

**Simulación de un sistema generador de chorro de plasma en software
multifísico, COMSOL Multiphysics®**

Juan Pablo Diaz Portilla

Trabajo de grado para optar al título de Físico

Director

Eduardo Alberto Orozco Ospino

PhD en Ciencias Naturales (Física)

Codirector

Yerson Fabian Barragan Jimenez

MSc(c) en Física

Universidad Industrial de Santander (UIS)

Facultad de Ciencias

Escuela de Física

Física

Bucaramanga

2025

Dedicatoria

A Dios, por ser la guía y fortaleza en cada paso.

A mi mamá, por su amor infinito y su fe inquebrantable en mí.

A mis hermanos, en especial a Jorge Alberto.

Tu apoyo incondicional fue fundamental en este camino. Gracias, porque pagaste por mí cuando no pude, ¡y no me cobraste cuando tuve! Tu generosidad y confianza fueron el impulso que necesité para llegar hasta aquí.

Agradecimientos

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas e instituciones que hicieron posible la culminación de este trabajo de grado.

En primer lugar, a la Universidad Industrial de Santander (UIS) y a la Escuela de Física, por brindarme una formación académica de excelencia y por los recursos que pusieron a mi disposición.

A mi director, el PhD. Eduardo Alberto Orozco Ospino, por su invaluable guía, su paciencia y su rigor científico. Sus conocimientos y experiencia fueron clave para llevar este proyecto a buen término y para mi crecimiento como futuro físico.

A mi codirector, Yerson Fabian Barragan Jimenez, por su constante disposición, sus valiosas recomendaciones y por el tiempo dedicado a la revisión de este trabajo.

A todos los profesores que formaron parte de mi carrera, por compartir sus conocimientos y despertar mi pasión por la ciencia.

Finalmente, un agradecimiento especial a mi familia y amigos, por su apoyo, su comprensión y por animarme en los momentos de mayor dificultad. Sin ustedes esta meta no habría sido posible.

Resumen

Título: Simulación de un sistema generador de chorro de plasma en software multifísico, COMSOL Multiphysics[®] versión 5.6.

Autor: Juan Pablo Diaz Portilla

Palabras clave: “Simulación multifísica”, Antorcha, Plasma,

La implementación del plasma en diversas tecnologías ha demostrado tener potencial para el desarrollo de nuevas técnicas aplicadas en una gran variedad de sectores industriales. Un ejemplo es el chorro de plasma de arco eléctrico, ampliamente utilizado en el tratamiento de desechos mediante proceso de gasificación de residuos sólidos urbanos. Además, en la última década los avances sustanciales en el desarrollo de modelos de propulsores eléctricos y su generación han abierto una era tecnológica hacia la exploración espacial, debido a que exhiben niveles de eficiencia altos en comparación con sus homólogos químicos, dado que los propulsores eléctricos pueden generar mayor propulsión específica. Los chorros de plasma se generan a partir de un arco eléctrico entre electrodos y a través de un gas base, dicho gas se expande al ser calentado mediante colisiones entre los electrones del arco y las partículas neutras del gas. El plasma es expulsado fuera de la antorcha, transfiriendo así energía y momento al medio externo. En este proyecto se presenta el modelo y simulación de una antorcha de plasma de arco eléctrico no transferido de corriente continua, con simetría axial y electrodos coaxiales en software multifísico. Se estudia el encendido de la antorcha y el estado estacionario del potencial eléctrico, la distribución de rapidez y temperatura. Se realiza el estudio con diferentes valores de la densidad de corriente, flujo másico de entrada y tres gases de trabajo. Los resultados muestran que el flujo másico y la densidad de corriente determinan la ubicación y magnitud de la zona de máxima temperatura y rapidez del fluido. Se observa que la dependencia de las propiedades del gas de trabajo influye en el perfil de temperatura y rapidez del fluido, siendo el argón el que presenta las mayores temperaturas y velocidades. El modelo es capaz de simular el encendido del plasma y su estado estacionario, lo que permite comprender mejor el comportamiento del chorro de plasma en diferentes condiciones operativas.

Abstract

Title: Simulation of a plasma jet generating system in multiphysics software, COMSOL Multiphysics® version 5.6.

Author: Juan Pablo Diaz Portilla

Keywords: “Multiphysics simulation”, Torch, Plasma,

The implementation of plasma in various technologies has demonstrated potential for the development of new techniques applied in a wide variety of industrial sectors. One example is the electric arc plasma jet, widely used in waste treatment through the gasification process of municipal solid waste. Furthermore, in the last decade, substantial advances in the development and generation of electric propellant models have opened a technological era for space exploration, due to their high levels of efficiency compared to their chemical counterparts, given that electric propellants can generate greater specific propulsion. Plasma jets are generated from an electric arc between electrodes and through a base gas. This gas expands when heated by collisions between the electrons in the arc and the neutral particles of the gas. The plasma is expelled outside the torch, thus transferring energy and momentum to the external medium. This project presents the model and simulation of a direct current non-transferred electric arc plasma torch with axial symmetry and coaxial electrodes in multiphysics software. The torch ignition and steady-state electric potential, velocity, and temperature distribution are studied. The study is performed with different values of current density, inlet mass flow rate, and three working gases. The results show that mass flow rate and current density determine the location and magnitude of the region of maximum fluid temperature and velocity. It is observed that the dependence on the working gas properties influences the fluid's temperature and velocity profile, with argon exhibiting the highest temperatures and velocities. The model is capable of simulating plasma ignition and steady-state, allowing for a better understanding of plasma jet behavior under different operating conditions.

Índice

Introducción	16
Importancia en la industria	16
Fundamentos técnicos	18
Método de estudio científico	19
1. Estado del arte	21
1.1. Áreas de aplicación y parámetros de funcionamiento	21
1.2. Antecedentes científicos	27
2. Marco teórico	29
2.1. Naturaleza del plasma	29
2.2. Sistema de ecuaciones del modelo	32
2.3. El campo eléctrico (modulo AC/DC)	33
2.4. Flujo laminar de fluidos (modulo CFD)	34
2.5. Transferencia de calor en fluidos (modulo HT)	35
2.6. Acoples multifísicos	38
2.6.1. Fuente de calor de descarga de equilibrio	38
2.6.2. Fuente de calor de descarga de equilibrio en superficie (cátodo)	39
2.6.3. Fuente de calor de descarga de equilibrio en superficie (ánodo)	40
2.7. Método de solución utilizado por COMSOL multiphysics® v.5.6.	41
3. Metodología	42

SIMULACIÓN MULTIFISICA DE ANTORCHA CON COMSOL

3.1. Flujo de trabajo en COMSOL Multiphysics®	42
3.2. El sistema físico y las condiciones iniciales y de contorno	43
4. Resultados y discusión	48
4.1. Evolución temporal de la temperatura durante el encendido de la antorcha	48
4.2. Perfil de temperatura de las antorchas de plasma en estado estacionario	55
4.3. Perfil de rapidez de fluido en la antorcha	59
4.4. Perfil de potencial eléctrico en la antorcha	61
4.5. Influencia de los parámetros de entrada sobre la evolución del perfil de temperatura durante la ignición	62
4.5.1. Evolución de la temperatura para los diferentes valores de parámetros	63
4.5.2. Distribución de la temperatura en las tres geometrías durante los primeros instantes para las diferentes combinaciones de parámetros	69
4.5.3. Estudio de los perfiles en estado estacionario usando diferentes gases precursores	83
5. Conclusiones	90

Índice de figuras

1.	Ilustración de una antorcha de plasma de arco no transferido (a la izquierda) y transferido (a la derecha). El cátodo es tipo varilla con punta cónica convergente y el tubo constrictor recto (a la izquierda) y convergente (a la derecha). En la antorcha de arco no transferido se observa la raíz del arco y un canal a través del cual circula agua fría para enfriar el ánodo. Tomada desde (Tendero et al. (2006)).	19
2.	Ilustración del reactor antorcha de plasma de Europlasma instalado en Cenon, Francia. Tomado desde (Heberlein and Murphy (2008))	24
3.	Ilustración del reactor antorcha de plasma de Westinghouse Utashinai, Japón. Tomado desde (Heberlein and Murphy (2008))	24
4.	Sección transversal de un propulsor espacial de antorcha de arco eléctrico. Tomado desde (Yoshikawa et al. (1987)).	26
5.	En el esquema se representa un sistema de propulsión espacial de chorro de arco (500) que contiene el propulsor de chorro de arco: un arcjet (514) compuesto por un ánodo (516), un cátodo (524) y una válvula (510) configurada para dirigir un propelente entre el cátodo y el ánodo". Tomado desde (Lichtin and Blum (2017)).	26
6.	Corte transversal de la antorcha de arco no trasferido de los autores (Selvan et al. (2009)). Se evidencia la asimetría del chorro de plasma al interior del ánodo tubular.	28

