	Conducción [W/m^3]		Convección [W/m^3]		Ef. Joule [W/m^3]	
	Entrada	Salida	Entrada	Salida	Entrada	Salida
5 mm	3.87E+12	1.42E+12	2.19E+11	1.53E+11	1.28E+12	0
7 mm	2.46E+12	9.38E+11	1.48E+11	1.53E+11	1.15E+12	0
10 mm	5.23E+11	1.93E+11	4.31E+10	1.54E+11	9.83E+11	0
Longitud de arco	Ef. Thomson [W/m^3]		Radiación [W/m^3]			
	Entrada	Salida	Entrada	Salida		
5 mm	4.25E+11	8.36E+11	0	1.38E+10		
7 mm	2.65E+11	6.91E+11	0	1.38E+10		
10 mm	1.02E+11	5.39E+11	0	1.39E+10		

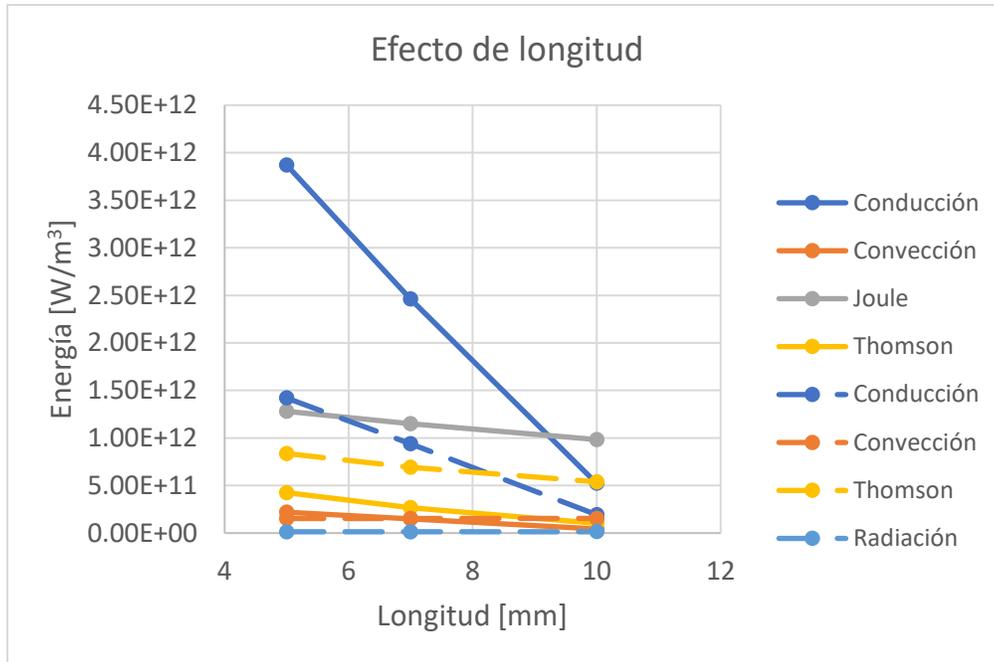


Figura 17. Efecto de la longitud del arco en los valores máximos de los mecanismos de transferencia de calor en un arco de Ar a 150A.

Adicionalmente, las figuras 18 y 19 muestran el efecto de la intensidad de corriente. La Figura 19 muestra el efecto de la intensidad de corriente en las zonas de predominancia relativa de los principales mecanismos de transferencia de calor en el arco; para un arco de Ar con una longitud de arco de 7 mm y diferentes corrientes del arco: 150 A (Figura 19a), 200 A (Figura 19b), 250 A (Figura 19c) y 300 A (Figura 19d). El mapa de distribución de predominancia en entradas y salidas de energía tiene la misma estructura sin importar la corriente del arco. El efecto de la corriente del arco radica en el cambio del tamaño de cada región. En el caso de entrada de energía conforme la corriente del arco aumenta el tamaño de las zonas del efecto Joule y la convección aumentan, siendo más intensos ambos mecanismos. Esto se debe a que el efecto Joule incrementa al cuadrado de la densidad de corriente, ya que las densidades de corriente son mayores en el cátodo que en el resto de la columna del arco. Además, el incremento en la corriente aumenta las fuerzas de Lorentz y esto provoca que el jet de plasma choque con mayor intensidad en el ánodo aumentando la convección. En el caso de

las salidas, las zonas no varían significativamente con el incremento de la corriente del arco, aunque es claro que se incrementa la intensidad de la salida de calor como se puede ver en la **Tabla 5** y en la Figura 18. Esto es cierto, de cátodo a ánodo, para los efectos Thomson, convección, radiación y conducción. El aumento de corriente incrementa el efecto Thomson y la temperatura. El incremento de temperatura a su vez incrementa la transferencia de calor por radiación. Mientras que el incremento de la corriente aumenta las fuerzas de Lorentz que incrementan la convección cerca del cátodo (salida) y cerca del ánodo (entrada), lo que afecta el balance de energía cerca del ánodo resultando en una reducción en la conducción con el incremento de la corriente. Como se observa en la Figura 18 no se tiene un cambio en el valor máximo en el efecto Joule, esto se debe a que se tiene una misma densidad de corriente en el cátodo por lo que al aumentar la intensidad de corriente disminuye la resistencia eléctrica del Ar dando como resultado un equilibrio.

Tabla 5. Efecto de la intensidad de corriente en los valores máximos de entrada y salida de energía por cada mecanismo de transferencia de calor en un arco de Ar, $L=7mm$.