SIMULACIÓN MULTIFISICA DE ANTORCHA CON COMSOL

7.	Ilustración de los rangos de temperatura de las especies neutras y cargadas en las diferentes fuentes de plasma. Imagen traducida a partir de la original en (Schütze et al. (1998)).	32
8.	Ilustración de la región catódica en la cercanía del cátodo. Las flechas indican la dirección y sentido del fenómeno descrito por el texto contiguo. La corriente de iones de gas plasmógeno equivalen a las partículas de alta energía que inducen la corriente de Richardson. Figura tomada desde (Marín (2010)). . .	41
9.	Componentes de una antorcha de plasma y dimensiones utilizadas en el presente estudio.	44
10.	A) Geometría de la antorcha de cátodo cónico convergente y ánodo tubular recto. B) Geometría de la antorcha de cátodo cónico convergente y ánodo divergente. C) Geometría de la antorcha de cátodo de punta redondeada y ánodo recto. Estas se denominan en adelante A) cónico-tubular, B) cónico-tobera y C) esférico-tubular.	45
11.	Evolución del perfil de temperatura: encendido de la antorcha (tipo (a)) de arco eléctrico no transferido con ánodo en forma de tobera y cátodo en forma de varilla cónica convergente hacia la salida del chorro.	51
12.	Evolución del perfil de temperatura: encendido de la antorcha (tipo (b)) de arco eléctrico no transferido con ánodo en forma de tubo y cátodo en forma de varilla cónica convergente hacia la salida del chorro.	52
13.	Evolución del perfil de temperatura: encendido de la antorcha (tipo (c)) de arco eléctrico no transferido con ánodo en forma de tubo y cátodo en forma de varilla cónica convergente con punta redondeada hacia la salida del chorro.	53

SIMULACIÓN MULTIFISICA DE ANTORCHA CON COMSOL

14.	Comparación de la evolución temporal de la temperatura en las tres configuraciones de antorchas: a) Punta cónica con ánodo tobera, b) Punta cónica con ánodo tubular y c) Punta esférica con ánodo tubular.	54
15.	Comparación de la evolución temporal de la temperatura en las tres configuraciones de antorchas: a) Punta cónica con ánodo tobera, b) Punta cónica con ánodo tubular y c) Punta esférica con ánodo tubular.	55
16.	Distribución espacial de la temperatura en los 3 tipos de antorchas de plasma considerados: (a), (b) y (c). La máxima se localiza en la región central de flujo. Las temperaturas máximas alcanzadas son: a) $1,09 \times 10^4$ K, b) $1,11 \times 10^4$ K y c) $1,25 \times 10^4$ K.	57
17.	Temperatura de la antorcha esférico-tubular, en la fila inferior de este arreglo de imágenes, con dos diferentes tamaños promedio de los elementos finitos vistos en la primer fila.	58
18.	Perfiles de rapidez del fluido para las tres geometrías consideradas: (a), (b) y (c). El máximo de velocidad se localiza entre la punta del cátodo y el final de la sección convergente del ánodo en a) y b), mientras que en la geometría c) aparece ligeramente más adelante (aguas a bajo).	59
19.	Distribución espacial del potencial eléctrico en los tres tipos de antorcha considerados: (a), (b) y (c), manteniendo idénticas, para las tres antorchas, todas las mas condiciones de la simulación.	62
20.	Evolución de la temperatura máxima en el tiempo para diferentes magnitudes de la fuente de corriente (Q_j) y flujos másicos (Q), correspondiente a la geometría cónico-tobera.	66

21.	Evolución de la temperatura máxima en el tiempo para diferentes magnitudes de la fuente de corriente (Q_j) y flujos máxicos (Q), correspondiente a la geometría cónico-tubular.	67
22.	Evolución de la temperatura máxima en el tiempo para diferentes magnitudes de la fuente de corriente (Q_j) y flujos máxicos (Q), correspondiente a la geometría esférico-tubular.	68
23.	Evolución de la distribución de temperatura para la geometría cónico-tubular con flujo máxico $Q = 2,778 \cdot 10^{-3} \text{ [m}^3/\text{s]}$. Las filas (1-2, 3-4 y 5-6) muestran la variación para diferentes valores de la fuente de corriente en la punta del cátodo (Q_j), y cada perfil muestra la distribución de temperatura a diferentes instantes de tiempo (t). Note que los valores asignados a cada color en la barra lateral evoluciona en el tiempo, es decir es diferente para cada perfil.	71
24.	Evolución de la distribución de temperatura para la geometría cónico-tubular con flujo máxico $Q = 2,2224 \cdot 10^{-3} \text{ [m}^3/\text{s]}$. Las filas (1-2, 3-4 y 5-6) muestran la variación para diferentes valores de la fuente de corriente en la punta del cátodo (Q_j), y cada perfil muestra la distribución de temperatura a diferentes instantes de tiempo (t). Note que los valores asignados a cada color en la barra lateral evoluciona en el tiempo, es decir es diferente para cada perfil.	72

25. Evolución de la distribución de temperatura para la geometría **esferico-tubular** con flujo másico $Q = 2,778 \cdot 10^{-4} \text{ [m}^3/\text{s]}$. Las filas (1-2, 3-4 y 5-6) muestran la variación diferentes valores de la fuente de corriente en la punta del cátodo (Q_j), y cada perfil muestra la distribución de temperatura a diferentes instantes de tiempo (t). Note que los valores asignados a cada color en la barra lateral evoluciona en el tiempo, es decir es diferente para cada perfil. 73
26. Evolución de la distribución de temperatura para la geometría **esferico-tubular** con flujo másico $Q = 8,334 \cdot 10^{-4} \text{ [m}^3/\text{s]}$. Las filas (1-2, 3-4 y 5-6) muestran la variación para diferentes valores de la fuente de corriente en la punta del cátodo (Q_j), y cada perfil muestra la distribución de temperatura a diferentes instantes de tiempo (t). Note que los valores asignados a cada color en la barra lateral evoluciona en el tiempo, es decir es diferente para cada perfil. 74
27. Evolución de la distribución de temperatura para la geometría **cónico-tobera** con flujo másico $Q = 2,2224 \cdot 10^{-3} \text{ [m}^3/\text{s]}$. Las filas (1-2 y 3-4) muestran la variación para diferentes valores de la fuente de corriente en la punta del cátodo (Q_j), y cada perfil muestra la distribución de temperatura a diferentes instantes de tiempo (t). Note que los valores asignados a cada color en la barra lateral evoluciona en el tiempo, es decir es diferente para cada perfil. 75

28. Evolución de la distribución de temperatura para la geometría **cónico-tobera** con flujo másico $Q = 2,778 \cdot 10^{-3} \text{ [m}^3/\text{s]}$. Las filas (1-2 y 3-4) muestran la variación para diferentes valores de la fuente de corriente en la punta del cátodo (Q_j), y cada perfil muestra la distribución de temperatura a diferentes instantes de tiempo (t). Note que los valores asignados a cada color en la barra lateral evoluciona en el tiempo, es decir es diferente para cada perfil. 76
29. Evolución de la distribución de temperatura para la geometría **cónico-tobera** con flujo másico $Q = 2,778 \cdot 10^{-4} \text{ [m}^3/\text{s]}$. Las filas (1-2, 3-4 y 5-6) muestran la variación para diferentes valores de la fuente de corriente en la punta del cátodo (Q_j), y cada perfil muestra la distribución de temperatura a diferentes instantes de tiempo (t). Note que los valores asignados a cada color en la barra lateral evoluciona en el tiempo, es decir es diferente para cada perfil. 77
30. Evolución de la distribución de temperatura para la geometría **cónico-tobera** con flujo másico $Q = 8,334 \cdot 10^{-3} \text{ [m}^3/\text{s]}$. Las filas (1-2, 3-4 y 5-6) muestran la variación para diferentes valores de la fuente de corriente en la punta del cátodo (Q_j), y cada perfil muestra la distribución de temperatura a diferentes instantes de tiempo (t). Note que los valores asignados a cada color en la barra lateral evoluciona en el tiempo, es decir es diferente para cada perfil. 78

31. Evolución de la distribución de temperatura para la geometría **cónico-tubular** con flujo másico $Q = 2,224 \cdot 10^{-3} \text{ [m}^3/\text{s]}$. Las filas (1-2, 3-4 y 5-6) muestran la variación para diferentes valores de la fuente de corriente en la punta del cátodo (Q_j), y cada perfil muestra la distribución de temperatura a diferentes instantes de tiempo (t). Note que los valores asignados a cada color en la barra lateral evoluciona en el tiempo, es decir es diferente para cada perfil. 79
32. Evolución de la distribución de temperatura para la geometría **cónico-tubular** con flujo másico $Q = 2,778 \cdot 10^{-3} \text{ [m}^3/\text{s]}$. Las filas (1-2 y 3-4) muestran la variación para diferentes valores de la fuente de corriente en la punta del cátodo (Q_j), y cada perfil muestra la distribución de temperatura a diferentes instantes de tiempo (t). Note que los valores asignados a cada color en la barra lateral evoluciona en el tiempo, es decir es diferente para cada perfil. 80
33. Evolución de la distribución de temperatura para la geometría **cónico-tubular** con flujo másico $Q = 2,778 \cdot 10^{-4} \text{ [m}^3/\text{s]}$. Las filas (1-2, 3-4 y 5-6) muestran la variación para diferentes valores de la fuente de corriente en la punta del cátodo (Q_j), y cada perfil muestra la distribución de temperatura a diferentes instantes de tiempo (t). Note que los valores asignados a cada color en la barra lateral evoluciona en el tiempo, es decir es diferente para cada perfil. 81