Intensidad de corriente	Conducción [W/m^3]		Convección [W/m^3]		Ef. Joule [W/m^3]	
	Entrada	Salida	Entrada	Salida	Entrada	Salida
150 A	2.46E+12	9.38E+11	1.48E+11	1.53E+11	1.15E+12	0
200 A	2.08E+12	7.78E+11	3.12E+11	1.65E+11	1.15E+12	0
250 A	1.75E+12	6.35E+11	4.67E+11	1.81E+11	1.16E+12	0
300 A	1.77E+12	5.90E+11	5.80E+11	1.98E+11	1.16E+12	0
Intensidad de corriente	Ef. Thomson [W/m^3]		Radiación [W/m^3]			
	Entrada	Salida	Entrada	Salida		
150 A	2.65E+11	6.91E+11	0	1.38E+10		
200 A	2.36E+11	7.23E+11	0	1.46E+10		
250 A	2.01E+11	7.44E+11	0	1.78E+10		
300 A	1.65E+11	7.58E+11	0	2.19E+10		

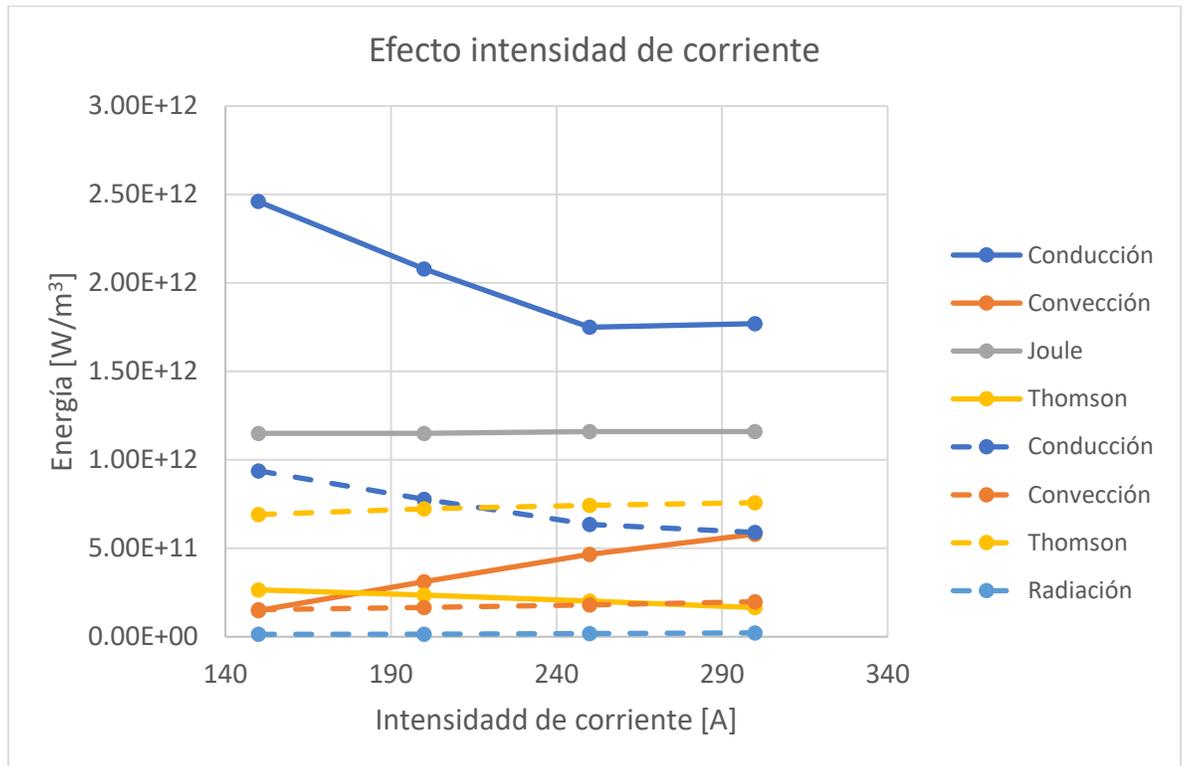
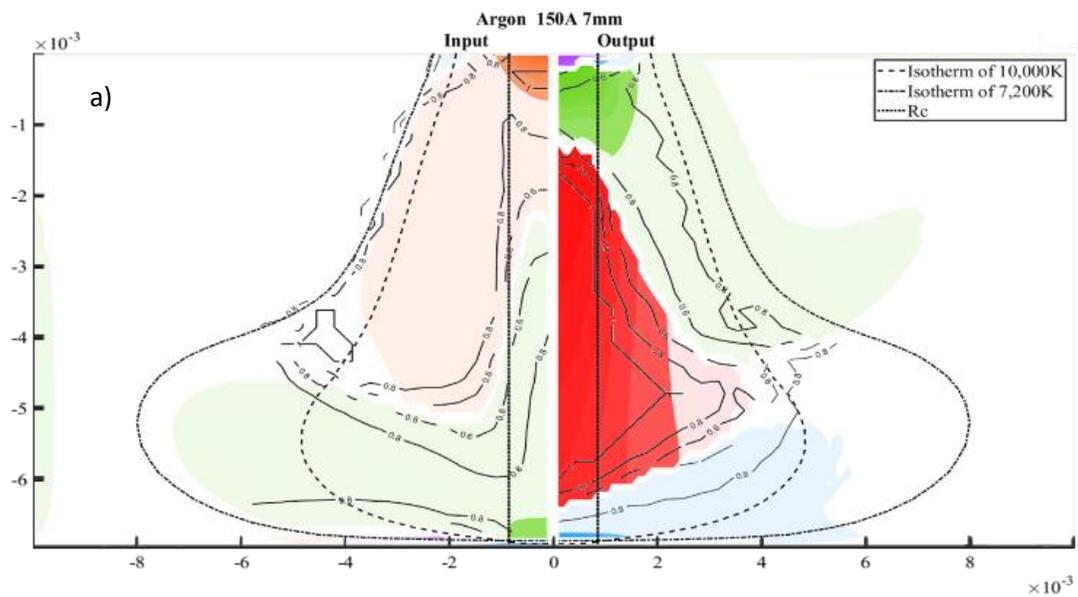


Figura 18. Efecto de la intensidad de corriente en los valores máximos de los mecanismos de transferencia de calor en un arco de Ar a 7mm.