34.	Evolución de la distribución de temperatura para la geometría cónico-tubular con flujo másico $Q = 8,334 \cdot 10^{-4} \text{ [m}^3/\text{s]}$. Las filas (1-2 y 3-4) muestran la variación para diferentes valores de la fuente de corriente en la punta del cátodo (Q_j), y cada perfil muestra la distribución de temperatura a diferentes instantes de tiempo (t). Note que los valores asignados a cada color en la barra lateral evoluciona en el tiempo, es decir es diferente para cada perfil.	82
35.	Figura 31. Perfil de potencial eléctrico (V) en estado estacionario para diferentes gases de trabajo. Se compara el potencial eléctrico para: (A) Argón, (B) Hidrógeno y (C) Nitrógeno. Los perfiles son virtualmente idénticos, demostrando que, bajo las condiciones simuladas, el potencial eléctrico no depende de las propiedades del gas. Este resultado es coherente con la ecuación 5, que no incluye términos dependientes del material.	84
36.	Perfil de temperatura del chorro al interior de la antorcha usando diferentes gases de trabajo: A) Argón, B) Hidrógeno y C) Nitrógeno.	86
37.	Perfil de rapidez del chorro al interior de la antorcha usando diferentes gases de trabajo: A) Argón, B) Hidrógeno y C) Nitrógeno. Note el cambio en la ubicación de la región de máxima rapidez (rojo oscuro).	88
38.	Propiedades físicas de los gases utilizados. la curva punteada roja corresponde al argón (Ar), en azul al Hidrógeno (H_2) y en verde al nitrógeno (N_2).	89

Índice de cuadros

1.	Densidad de especies cargadas para diferentes fuentes de plasma de descarga eléctrica. Traducido desde: (Schütze et al. (1998)).	31
2.	Propiedades de los Materiales Utilizados	45
3.	Parámetros de la geometría de las antorchas de plasma de arco eléctrico. Las tres antorchas consideradas tienen las mismas dimensiones: La segunda sección cónica del ánodo corresponde a la sección tubular. $h_p = 2,5[mm]$ para la antorcha c).	46
4.	Estadísticas Generales de la Malla para las Tres Geometrías	47
5.	Parámetros de Configuración de Tamaño para las Tres Geometrías	48
6.	Síntesis de los resultados de Park et al. (Park et al.) sobre el efecto de la concentración de hidrógeno en plasma de argón. Se observa una reducción en la temperatura y velocidad máximas al aumentar el porcentaje de H_2	88

Introducción

Importancia en la industria

En su informe “What a waste 2.0” el banco mundial afirma que se generaron más de dos mil millones de toneladas de residuos en el año 2016 y, si no se cambian los modelos de negocios, esta cantidad incrementara hasta superar los tres mil millones de toneladas para mitad de siglo (Kaza et al. (2018)). En cuanto a los productos orgánicos, se ha registrado una pérdida del $\sim 13,3\%$ anual en el intervalo entre 2016 y el 2020, desde la etapa de cosecha hasta la de venta minorista: esto genera cerca del 10% de emisiones de efecto invernadero del mundo (Gutierrez (2022)). En este sentido, la ONU ha adoptado el 30 de marzo como el “Día Internacional de Cero Desechos” en sus esfuerzos por motivar a instituciones, los estados, la población mundial y entidades privadas a desarrollar estrategias de cero residuos que contribuyan con los objetivos de desarrollo sostenible (ODS) 11: “Lograr que las ciudades sean más inclusivas, seguras, resilientes y sostenibles” y 12: “Garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles”. Se espera que esto incentive las iniciativas de economía circular por medio del reciclaje o alternativas a los botaderos de basuras, de baja contaminación (Gutierrez (2022); onu (2023)). Para el año 2022 los porcentajes de recolección de residuos sólidos urbanos fueron de alrededor del 80% pero solo se gestionan controladamente el 55% del total (Gutierrez (2022)).

Una alternativa a la quema mediante combustión o para el almacenamiento de este 45% restante y una forma de economía circular puede ser la incineración por plasma térmico debido a que reduce la emisión de gases contaminantes en comparación con el método de combustión. En este sentido, existen reactores comerciales para el tratamiento de residuos

peligrosos que se basan en las antorchas de plasma de arco transferido, no transferido, de radio frecuencia, inducción magnética, entre otras. Los compuestos gaseosos resultantes del proceso de gasificación de desechos orgánicos se pueden utilizar como fuente de energía y para retroalimentar el dispositivo cíclicamente. (Gazzo and Librandi (2007); Heberlein and Murphy (2008)).

Por otro lado, en el ámbito espacial se ha visto un incremento durante las últimas dos décadas en el uso de las tecnologías de propulsión para los satélites permitiendo orientarlos y controlar su órbita o mantenerla estable, es decir, para que su órbita no se vea perturbada debido a la interacción gravitacional con los cuerpos celestes o con la delgada atmósfera de plasma del espacio exterior (Martín and María (2015); Mazouffre (2016)). El impulso de estos proviene de un sistema de propulsión que obedece los principios físicos del cohete, de tal forma que los propulsores químicos pueden acoplarse y proporcionar el empuje necesario en las transferencias de órbita. Sin embargo, la propulsión química es de corto impulso y poca eficiencia de tal forma que es necesario una gran masa de propelente químico para generar la propulsión adecuada. En este sentido, las tecnologías de plasma son importantes ya que no requieren grandes cantidades de masa de propelente y presentan alta eficiencia (superior a la propulsión química) (Mazouffre (2016)).

Existe alta demanda de tecnologías con la capacidad de producir altas concentraciones de especies químicas a altas temperaturas y con gran densidad de energía en las industrias espacial, metalúrgica y de tratamiento de desechos entre otras que se abordaran en la sección 1. Un dispositivo que cumple estos requisitos es la antorcha de plasma, en estas, se produce un chorro de plasma que se encuentran a temperaturas de $\sim 10^4[K]$ en pequeñas regiones con área transversal del orden del $[mm^2$ o $cm^2]$; en estos dispositivos, a partir de un gas precursor

se pueden crear especies reactivas para formar compuestos o estructuras cristalinas que no se pueden crear en otras condiciones, por tal motivo, es necesario comprender los fenómenos físicos asociados a los dispositivos que satisfagan estas necesidades específicas.

Fundamentos técnicos

Los chorros de plasma térmicos de arco eléctrico se generan cuando una corriente eléctrica que atraviesa un gas inerte le transfiere energía mediante las colisiones de los electrones con los átomos. Las colisiones inelásticas cambian la energía interna de los átomos creando especies ionizadas y excitadas en el gas que lo convierten en plasma. Si la transferencia de energía al interior del gas está gobernada principalmente por las interacciones entre partículas, este se encuentra en equilibrio termodinámico local lo que, a su vez, lo clasifica como plasma térmico (Tendero et al. (2006)). Estos sistemas físicos orientan el plasma en una dirección restringida por los campos eléctrico y magnético o materia sólida que lo limita permitiendo que sea expulsado en forma de chorro (plasma jet) (Mazouffre (2016)).

Las geometrías más utilizadas para las antorchas de plasma de arco son axialmente simétricas con cátodo varilla y ánodo hueco. Se encuentran cátodos tubulares o cilíndricos con punta cónica, esférica, cuadrada y ovalada, normalmente de cobre con recubrimiento de Tungsteno (W). El ánodo suele ser la pieza de trabajo o la parte constrictora del arco que, según la aplicación, es un tubo circular o tobera cónica hueca convergente o divergente hacia la salida, termina justo en la punta del ánodo o se extiende desde algunos milímetros hasta pocos centímetros. Cuando el ánodo se encuentra fuera del dispositivo, sin contacto directo con este, pero en su cercanía (suficiente para interactuar con el plasma) se dice que el diseño es de arco transferido, pero si es parte de la geometría de la antorcha es de arco

no transferido (ver figura 1) (Gomez et al. (2009); Laroussi and Akan (2007); Schütze et al. (1998); Tendero et al. (2006); Viegas et al. (2022); Winter et al. (2015)).

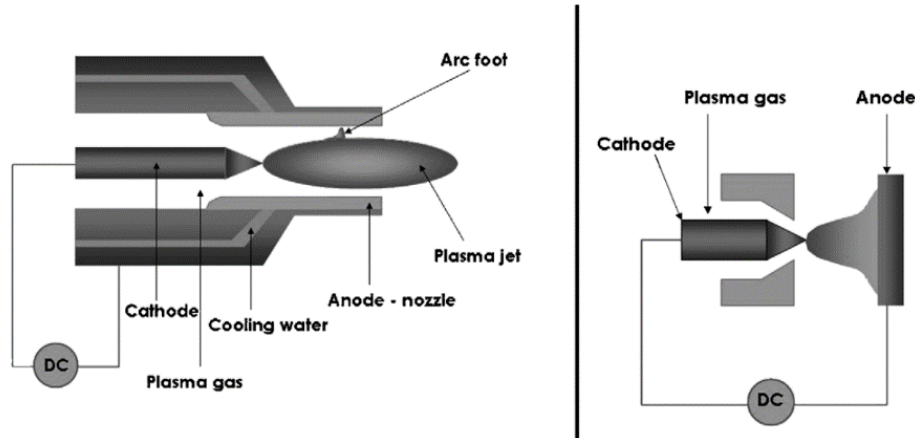


Figura 1: Ilustración de una antorcha de plasma de arco no transferido (a la izquierda) y transferido (a la derecha). El cátodo es tipo varilla con punta cónica convergente y el tubo constrictor recto (a la izquierda) y convergente (a la derecha). En la antorcha de arco no transferido se observa la raíz del arco y un canal a través del cual circula agua fría para enfriar el ánodo. Tomada desde (Tendero et al. (2006)).

Método de estudio científico

Debido a la complejidad de los fenómenos físicos en las antorchas de plasma, su estudio requiere el uso de simulación numérica. Recientemente, la investigación en este campo se ha apoyado en software de simulación multifísica como Elmer y COMSOL Multiphysics[®], que permiten modelar sistemas con ecuaciones fuertemente acopladas (Bondarenko et al. (2017); Mannion et al. (2020)). La dinámica del plasma en estos dispositivos implica la interacción simultánea de fenómenos de la mecánica de fluidos, la termodinámica y el electromagnetismo. Por ejemplo, en COMSOL Multiphysics[®] se han modelado antorchas de arco no transferido considerando la simetría axial y el flujo laminar para estudiar la interacción entre el transporte de especies reactivas y la transferencia de calor mediante la convección (COMSOL

Multiphysics (1998d); Chine-P et al. (2018)).

Por estos motivos, una herramienta ampliamente utilizada en la simulación de estos sistemas es COMSOL Multiphysics[®] que permite solucionar los modelos acoplados utilizando los módulos multifísicos que tiene incorporados. Su interfaz de usuario permite concentrar los esfuerzos en la definición de las condiciones del sistema físico, en la optimización de los parámetros de la malla y el análisis de las soluciones sin preocuparse a fondo por los métodos numéricos, el lenguaje de programación ni los algoritmos.

Método utilizado en el presente proyecto

En el presente trabajo se evidencia la implementación del software COMSOL Multiphysics[®] versión 5.6, para el estudio teórico computacional de una antorcha de arco no transferido axialmente simétrico operando con corriente continua en condición atmosférica. Primero, se realiza un estudio preliminar donde se implementa la metodología propuesta por los resultados de la antorcha de los autores (Chine-P et al. (2018)) utilizando los módulos AC/DC, transferencia de calor en fluidos y sólidos y flujo de fluidos acoplados con sus respectivas multifísicas en estado estacionario. Con los resultados de esta simulación se modifica la geometría de la antorcha, el gas de trabajo, el flujo másico y la fuente de corriente eléctrica. Se estudia la formación del chorro y su comportamiento hacia la salida de la antorcha bajo un estado transitorio hasta alcanzar el estado estable y, en este estado, se estudian los perfiles de temperatura, componentes de la velocidad, la rapidez, el voltaje, la corriente y el campo eléctrico.

1 Estado del arte

1.1 Áreas de aplicación y parámetros de funcionamiento

En las últimas décadas se han estudiado aplicaciones para las antorchas de plasma en medicina, síntesis de materiales, pulverización y corte de metales, tratamiento de residuos, recubrimientos y tratamiento de superficies, en propulsión espacial y en recuperación de metales a partir de desechos, entre otros. En estas aplicaciones se presentan diferentes parámetros de funcionamiento del sistema de generación del chorro. El tamaño de la geometría normalmente es del orden de los [mm o cm]. El mecanismo de formación del arco eléctrico puede ser de corriente continua, continua pulsada o sostenida, corriente alterna con frecuencia del orden de los [kHz] y los [MHz] y de magnitud alrededor de los 10^2 [A]. Las antorchas operan a grandes diferencias de potencial (del orden de los [kV] en adelante) y potencia de entrada de $(10^1 - 10^2)[kW]$. La configuración de los electrodos es de dos tipos: arco no transferido (ánodo al interior del dispositivo) o arco transferido (ánodo en el exterior). Se utilizan diferentes tipos de gases de trabajo: gases nobles (Ar o He), N_2 , CO_2 , Aire, Hidracina, entre otros que se usan según se requiera. El fluido entra en la parte superior de la antorcha, aguas arriba del cátodo, y se generan las especies reactivas a medida que atraviesan la antorcha hacia la salida, aguas abajo del cátodo. (Jovel and Walker (2022); Gomez et al. (2009); Laroussi and Akan (2007); Schütze et al. (1998); Tendero et al. (2006); Viegas et al. (2022)).

En síntesis de materiales (Kim et al. (2020); Kurihara et al. (1988); Lu et al. (1991); Shavelkina et al. (2019)) han estudiado la formación de diamantes, grafeno y nanotubos de nitruro de boro ($BNNT$) respectivamente. Utilizaron antorchas de plasma térmico de

SIMULACIÓN MULTIFISICA DE ANTORCHA CON COMSOL

corriente directa operando a presión atmosférica en la salida del chorro con diferentes gases de trabajo: N_2 , Ar y H_2 , en el primer “paper”; CH_4 e H_2 , en el segundo; Ar , CH_4 y H_2 , en el tercero; Ar , He , N , “*metano de calidad técnica, metano de alta pureza (99,999 %)*”, *acetileno, etanol (92 %) y una mezcla de 70:30 % en peso de propano y butano*” (Shavelkina et al. (2019)), el cuarto; según se describe en los documentos correspondientes. (Kim et al. (2020)) sintetizaron 12,6 [g] de (BNNT) con 21,4[kW] suministrados a un reactor de triple antorcha, mejorando el rendimiento mostrado por otros autores. (Kurihara et al. (1988)) utilizaron deposición química de vapor con un chorro de plasma para sintetizar diamante exitosamente, tuvieron una tasa de crecimiento de 80,0[$\mu m/h$]. Está técnica de creación de diamantes continúa siendo estudiada en la actualidad (Lu et al. (2000); Shao et al. (2024)).

En tratamiento de residuos, (Chine-P et al. (2018)) estudiaron dos sistemas de chorro de plasma térmico de corriente continua y axialmente simétricos para el tratamiento de residuos sólidos. El estudio se realiza mediante simulación bidimensional utilizando COMSOL multiphysics[®]; utilizaron Argón como gas de trabajo con las propiedades físicas que incluye la librería de materiales del programa. También, se encuentra en la literatura la patente titulada “*Dispositivo y procedimiento de destrucción de residuos líquidos, pulverulentos o gaseosos por plasma inductivo*” que reclama el uso de un dispositivo de destrucción de residuos que genera plasma inductivo con el fin de disociar compuestos orgánicos u organohalogenados (Meillot and Guenadou (2014)). Por su parte, (Sikarwar et al. (2020)) revisaron los avances que se han realizado en aplicaciones de antorchas de plasma térmico al tratamiento de residuos sólidos y ofrecieron una evaluación acerca de los desechos que se pueden tratar con antorchas de plasma térmico, sus fundamentos y características. Se describe como en esta aplicación se pueden utilizar antorchas de plasma de arco, inducido con radiofrecuencia, su combinación

(inducido y con radiofrecuencia) y de microondas; las características evaluadas del plasma son las de transporte, termodinámicas y la composición del plasma. (Sikarwar et al. (2020)) evalúa la generación y las características del plasma térmico de una antorcha inductiva y muestra que las tecnologías de plasma térmico se pueden utilizar en el tratamiento de desechos minimizando efectos ambientales y, en algunos casos, se pueden usar los gases residuales como fuente de energía. En este sentido, los autores (Iván and Blanco (2012)) propusieron los plasmas térmicos en la producción de energía a partir de residuos como alternativa a los botaderos de basura en Costa Rica.

El proceso industrial de tratamiento de residuos con antorchas de plasma se puede llevar a cabo en hornos comerciales tales como los diseñados por la empresa Europlasma SA que puede procesar alrededor de 120.000 toneladas de residuos sólidos urbanos (RSU) por año (ver figura 2) y el horno de plasma de la empresa Westinghouse Plasma Corp que puede tratar 300 toneladas al día de RSU (ver figura 3). Otra empresa del sector con productos que utilizan antorchas de plasma para tratamiento de residuos es Pyrogenesis Canada inc que puede tratar 200 kg por hora. En estos casos, de la quema de los gases residuales se puede extraer energía en una segunda cámara, de tal forma que se puede recuperar parte de la energía en la quema de los gases residuales y alimentar la antorcha con los mismos. (Heberlein and Murphy (2008)).