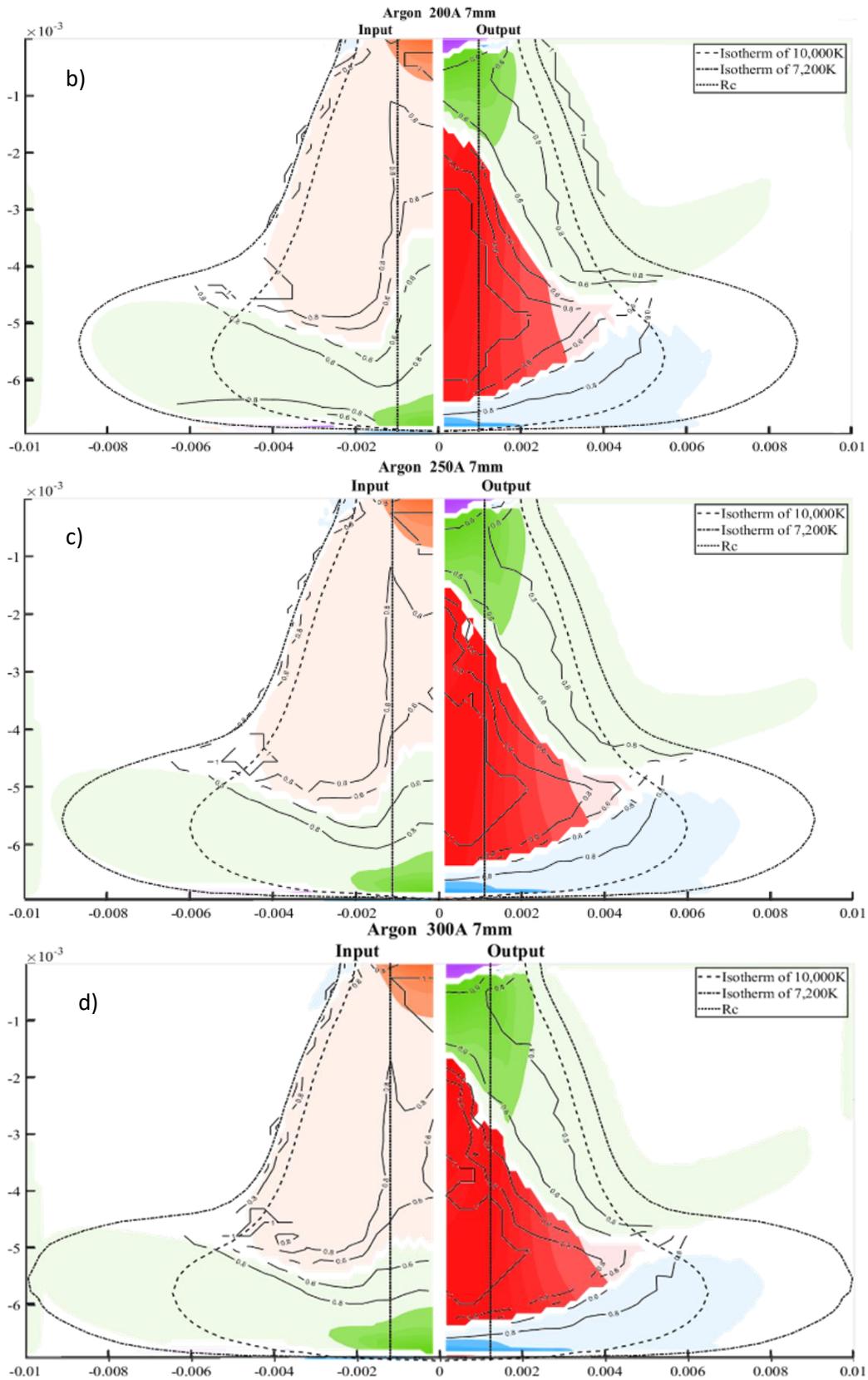


Figura 19. Efecto de la intensidad de corriente en la predominancia de los mecanismos de transferencia de calor en un arco de Ar a 7mm. a) 150 A, b) 200 A, c) 250 A, d) 300 A. Entradas izquierda, salidas derecha.

Finalmente, en las Figura 20 y 21 podemos ver el efecto de la composición de los gases de cobertura. La Figura 21 muestra el efecto en las zonas de predominancia relativa en los principales mecanismos de transferencia de calor en el arco, para un arco con $I=150$ A y $L=7$ mm de Ar (Figura 21a), y de He (Figura 21b). La composición del gas resulta ser el efecto más significativo en los mapas de predominancia de los mecanismos de transferencia de calor en el arco. La estructura de las entradas y salidas no cambian drásticamente comparando el Ar y el He, pero el tamaño y la intensidad de cada zona cambia drásticamente. Al comparar los valores del He y del Ar en la **Tabla 6** se puede observar una gran diferencia entre ambas, siendo esta la razón por la cual en la Figura 21 cada uno de los mapas tiene su propia escala. Al graficar los valores obtenidos se observa que la mayor diferencia se tiene en el efecto Joule del He, al ser 10 veces mayor que en el Ar (Figura 20). Esto se debe a que el He presenta una densidad de corriente mayor a la del Ar (aprox. 4 veces), cerca del cátodo.

Tabla 6. Efecto del gas de cobertura en los valores máximos de entrada y salida de energía por cada mecanismo de transferencia de calor en arcos de $I=150$ A y $L=7$ mm.

Gas de cobertura	Conducción [W/m^3]		Convección [W/m^3]		Ef. Joule [W/m^3]	
	Entrada	Salida	Entrada	Salida	Entrada	Salida
Ar	2.46E+12	9.38E+11	1.48E+11	1.53E+11	1.15E+12	0
He	2.67E+12	2.88E+12	7.74E+10	5.35E+11	2.64E+13	0
Gas de cobertura	Ef. Thomson [W/m^3]		Radiación [W/m^3]			
	Entrada	Salida	Entrada	Salida		
Ar	2.65E+11	6.91E+11	0	1.38E+10		
He	3.06E+10	9.54E+12	0	1.91E+9		