En reciclaje de metales, tales como el hierro, cadmio, mercurio, plomo, zinc, cobre y el cromo; Changming et al. (2018) describe un método para obtener metales para la industria tecnológica a partir de desechos. Durante el proceso, los residuos electrónicos se someten a temperaturas extremas, de hasta 25.000 [K], donde los metales se separan en función de sus puntos de ebullición, permitiendo su recolección y reutilización. Estos materiales

SIMULACIÓN MULTIFÍSICA DE ANTORCHA CON COMSOL

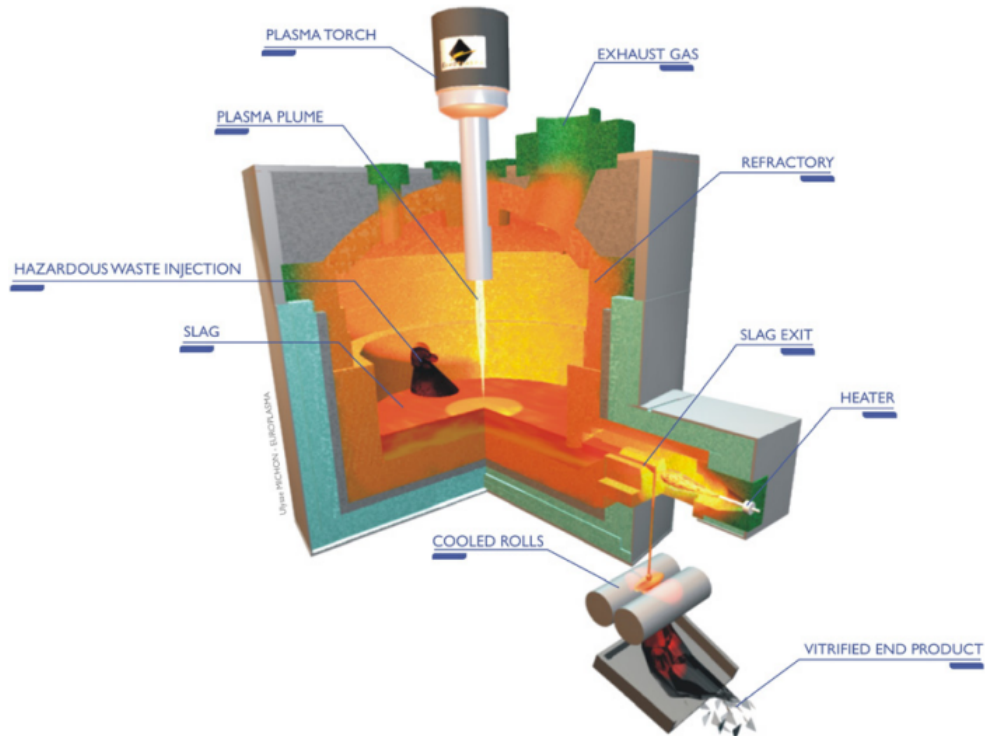


Figura 2: Ilustración del reactor antorcha de plasma de Europlasma instalado en Cenon, Francia. Tomado desde (Heberlein and Murphy (2008))

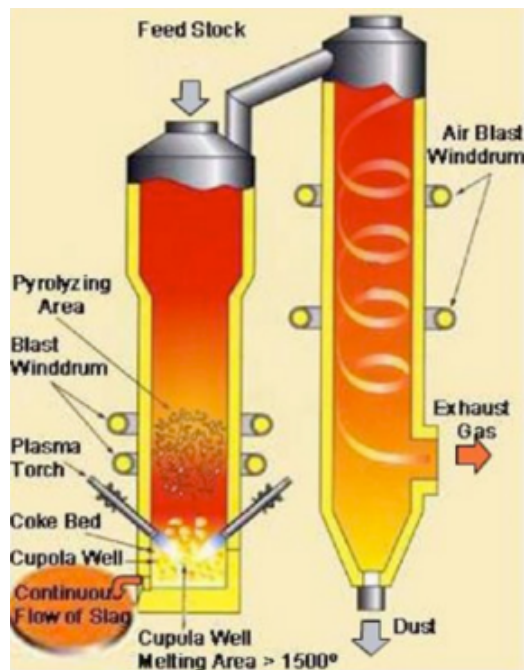


Figura 3: Ilustración del reactor antorcha de plasma de Westinghouse Utashinai, Japón. Tomado desde (Heberlein and Murphy (2008))

son esenciales, por ejemplo, en baterías, componentes electrónicos y turbinas eólicas. Sin embargo, los métodos convencionales de reciclaje son costosos y poco eficientes. La fusión selectiva mediante antorchas de plasma permite la recuperación de estos metales con alta pureza y bajo impacto ambiental.

En propulsión espacial se han investigado diferentes tipos de sistemas tales como los propulsores de resistencia eléctrica (resistojet), de arco eléctrico (arcjet), magnetoplasma-dinámicos (MPD), de efecto Hall (HETs), de iones reticulado (GIE), etc. En la literatura se clasifican en tres grupos: Propulsores electrostáticos, electrotérmicos y electromagnéticos, según sea el mecanismo de transmisión de energía al gas de trabajo. Los propulsores de chorro de arco térmico (arcjets) son propulsores electrotérmicos donde un arco eléctrico calienta un propelente gaseoso, el cual se expande a través de una boquilla para generar empuje. Los primeros satélites en ser llevados al espacio usando propulsores eléctricos fueron “Space Electric Rocket Test” (SERT-1) y Zond-2 de Estados Unidos y La Unión Soviética, respectivamente, en la década de 1960. Otros satélites que han utilizado sistemas de propulsión son Intelsat 8, AsiaSat, y Echostar. (Jovel and Walker (2022)). Los arcjets se clasifican según su nivel de potencia en bajo (1 a 3[kW]), medio (20 a 50[kW]) y alto (> 100 [kW]).

En la figura 4 se observa un sistema de propulsión espacial de arco eléctrico diseñado por Heavy Industri'es Co - Ltd en 1987 probado con nivel de potencia entre 1 y 3[kW] El gas propulsor utilizado fue una mezcla de Nitrógeno e Hidrogeno ($N_2 + 2H_2$). En este se observan los electrodos, el sistema de enfriamiento del ánodo y el canal de inyección de gas propelente. La corriente se genera entre los electrodos, pasa a través del gas, lo calienta causando su expansión térmica y, en consecuencia, su expulsión, pasando por el ánodo en forma de tobera. Recientemente, en 2017 se publicó la patente titulada “Sistemas de propulsión Arcjet para

SIMULACIÓN MULTIFISICA DE ANTORCHA CON COMSOL

naves espaciales y métodos relacionados” que involucra como parte de sus reclamaciones un propulsor Arcjet con el correspondiente sistema de potencia de corriente continua y de radiofrecuencia, y la válvula de inyección de propelente (ver figura 5).

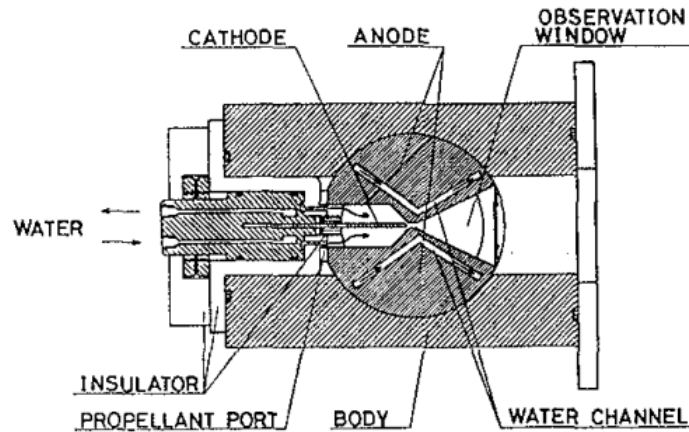


Figura 4: Sección transversal de un propulsor espacial de antorcha de arco eléctrico. Tomado desde (Yoshikawa et al. (1987)).

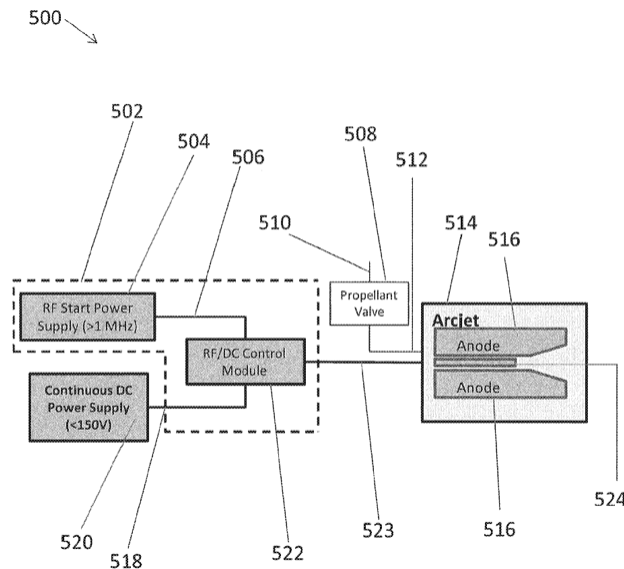


Figura 5: En el esquema se representa un sistema de propulsión espacial de chorro de arco (500) que contiene el propulsor de chorro de arco: un arcjet (514) compuesto por un ánodo (516), un cátodo (524) y una válvula (510) configurada para dirigir un propelente entre el cátodo y el ánodo”. Tomado desde (Lichtin and Blum (2017)).

Desde principio del siglo XX se empezaron a presentar solicitudes de patente de

dispositivos de chorro de plasma en el sector industrial de soldadura. Los primeros diseños presentaron la geometría cilíndrica para generar atmósfera de gases nobles alrededor de la pieza de trabajo para evitar la generación de compuestos no deseados y que se dañe la pieza de trabajo. Esta forma geométrica ha sido de las más utilizadas para las antorchas de plasma (ALIMANT and BILLIERES (2017); KRINK et al. (2014); CROWE et al. (2014); Meredith (1942); NAGASHEV (1930)).