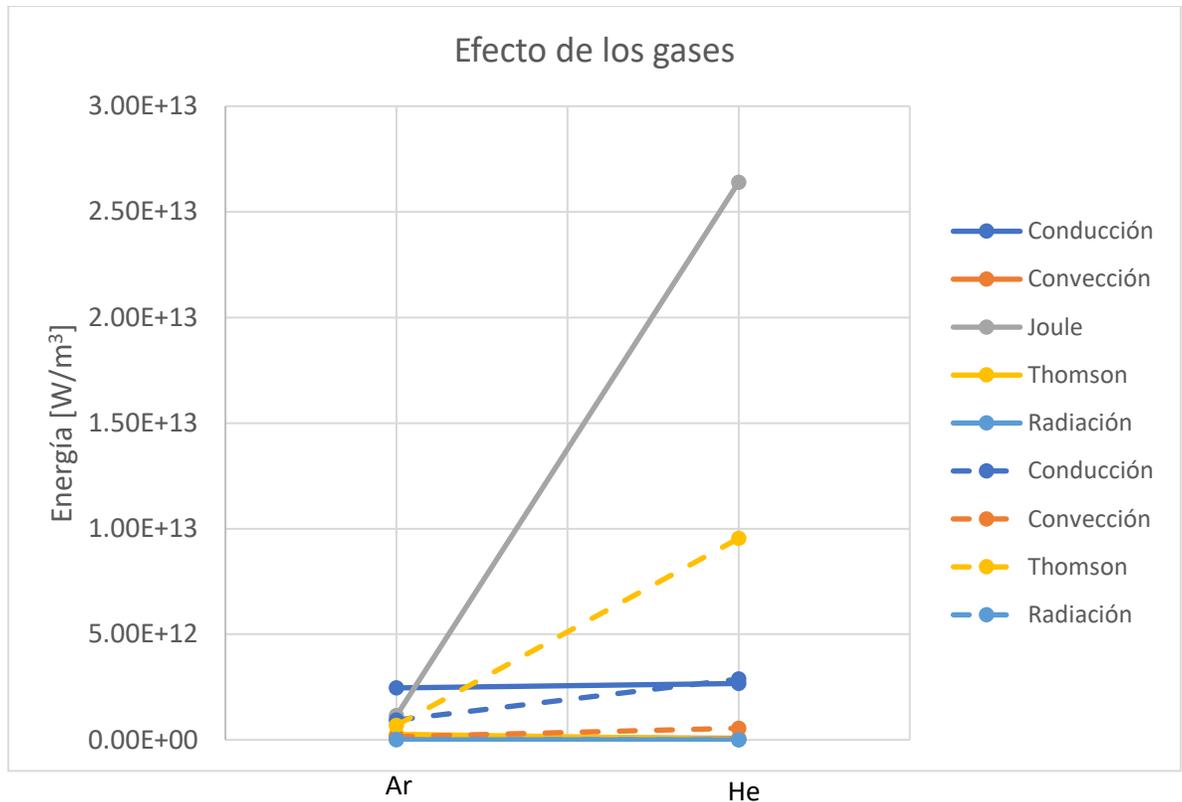


Figura 20. Efecto del gas de cobertura en los valores máximos de los mecanismos de transferencia de calor en un arco a 7mm y 150 A.

En cuanto a la estructura, la entrada de calor por efecto Joule y las salidas de calor por radiación y convección son más grandes en el Ar que en el He. En cambio, la pérdida de calor por conducción es mayor en el He que en el Ar y la dominancia de la entrada de calor por convección es cambiada hacia el ánodo en el Ar comparando con este mecanismo en el He. Las zonas predominantes en el He no son perceptibles en comparación con el arco de Ar, ya que las áreas blancas son mucho más grandes en el He siendo estas las áreas donde dos o más mecanismos compiten por la dominancia y no puede ser mostrada una zona de predominancia.

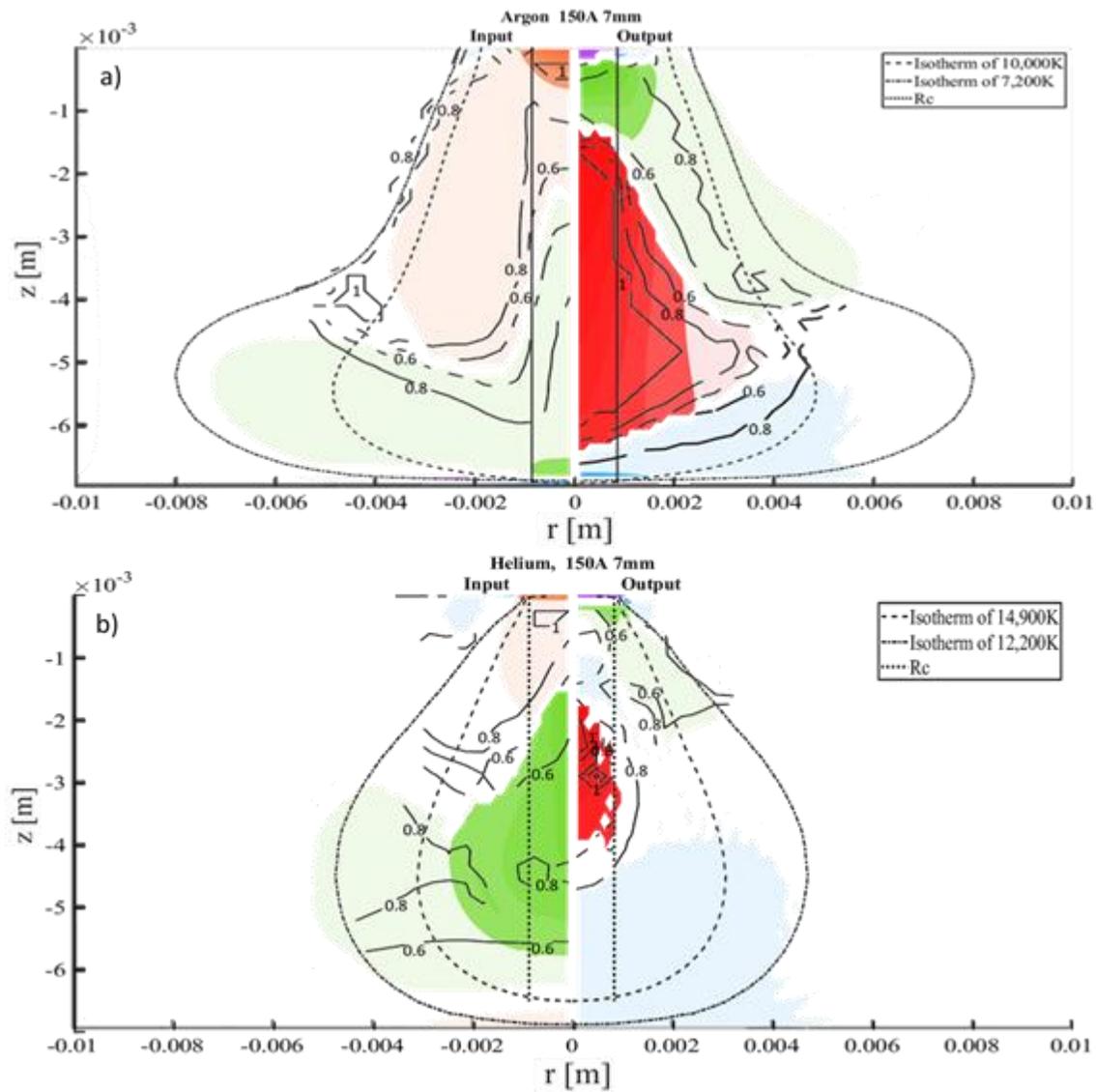


Figura 21. Efecto del gas de cobertura del arco en la predominancia de los mecanismos de transferencia de calor en un arco a $I=150$ A y $L=7$ mm. a) Ar, b) He. Entradas izquierda, salidas derecha.