1.2 Antecedentes científicos

Selvan et al. (2009) investigaron el comportamiento del arco y su influencia en el chorro mediante experimento y simulación tridimensional utilizando el gas de trabajo compuesto por Ar y N_2 . En comparación con la simulación bidimensional, evidencian que la distribución de la temperatura y velocidad del plasma a la salida de la antorcha muestra apreciables efectos asimétricos. Estas asimetrías son más acentuadas en la velocidad que en la temperatura y se intensifican al acercarse a la salida del dispositivo. En el estudio experimental de estos autores se utiliza el ánodo tipo boquilla y el cátodo tipo varilla con punta cónica redondeada en cobre con recubrimiento de Tungsteno Toriado. Suministraron una potencia de 40 [KW] utilizando diferentes magnitudes de corriente y caudal (ver figura 6).

Los autores (Alshunaifi et al. (2021)) desarrollaron un modelo numérico bidimensional para simular las condiciones operativas dentro y fuera de una antorcha de plasma de arco eléctrico no transferido con el software COMSOL Multiphysics[®]. La aplicación objetivo es la síntesis de polvo de nanosílice. Estudiaron la influencia de la variación de la corriente de trabajo y el caudal de gas en la distribución de la velocidad y la temperatura del plasma, así como en la eficiencia general de la antorcha. Consideran los efectos turbulentos en el fluido,

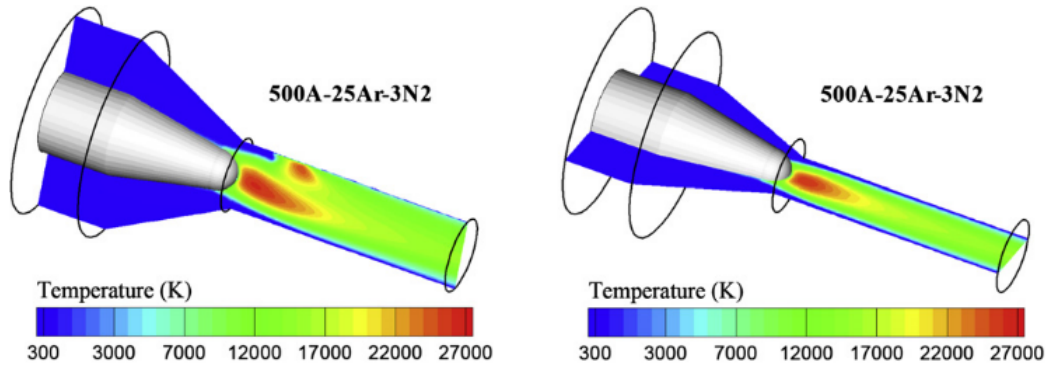


Figura 6: Corte transversal de la antorcha de arco no trasferido de los autores (Selvan et al. (2009)). Se evidencia la asimetría del chorro de plasma al interior del ánodo tubular.

plasma LTE, simetría axial, efectos gravitacionales despreciables y que el arco es estable. Los hallazgos evidencian que el aumento de la corriente de trabajo condujo a un aumento de la potencia eléctrica efectiva, en consecuencia incrementó la rapidez del chorro de plasma y la temperatura. Los resultados numéricos obtenidos en este estudio mostraron una buena correlación con las mediciones experimentales, lo que valida la utilidad del modelo para optimizar el proceso de producción de nanopulvo de sílice.

Se han construido modelos analíticos, numéricos y simulaciones mediante los cuales se han logrado importantes avances en su comprensión. (Qunbo et al. (2005)) estudiaron los campos de velocidades, temperatura y concentración de *Ar* utilizando un modelo 3D de flujo continuo y turbulento $k - \epsilon$, este último describe la energía cinética contenida en las fluctuaciones de velocidad (k) y la tasa de energía turbulenta disipada (ϵ); concluyen que a causa del incremento en la temperatura se produce la expansión del gas y el aumento de la rapidez, en consecuencia, es expulsado hacia fuera de la antorcha, dando como resultado un intercambio de calor, momento y masa con el aire fuera del dispositivo y una reducción de estas magnitudes en el plasma. (Gritter et al. (2017)) realizaron la simulación de una antorcha

de micro plasma en estado estacionario con un modelo multifísico que involucra flujo de fluido turbulento, transferencia de calor, electromagnetismo, cinética física y reacciones químicas con el propósito de predecir los perfiles de temperatura, velocidad del chorro y concentración de especies reactivas. Otra simulación tridimensional fue realizada por (Trelles et al. (2006)), usaron las ecuaciones de la mecánica de fluidos y electromagnetismo con el objetivo de estudiar la dinámica del arco eléctrico en una antorcha de plasma de corriente continua con gas de trabajo Ar y $Ar - N_2$ suponiendo equilibrio termodinámico local, lograron predecir el funcionamiento de la antorcha suponiendo una conductividad eléctrica artificial cerca de los electrodos.

En las últimas décadas se han realizado múltiples “reviews” en física de antorchas de plasma y sus aplicaciones que han recopilado y sintetizado los estudios de diferentes autores en sus diversas configuraciones. Entre las variaciones más estudiadas se encuentran la geometría de los electrodos, el tipo de acoplamiento del arco (transferido o no transferido), la composición del gas (utilizando gases nobles, sus mezclas, u otros compuestos) y el ajuste de los parámetros de control del proceso (Tendero et al. (2006); Viegas et al. (2022); Winter et al. (2015)).

2 Marco teórico

2.1 Naturaleza del plasma

El plasma es el estado gaseoso de ionización cuasi neutro en el cual las partículas constituyentes (iones y electrones) exhiben comportamiento colectivo a nivel macroscópico. En este estado, los átomos constituyentes del gas base, a partir del cual se generó el plasma,

han perdido al menos uno de los electrones de su estructura electrónica y se encuentran libres al interior del “gas” por lo cual la carga eléctrica positiva y negativa es igual. Esta característica del plasma hace que, a partir de cierta distancia característica, conocida como longitud de Debye (λ_D) se neutralice la interacción eléctrica:

$$\lambda_D = \frac{\varepsilon_0 k_B T_\alpha}{n_{0\alpha} q_{e\alpha}^2} \quad [m], \quad (1)$$

donde ε_0 es la permitividad eléctrica en el espacio vacío, k_B es la constante de Boltzmann, T_α , $n_{0\alpha}$ y $q_{e\alpha}$ son la temperatura, la concentración y la carga eléctrica de la especie α , respectivamente JOHN et al. (1963).

En el estado de plasma, una sustancia tiene como principal interacción entre sus partículas constituyentes las fuerzas electromagnéticas. Estas decrecen con el cuadrado de la distancia de separación. En comparación con la interacción entre partículas neutras, se pueden considerar que el plasma tiene fuerza de interacción de largo alcance. Por lo tanto, los principales mecanismos de transferencia de momento serán la fuerza eléctrica y la fuerza magnética. JOHN et al. (1963)

A su vez, la naturaleza no neutra de las partículas del plasma convierte a las magnitudes electromagnéticas en el principal interés en los estudios acerca de este estado de la materia: la concentración de partículas (n), la densidad de corriente (\vec{J}), el campo eléctrico (\vec{E}), de desplazamiento (\vec{D}), de intensidad y densidad magnética (\vec{H} y \vec{B}), el grado de ionización (Z) y el estado de ionización o excitación son las más importantes.

En un plasma, la carga eléctrica tiende a recombinarse, emitiendo fotones, hasta alcanzar la neutralidad eléctrica. Por lo tanto, debe suministrarse energía continuamente hacia el

gas para mantener el estado de ionización de los átomos y/o moléculas Tendero et al. (2006). El mecanismo de transferencia de energía puede ser el de una corriente eléctrica continua cuya energía sea suficiente para ionizar el gas base y crear el plasma. Esta corriente atraviesa el gas formando un arco de electrones e iones entre los electrodos, conocida como arco eléctrico. Una corriente eléctrica transfiere energía al gas base mediante colisiones inelásticas excitando o ionizando los átomos o moléculas. Simultáneamente, la temperatura incrementa a causa de las colisiones elásticas.

Como este, existen diferentes mecanismos de generación de plasma de corriente continua (fuentes de plasma): la descarga de corona, la de barrera dieléctrica, el arco eléctrico y la antorcha de plasma. Cada una de estas fuentes producen diferentes densidades de especies cargadas en las descargas de plasma (ver tabla 1). Note que la descarga de la antorcha de plasma y el arco eléctrico son las de mayor densidad de especies cargadas entre estas fuentes. A su vez, cada una tiene rangos de temperatura de las especies neutras y cargadas típicos en la literatura, como se ilustra en la figura 7. La descarga de arco es la de mayor temperatura de especie neutra mientras que la de baja presión es la de mayor energía promedio de los electrones.

Cuadro 1: Densidad de especies cargadas para diferentes fuentes de plasma de descarga eléctrica. Traducido desde: (Schütze et al. (1998)).