Estas diferencias entre ambos mapas de predominancia de los mecanismos de transferencia de calor para cada gas pueden ser explicados al ver las propiedades físicas de ambos gases. Haciendo énfasis al calor específico, C_p (Figura 21b), conductividad térmica, k (Figura 21a), y conductividad eléctrica, σ (Figura 21c), se comportan bastante diferente en cuestión de la temperatura en la que los plasmas arden en Ar o He. Estas propiedades son mucho mayores en el He que en el Ar, por lo menos un orden de magnitud del C_p y K , el cual hacen a la temperatura del He más baja que la del Ar y los gradientes de temperatura en el He son más bajos también. Dado que la

temperatura es más baja en el He (18,000 K) que la del Ar (20,000 K), la conductividad eléctrica bajo las mismas condiciones del proceso es menor en el He y consecuentemente, las fuerzas de Lorentz son también menores en el He que para el Ar. El jet de He no está bien desarrollado hacia el ánodo, va desvaneciéndose al chocar con el ánodo, por lo que resulta que la entrada de energía por convección no es tan importante en el He, mientras que la convección es más fuerte cerca del ánodo en el Ar. De aquí que para el He la región de la radiación es más pequeña (temperaturas menores) y la conducción es mayor (alto k) en la salida de energía, respecto al Ar.

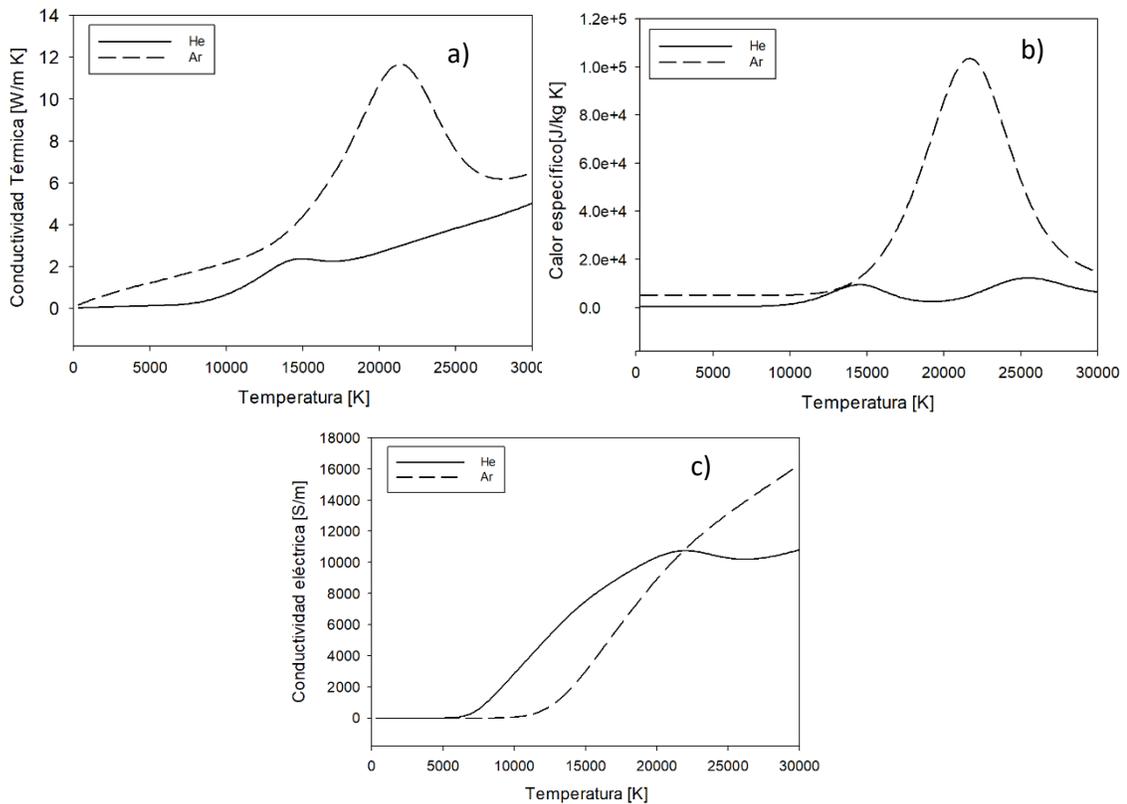


Figura 22. Propiedades en función de la temperatura de Ar y He. a) Conductividad térmica, b) calor específico, y c) conductividad eléctrica.

Para lograr un análisis cuantitativo de lo anteriormente discutido es necesario poder formular balances sencillos de energía a lo largo de la columna del arco. De aquí se vió la necesidad de poder evaluar a detalle la predominancia relativa que tienen los mecanismos de transferencia de calor en la entrada y en la salida. Para esto, se

desarrolló un análisis numérico a partir de la la Ec. 24 con la finalidad de alcanzar una predominancia mayor al 70%, tanto en la entrada como en la salida (Figura 23).

$$0.7 \leq \sqrt{\frac{(\text{entrada}^2 + \text{salida}^2)}{2}} \quad (\text{Ec. 24})$$

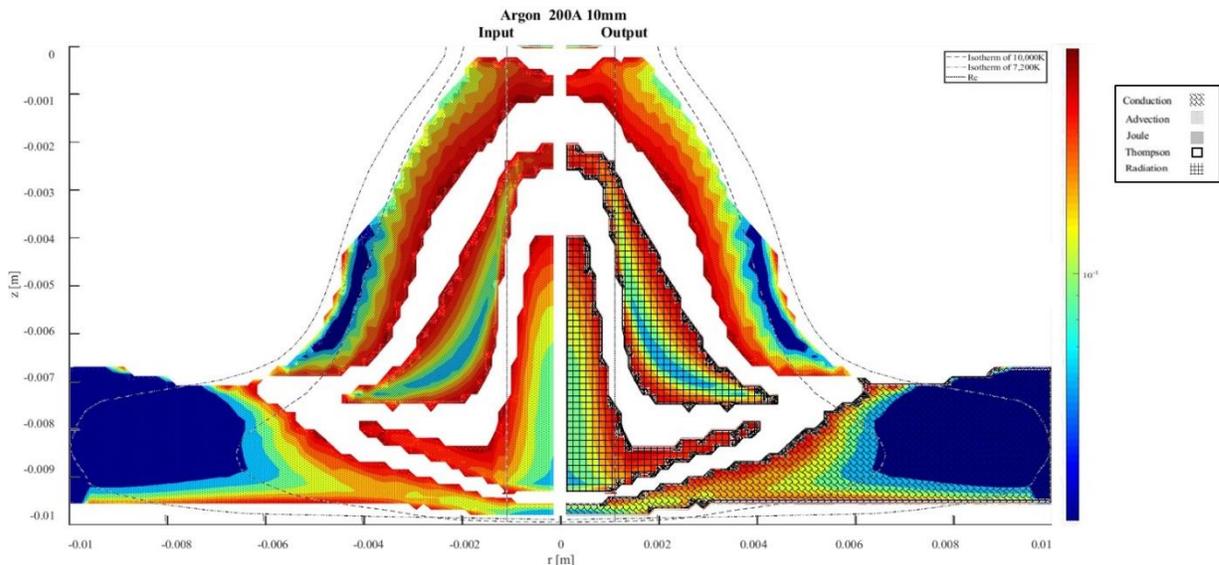


Figura 23. Mapa a 70% de predominancia de los mecanismos de transferencia de calor.

La Figura 23 sigue una escala logarítmica de colores que muestra la predominancia relativa de los mecanismos de transferencia de calor, siendo el color rojo predominancias del 70% y el azul predominancias del 100%. La estructura de los mecanismos no cambia pero las zonas de mecanismos se ven separadas; en el caso de las entradas el efecto Joule se divide en 3 y la convección en 2, para las salidas únicamente la radiación se dividió en 2. Por lo tanto se pueden ver 5 zonas de interés: 1) Cerca del cátodo, 2) parte superior de la columna del arco, 3) parte inferior de la columna del arco, 4) región externa de la columna del arco, 5) capa límite en el ánodo. En estas zonas, una simplificación del balance de conservación de energía puede ser obtenido con un solo término de entrada y de salida en la ecuación, y así poder derivar y predecir varias características del arco a partir de estos equilibrios de energía simplificados.

Los balances de cada una de las zonas son las siguientes: 1) Entrada Joule – Salida Thomson, 2) Entrada Joule – Salida Radiación, 3) Entrada Convección – Salida Radiación, 4) Entrada Joule – Salida convección, 5) Entrada Convección – Salida conducción (Figura 24).

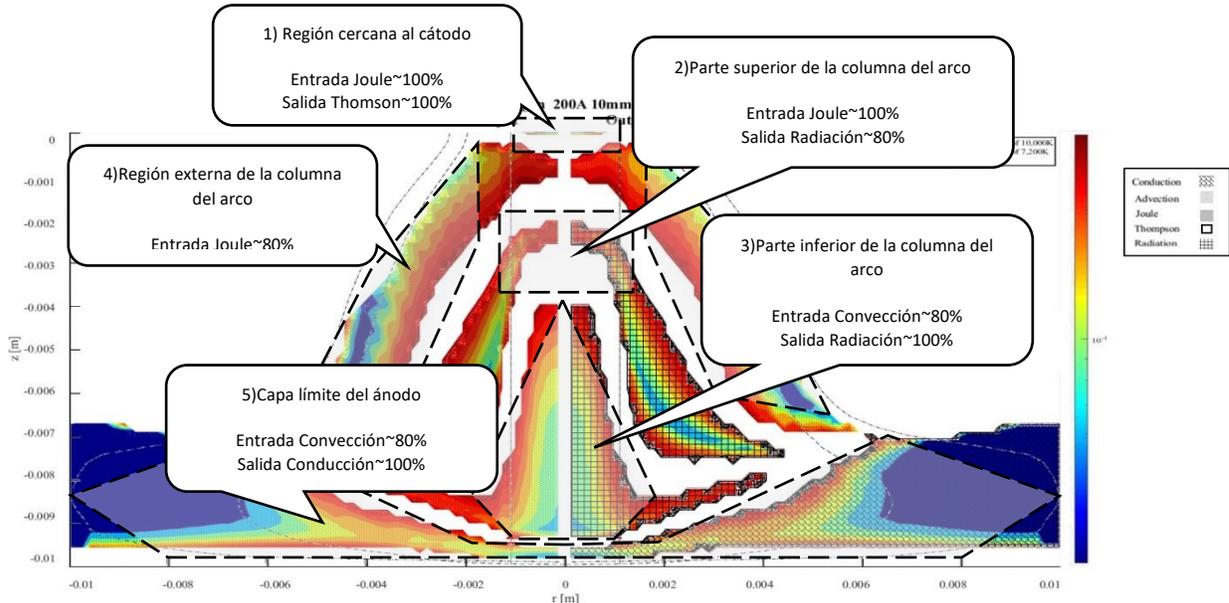


Figura 24. Zonas de interés donde el mecanismo de transferencia de calor es fuertemente dominante tanto de entrada como de salida. 1) Cerca del cátodo, 2) parte superior de la columna del arco, 3) parte inferior de la columna del arco, 4) región externa de la columna del arco, 5) capa límite en el ánodo.

Reescribiendo las ecuaciones 4 y 5 para que la ecuación de conservación de energía se vea completa queda de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}
 & \text{Acumulación} \quad \text{Convección} \\
 & \underbrace{\frac{\partial(\rho h)}{\partial t}} + \underbrace{\frac{\partial(\rho v_z h)}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial(\rho r v_r h)}{\partial r}} \\
 & = \underbrace{-\frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{k}{C_p} \frac{\partial h}{\partial z} \right) - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{kr}{C_p} \frac{\partial h}{\partial r} \right)}_{\text{Conducción}} + \underbrace{\frac{(J_z^2 + J_r^2)}{\sigma}}_{\text{Efecto Joule}} + \underbrace{\frac{5}{2} \frac{K_B}{e C_p} \left(J_z \frac{\partial h}{\partial z} + J_r \frac{\partial h}{\partial r} \right)}_{\text{Efecto Thomson}} - \underbrace{S_r}_{\text{Radiación}}
 \end{aligned}
 \tag{Ec.25}$$

Es posible realizar los balances simples de la ecuación de conservación de energía eliminando los términos de los mecanismos de transferencia de calor que no dominan fuertemente en las 5 zonas de interés. Por lo que los balances propuestos quedarían de la siguiente manera dependiendo la zona.