Fuente	Densidad [cm^{-3}]
Descarga de baja presión	$10^8 - 10^{13}$
Antorcha de plasma y arco eléctrico	$10^{16} - 10^{19}$
Descarga de corona	$10^9 - 10^{13}$
Descarga de barrera dieléctrica	$10^{12} - 10^{15}$
Chorro de plasma	$10^{11} - 10^{12}$

El sistema bajo estudio se aborda desde una perspectiva multifísica, dado que su com-

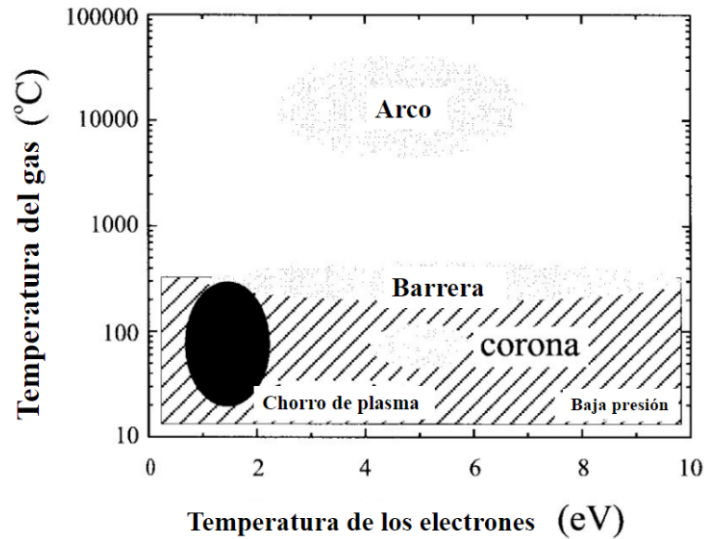


Figura 7: Ilustración de los rangos de temperatura de las especies neutras y cargadas en las diferentes fuentes de plasma. Imagen traducida a partir de la original en (Schütze et al. (1998)).

portamiento está gobernado por la interacción de múltiples fenómenos físicos. Este modelo acopla las ecuaciones de Navier-Stokes para describir la dinámica de fluidos, las ecuaciones de Maxwell para el electromagnetismo. Se asume, además, una condición de Equilibrio Termodinámico Local (LTE), lo que permite tratar el plasma como un único fluido conductor con una temperatura global.

2.2 Sistema de ecuaciones del modelo

A nivel macroscópico, la física del sistema se describe mediante un modelo multifísico que acopla la dinámica de fluidos, la transferencia de calor y el electromagnetismo. Este enfoque se basa en un sistema de ecuaciones que vincula estos fenómenos a través de términos de acoplamiento como la fuerza de Lorentz y el calentamiento Joule, permitiendo así modelar el plasma como un único fluido conductor y cuasi-neutro.

En el modelo que se utiliza, se parte de la suposición de que las magnitudes físicas

son acimutalmente simétricas, es decir, no existen cambios azimutales de las mismas:

$$\frac{\partial}{\partial \phi} \equiv 0. \quad (2)$$

2.3 El campo eléctrico (modulo AC/DC)

Las ecuaciones de Maxwell que se aplican describen el comportamiento del campo eléctrico \vec{E} , el potencial eléctrico (V) y la densidad de corriente, con campo magnético interno y externo nulos:

$$\vec{E} = -\nabla V \quad \left[\frac{V}{m} \right], \quad (3)$$

donde ∇ es el operador nabra;

$$\nabla \cdot \vec{D} = 0 \quad \left[\frac{C}{m^3} \right] \quad (4)$$

aquí \vec{D} es el vector de desplazamiento eléctrico;

$$-\varepsilon_0 \nabla \cdot (-\nabla V) = 0 \left[\frac{C}{m^3} \right]; \quad (5)$$

$$\nabla \cdot \vec{J} = Q_J \quad \left[\frac{A}{m^3} \right] \quad (6)$$

Q_J es el valor de la fuente de corriente eléctrica del sistema y

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} + \vec{J}_{ext} \quad \left[\frac{A}{m^2} \right] \quad (7)$$

siendo σ la conductividad eléctrica del medio y \vec{J}_{ext} es la densidad de corriente generada externamente, independiente del campo eléctrico presente en el medio.

El miembro derecho de la ecuación (6) indica que se crea cargas eléctricas en el medio que a su vez generan una corriente eléctrica. Sin embargo, la corriente inyectada no puede consistir en un único tipo de portador de carga, sino que debe estar compuesta tanto por cargas positivas (iones) como negativas (electrones), asegurando así que no haya una acumulación de carga neta en el sistema (COMSOL Multiphysics (1998a)).

2.4 Flujo laminar de fluidos (modulo CFD)

Las ecuaciones que modelan el flujo de fluido laminar débilmente compresible, con densidad de masa del fluido ρ , viscosidad dinámica del fluido μ , número de Reynolds $R_e = \rho UL/\mu < 2000$ para la escala de velocidad U y longitud característica del sistema L y con número de Mach $Ma = |\vec{u}|/u_s < 0,3$ para la rapidez del fluido $|\vec{u}|$ y del sonido u_s en condiciones atmosféricas, son las ecuaciones de Navier-Stockes y de continuidad:

$$\rho(\vec{u} \cdot \nabla)\vec{u} = \nabla \cdot [-p\mathbf{I} + \mathbf{K}] + \vec{F} \quad \left[\frac{N}{m^3} \right], \quad (8)$$

$$\nabla \cdot (\rho\vec{u}) = 0 \quad \left[\frac{Kg}{m^3s} \right]; \quad (9)$$

$$\vec{u} = \begin{bmatrix} u_r \\ u_\phi \\ u_z \end{bmatrix} \quad \left[\frac{m}{s} \right] \quad (10)$$

es la velocidad del fluido, p es la presión en el fluido (ambas son variables dependientes del modelo), \vec{F} es el vector fuerza volumétrica, \mathbf{I} es el tensor identidad y

$$\mathbf{K} = \mu(\nabla u + (\nabla u)^T - \frac{2}{3}\mu(\nabla \cdot \vec{u})\mathbf{I}) \quad \left[\frac{N}{m^2} \right] \quad (11)$$

es el tensor de tensión viscosa: aquí ∇u es la matriz cuyas componentes son las derivadas parciales de las componentes de la velocidad con respecto a las coordenadas espaciales.

En la frontera de salida del fluido se cumple que

$$(-p\mathbf{I} + \mathbf{K})\vec{n} = -p_0\vec{n} \quad \left[\frac{N}{m^2} \right], \quad (12)$$

donde \vec{n} es el vector unitario normal a la superficie.

La ecuación de Navier-Stokes es una ecuación de balance de fuerzas sobre un elemento de fluido y asume que este es un medio continuo. De la ecuación de continuidad de masa se interpreta que el flujo de entrada de fluido se compensa completamente con el de salida (COMSOL Multiphysics (1998b)).

2.5 Transferencia de calor en fluidos (modulo HT)

Los fluidos, considerados como medios continuos, en los cuales existe dinámica térmica mediante los fenómenos de radiación, convección y conducción de calor, con fuentes de calor Q , se pueden modelar usando las ecuaciones (13), (18) y (20).

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla T \right) + \nabla \cdot (\vec{q} + \vec{q}_r) = Q + \alpha_p T \left(\frac{\partial p}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla p \right) + \boldsymbol{\tau} : \nabla u \quad \left[\frac{W}{m^3} \right] \quad (13)$$

aquí C_p es la capacidad calórica a presión constante del fluido, \vec{q} es el flujo de calor debido a los gradientes de temperatura al interior del fluido (conducción térmica)

$$\vec{q} = -k\nabla T \quad \left[\frac{W}{m^3} \right], \quad (14)$$

\vec{q}_r el flujo de calor por radiación y k es la conductividad térmica. α_p es el coeficiente de expansión térmica dado por la siguiente expresión

$$\alpha_p = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial T} \quad [k^{-1}] \quad (15)$$

el producto tensorial expresado con el símbolo “:” es contracción de

$$A : B = \sum_i \sum_j a_{ij} b_{ij}, \quad (16)$$

conocida como el doble producto punto. La densidad en el fluido es función de la presión de referencia ($p_0 = p_{atm}$) y la temperatura (T) como se expresa en la siguiente ecuación

$$\rho = \frac{p_{atm}}{R_s T} \quad \left[\frac{Kg}{m^3} \right] \quad (17)$$

donde R_s es la constante de los gases ideales. ∇u es el tensor de esfuerzos y ∇u es la matriz cuyas componentes son las derivadas parciales de las componentes de la velocidad con respecto a las coordenadas espaciales.

El segundo término del miembro derecho la ecuación (13) es el trabajo realizado por los cambios de presión y es el resultado del calentamiento bajo compresión adiabática, mientras que el último término representa la disipación viscosa en el fluido. Cómo se

puede notar en la interpretación de los términos del miembro derecho de la ecuación (13), todos corresponden a las fuentes de energía en el sistema, a su vez los miembros del lado izquierdo representan los mecanismos de transmisión por convección, conducción y radiación, respectivamente.

El flujo de calor a través de una interfaz está relacionado con el cambio de entalpía y la velocidad del fluido en esa interfaz mediante la siguiente expresión

$$-\vec{n} \cdot \vec{q} = \rho \Delta H \vec{u} \cdot \vec{n} \quad \left[\frac{J}{m^2} \right], \quad (18)$$

H es la entalpía y está dado por la siguiente expresión

$$\Delta H = \int_{T_{entrada}}^{T_{salida}} C_p dT, \quad (19)$$

mientras ΔH es la variación de entalpía entre las condiciones de entrada y salida del fluido al sistema.