$$1) \quad 0 = \frac{(J_z^2 + J_r^2)}{\sigma} + \frac{5}{2} \frac{K_B}{e C_p} \left(J_z \frac{\partial h}{\partial z} + J_r \frac{\partial h}{\partial r} \right) \tag{Ec.26}$$

$$2) \quad 0 = \frac{(J_z^2 + J_r^2)}{\sigma} - S_r \tag{Ec.27}$$

$$3) \frac{\partial(\rho v_z h)}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial(\rho r v_r h)}{\partial r} = -S_r \quad (\text{Ec.28})$$

$$4) \frac{\partial(\rho v_z h)}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial(\rho r v_r h)}{\partial r} = \frac{(J_z^2 + J_r^2)}{\sigma} \quad (\text{Ec. 29})$$

$$5) \frac{\partial(\rho v_z h)}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial(\rho r v_r h)}{\partial r} = -\frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{k}{c_p} \frac{\partial h}{\partial z} \right) - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{kr}{c_p} \frac{\partial h}{\partial r} \right) \quad (\text{Ec. 30})$$

Con estas ecuaciones debería de ser posible predecir características físicas del arco, siempre y cuando se posean los valores necesarios para la resolución de estas, la cual requiere un trabajo analítico extenso. Con el fin de comprobar esto se hizo un primer intento en la resolución de la zona cercana al cátodo, Ec. 26, sobre el eje de simetría para la facilidad del cálculo eliminando todos los términos en función a r , a un $z=0$ ya que a estas coordenadas es conocida la densidad de corriente $J_z = J_c$ siendo esta de $6.5 \times 10^7 \text{ A/m}^2$. Por la naturaleza de la técnica de resolución del modelo numérico, se tienen los valores del centro de la celda por lo que no es posible conocer los valores en la frontera de esta, por esto se tomó una temperatura de 12,000 K siendo esta la temperatura que se tiene cuando el plasma ya está formado, al tener un arco de Ar es posible conocer el valor de su C_p y conductividad eléctrica a esta temperatura Figura 21b y 21c respectivamente. Quedando la ecuación a resolver de la siguiente manera:

$$-\frac{5}{2} \frac{K_B}{e c_p} \left(J_c \frac{\partial h}{\partial z} \right) = \frac{J_c^2}{\sigma} \quad (\text{Ec.26a})$$

$$\left(\frac{\partial h}{\partial z} \right) = -\frac{2 J_c e c_p}{5 \sigma K_B} \quad (\text{Ec.26b})$$

donde $K_B = 1.38 E^{-23} \frac{\text{J}}{\text{K}}$, $e = -1.6 E^{-19} \text{C}$, $c_p = 4.54 E^3 \frac{\text{J}}{\text{kgK}}$, $\sigma = 4.85 E^3 \frac{\text{S}}{\text{m}}$,
 $J_c = 6.5 E^7 \text{A/m}^2$. Dando como resultado lo siguiente:

$$\left(\frac{\partial h}{\partial z} \right) = 3.56 \times 10^{11} \text{J/kgm}$$

Con la finalidad de obtener las propiedades físicas del arco se realizó la integración con respecto a z , tomando como Δz la altura de la celda. Al obtener un valor de $h = 2.14 E^7 \text{J/kg}$ el cual se dividió por el C_p del Ar dando como resultado una temperatura de:

$$T_{r=0, z=0} = 4,708 \text{K}$$

Como se mencionó anteriormente por la técnica de solución no es posible conocer experimentalmente $T_{r=0,z=0}$, pero se puede saber la

$T_{r=\frac{\Delta z}{2},z=-\frac{\Delta z}{2}} = 12,263K$ que sería la temperatura de la celda más cercana.

Es necesario un análisis matemático más detallado sobre los resultados obtenidos. Se sabe, por toda la literatura revisada, que la temperatura en esta posición debe ser menor al valor obtenido por el modelo, pero nunca se ha reportado un valor exacto, por lo que no se tiene un valor de comparación. Además, al estar tan cerca del cátodo el modelo pierde precisión, ya que hay efectos de la capa catódica que no se toman en cuenta.

Un tratamiento similar se le puede dar a las ecuaciones 27 a 30, pero son necesarios cálculos de velocidades y densidades de corriente a lo largo de la columna del arco lo cual no es tan trivial. Un trabajo a futuro se centrará en la resolución de los balances propuestos y comprobación de la veracidad de estos. No está de más decir que los resultados obtenidos brindaron un mejor entendimiento de los mecanismos de transferencia de calor dentro del arco de soldadura, algo que no se tenía.

4. Conclusiones

A partir de los resultados del modelo matemático, fue posible obtener las contribuciones de entrada y salida de energía de cada uno de los mecanismos de transferencia de calor en W/m^3 en cada celda del dominio de cálculo.

Se lograron obtener mapas de predominancia de los mecanismos de transferencia de calor siguiendo la siguiente estructura: Para las entradas de cátodo a ánodo, efecto Joule y convección, y para las salidas de cátodo a ánodo, efecto Thomson, convección, radiación y conducción.

Se observó que la estructura de los mapas de predominancia no se ve afectada por diferentes longitudes de arco e intensidades de corriente, pero es afectada por la composición del gas de cobertura.

Los únicos efectos que se tienen por diferentes intensidades de corriente y longitudes de arco son la variación de las magnitudes de los mecanismos de transferencia de calor y la variación del tamaño de cada zona de predominancia.

El efecto del gas de cobertura es la variable más grande en cuanto a los mapas de predominancia, al afectar la magnitud de los mecanismos de transferencia de calor, tamaño de cada zona de predominancia y la estructura en la que se presentan los mecanismos dentro de la columna del arco. Dando como resultado una naturaleza diferente dependiendo del gas de cobertura.

Se muestran 5 zonas de interés en la columna del arco: 1) cerca del cátodo; 2) parte superior de la columna del arco; 3) parte inferior de la columna del arco; 4) región externa de la columna del arco; 5) capa límite en el ánodo, donde se proponen en cada una de las zonas un balance simplificado de la ecuación de conservación de energía.

Con el balance simplificado cerca del cátodo fue posible calcular una temperatura del arco a $r=0$ y $z=0$, teniendo un valor de 4,708 K. Lo que

establece la posibilidad de obtener características físicas del arco con los balances simplificados propuestos.

5. Bibliografía

- 1) Norrish, J. Advanced Welding processes. (1992) Institute of Physics Publishing, Bristol
- 2) Rajput, R.K. A Textbook of Manufacturing Technology: Manufacturing Processes. (2007) LAXMI Publications. Boston, USA.
- 3) AWS, American Welding Society; Welding Handbook V. 1 8 ed.; TS227; W454
- 4) ASM Handbook; Welding Brazing and Soldering; TT211 W45, V6.
- 5) Ramakrishnan, S., Stokes, A.D., Lowke, J.J., An approximate model for high-current free-burning arcs (1978) J. Phys. D: Appl. Phys., 11, pp. 2267-2280.
- 6) McKelliget, J., Szekely, J., Heat transfer and fluid flow in the welding arc (1986) Metall. Mater. Trans A 17A, pp. 1139-1148.
- 7) Goldak, J., Bibby, M., Moore, J., House, R., Patel, B., Computer modeling of heat flow in welds (1986) Metall. Tran. B 17B, pp. 587-600.
- 8) Dilawari, A.H., Szekely, J., Westhoff, R., An assessment of the heat and fluid flow phenome inside plasma torches in non-transferred arc systems (1990) ISIJ International, 30, pp. 381-389.
- 9) Lowke J.J., Morrow R., Haidar J., A simplified unified theory of arcs and their electrodes and their electrodes (1997) J. Phys. D: Appl. Phys., 30, pp. 2033-2042.
- 10) Tanaka, M., Terasaki, H., Ushio, M., Lowke, J.J., A unified numerical modelling of stationary tungsten-inert-gas welding process (2002) Metall. Mater. Trans. A 33A, pp. 2043-2052.
- 11) Nestor, O., Heat intensity and current distributions in gas tungsten arcs (1988) Supplement of Welding Journal, pp. 29-34.
- 12) Hsu, K.C., Etemadi, K., Pfender, E., Study of the free-burning high-intensity argon arc (1982) J. Appl. Phys., 54, pp. 1293-1302.

- 13) Eagar TW., An iconoclast's view of the physics of welding—rethinking old ideas. In: David SA, Vitek JM (Eds) 2nd international conference on trends in welding research, Gatlinburg, Tennessee, (1989) ASM International, Materials Park, OH, USA, pp. 341–346.
- 14) Ramírez-Argáez, M.A., Trapaga, G., McKelliget, J., A comparison between different numerical formulations for welding arc representations (2004) Journal of Mat. Process. Tech., 155-156, pp. 1634-1640.
- 15) Gleizes, A., Gonzalez, J.J., Freton, P., Thermal plasma modelling (2005) J. Phys. D: Appl Phys., 38, pp. 153-183.
- 16) Murphy, A.B., Lowke, J.J., Heat Transfer in Arc Welding. (2007) Kulacki F.(eds) Handbook of Thermal Science and Engineering. Springer, Cham
- 17) Murphy, A.B., A Perspective on Arc Welding Research: The Importance of the Arc, Unresolved Questions and Future Directions (2015) Plasma Chem Plasma Process, 35, pp.471–489
- 18) Murphy, A.B., Thermal plasmas in gas mixtures (2001) J. Physics D: Applied Physics, 34(20), pp. R151-R173.
- 19) Terasaki, H., Tanaka, M., Ushio, M., Effects of metal vapor on electron temperature in helium gas tungsten arcs (2002) Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science, 33(4), pp. 1183-1188.
- 20) Murphy, A.B., Tanaka, M., Yamamoto, K., Tashiro, S., Modelling of thermal plasmas for arc welding: the role of the shielding gas properties and of metal vapour (2009) Journal of Physics D: Applied Physics, 42(19).
- 21) Lowke, J.J., Morrow, R., Haidar, J., A simplified unified theory of arcs and their electrodes (1997) J. Physics D: Applied Physics, 30(14), pp.2033–2042.
- 22) Alireza, J.S., Choquet, I., A review of cathode-arc coupling modeling in GTAW (2016) Weld World, 60, pp. 821-835

- 23) Baeva M., Non-equilibrium modeling of tungsten-Inert gas arcs (2017) Plasma Chem Plasma Process.
- 24) Chen, F.F., Xiang, J., Thomas, D.G., Murphy, A.B., Model-based Parameter Optimization for Arc Welding Process Simulation (2019) Applied Mathematical Modelling
- 25) Pichot, F., Danis, M., Lacoste, E. Numerical definition of an equivalent GTAW heat source (2013) J. Mater. Proc. Technol., 213 (7), pp. 1241-1248.
- 26) Pan, J.J., Yang, L.J., Hu, S.S., Numerical Analysis of keyhole formation and collapse in variable polarity plasma arc welding (2017) Int. J. Heat Mass Transf. 109, pp. 1218-1228.
- 27) Ai, Y., Jiang, P., Shao, X., A three-dimensional numerical simulation model for weld characteristics analysis in fiber laser keyhole welding (2017) Int. J. Heat Mass Transf. 108, pp. 614-626.
- 28) Nezamdost, M.R., Esfahani, M.R.N., Hasemi, S.H., Investigation of temperature and residual stresses field of submerged arc welding by finite element method and experiments (2016) Int. J. Adv. Manuf. Technol. 87 (1-4), pp. 615-624.
- 29) García-García, V., Camacho-Arriaga, J.C., Reyes-Calderón, F., A simplified elliptic paraboloid heat source model for autogeneous GTAW process (2016) Int. J. Heat Mass Transf. 100, pp. 536-549.
- 30) Liu, K., Yang, F., Wang, S., Gao, B., Xu, C., The research on the heat source characteristics and the equivalent heat source of the arc in gaps (2018) Int. J. Heat Mass Transf. 124, pp. 177-189.
- 31) Ramírez, M.A., Trapaga, G., McKelliget, J., A comparison between two different numerical formulations of welding arc simulation (2003) Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering, 11 (4), pp. 675-695.
- 32) Ushio, Szekely, J., Chang, C.W., Mathematical Modeling of flow field and heat transfer in high-current arc discharge. Ironmaking and Steelmaking, 1983. 10(4): p. 169-179

33) Delgado-Álvarez, A., Mendez, P.F., Ramírez-Argáez, M.A., Dimensionless representation of the column characteristics and weld pool interactions for a DC argon arc (2019) *Science and Technology of Welding and Joining*, 24 (7), pp. 634-643.