En el solido la ecuación análoga a (13) es la siguiente:

$$\rho C_p \vec{u} \cdot \nabla T + \nabla \cdot \vec{q} = Q + Q_{ted} \quad \left[\frac{W}{m^3} \right], \quad (20)$$

donde

$$Q_{ted} = -\alpha T : \left(\frac{\partial}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla \right) \vec{S} \quad \left[\frac{W}{m^3} \right] \quad (21)$$

es el amortiguamiento termoelástico y representa los efectos termoelásticos en los sólidos.

En el modelo térmico de fluidos considerado se supone que el fluido está en equilibrio

termodinámico local, es decir, cuando observamos el fluido a pequeña escala macroscópicamente existe un volumen pequeño del mismo a partir del cual el fluido se encuentra en equilibrio térmico.

2.6 Acoples multifísicos

Los fenómenos modelados con las ecuaciones (3), (4), (6), (8), (9), (13), (18) y (20) se acoplan mutuamente mediante los fenómenos de interacción multifísicos, es decir con ecuaciones que involucran magnitudes físicas de dos o las tres ramas de la física mencionadas. (COMSOL Multiphysics (1998c)).

2.6.1 Fuente de calor de descarga de equilibrio

Cuando una corriente eléctrica atraviesa un gas genera calor al interior de este mediante efecto Joule, esta energía se dispersa en el fluido como una propiedad de transporte del fluido según lo indica la siguiente ecuación:

$$\rho C_p \vec{u} \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q \quad \left[\frac{W}{m^3} \right], \quad (22)$$

$$Q = \frac{\partial}{\partial T} \left(\frac{5k_B T}{2q} \right) + \vec{E} \cdot \vec{J} + Q_{rad} \quad \left[\frac{W}{m^3} \right], \quad (23)$$

donde C_p es la capacidad calórica del fluido a presión constante, T es la temperatura del gas, Q es el término fuente y sumidero que indica cuanta energía térmica se transportó al interior del fluido a partir del transporte de entalpía de los electrones, el calentamiento eléctrico y la pérdida de energía por radiación Q_{rad} con un coeficiente de emisión neta.

2.6.2 Fuente de calor de descarga de equilibrio en superficie (cátodo)

La densidad de potencia emitida o absorbida Q_b por el cátodo mediante la emisión termoiónica de iones y electrones estimulada por el bombardeo de iones es definida en el módulo multifísico como

$$-\vec{n} \cdot (-k\nabla T) = Q_b \quad \left[\frac{W}{m^2} \right], \quad (24)$$

donde el signo menos en el vector normal indica que el sentido del flujo de energía debido a emisión termoiónica es inverso al flujo por diferencias de temperatura entre el cátodo. El plasma y el termino fuente está dado por la expresión

$$Q_b = -J_e\phi + J_{ion}V_{ion} \quad \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (25)$$

donde ϕ es la función trabajo del material, V_{ion} es el potencial de ionización del plasma y la magnitud de la densidad de electrones es

$$J_e = \begin{cases} J_R(T) & \text{si } |\vec{J} \cdot \vec{n}| > J_R(T) \\ |\vec{J} \cdot \hat{n}| & \text{si } |\vec{J} \cdot \vec{n}| \leq J_R(T) \end{cases} \quad \left[\frac{A}{m^2} \right] \quad (26)$$

siendo que $J_R(T)$ es definida según la ley de Richardson para la emisión termoeléctrica

$$J_R(T) = A_R T^2 e^{-\frac{q\phi_{eff}}{k_B T}} \quad \left[\frac{A}{m^2} \right] \quad (27)$$

ϕ_{eff} es la función trabajo efectiva, q es la carga eléctrica y $A_R = 1,20173 \cdot 10^6 [Am^{-2}K^{-2}]$ es la constante de Richardson. La densidad de corriente iónica se puede hallar como la diferencia entre la magnitud de la densidad de corriente perpendicular a la superficie $|\vec{J} \cdot \vec{n}|$ y la densidad de corriente de electrones J_e :

$$J_{ion} = |\vec{J} \cdot \vec{n}| - J_e \quad \left[\frac{A}{m^2} \right] \quad (28)$$

Ley de Richardson. Cuando un metal es bombardeado con partículas de alta energía (superior a la función trabajo del material) provenientes desde un gas a alta temperatura, emite electrones que se desprenden de la superficie. Las partículas calientes que golpean los átomos externos del metal le transfieren energía suficiente para salir del pozo potencial de la red cristalina del metal. De esta forma se crea una densidad de corriente en cada unidad de área superficial J_R conocida como corriente de Richardson, representada en la figura 8 con una flecha negra y el texto “emisión de electrones” (Marín (2010); Boulos et al. (2016)).

2.6.3 Fuente de calor de descarga de equilibrio en superficie (ánodo)

En el ánodo, el equilibrio térmico se describe con la misma ecuación

$$-\vec{n} \cdot (-k\nabla T) = Q_b \quad \left[\frac{W}{m^3} \right] \quad (29)$$

con el termino fuente descrito como

$$Q_b = |\vec{J} \cdot \vec{n}| \phi \quad \left[\frac{W}{m^3} \right]. \quad (30)$$

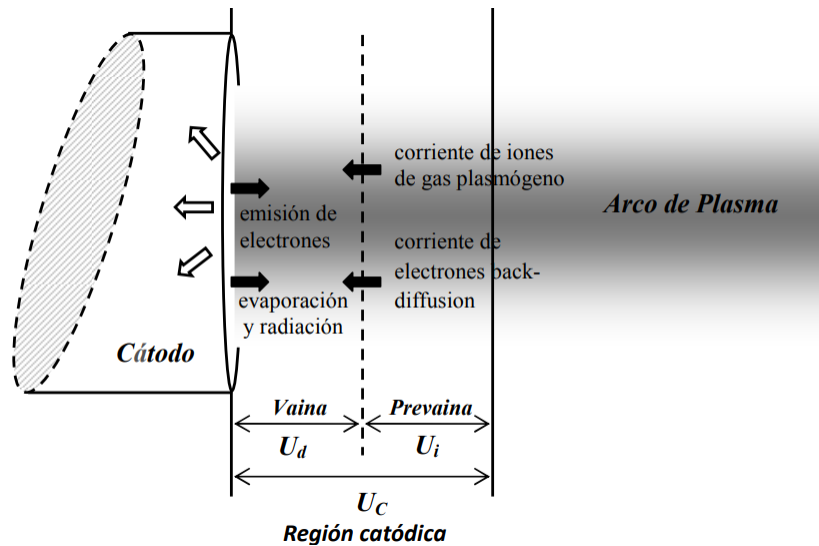


Figura 8: Ilustración de la región catódica en la cercanía del cátodo. Las flechas indican la dirección y sentido del fenómeno descrito por el texto contiguo. La corriente de iones de gas plasmógeno equivalen a las partículas de alta energía que inducen la corriente de Richardson. Figura tomada desde (Marín (2010)).

(COMSOL Multiphysics (1998e)).

2.7 Método de solución utilizado por COMSOL multiphysics[®] v.5.6.

Se solucionan las ecuaciones diferenciales parciales (EDP), presentadas anteriormente, mediante el método de elementos finitos (MEF). Este consiste en la discretización del dominio del modelo en regiones pequeñas de este, llamados elementos, que están conectados a través de puntos, llamados nodos, formando una malla. A cada uno de los elementos se le asigna una ecuación, llamada función de forma, que es una aproximación a la original. La solución ensamblada entre todas las funciones de forma es una aproximación al resultado de la EDP original. Estas funciones son polinomios (lineales, cuadráticas, cúbicas, ...). Dado que se busca una solución física, en todos los nodos de la malla la función de forma debe ser continua.

3 Metodología

Se inició el proyecto con una revisión bibliográfica del estudio científico de las antorchas de plasma que involucren corrientes eléctricas, dinámica de fluidos compresible en estado estacionario y transferencia de calor en estado estacionario y transitorio. Se buscó la implementación de las antorchas de plasma en la industria, tales como tratamiento de residuos, modificación superficial y herramientas de corte. A partir de los artículos consultados se escogieron los que presentaban mayor similitud para el estudio del estado del arte y se seleccionaron los diseños geométricos propuestos por diferentes autores, así como los parámetros de funcionamiento de las antorchas en investigación y aplicaciones. Estos antecedentes permitieron reducir el tiempo de la búsqueda de los parámetros requeridos en las aplicaciones y la generación de rangos de valores esperados de las cantidades físicas.

La simulación se desarrollo completamente con el software de simulación multifísico, COMSOL Multiphysics[®] versión 5.6. Se siguió el flujo de trabajo del software para el diseño y simulación de la antorcha (ver sección ??). Después, se modificaron los parámetros de control del sistema y se estudiaron los cambios observados como consecuencia de estos. Finalmente, se realizó la comparación de resultados con experimentos, estudios numéricos y simulaciones de otros autores.

3.1 Flujo de trabajo en COMSOL Multiphysics[®]

1. Se establece que el estudio a realizar es axialmente simétrico (2D).
2. Se seleccionan las físicas, es decir los módulos AC/DC, CFD y HT que contienen las ecuaciones que conforman el modelo a resolver.

3. Se establecen los parámetros del sistema que serán requeridos por la simulación: dimensiones (en milímetros) de los electrodos, caudal y composición de entrada del gas, intensidad de corriente entre el cátodo y el ánodo y condiciones de salida.
4. Se diseña la geometría de trabajo axialmente simétrica con cátodo varilla, con punta redondeada, interno y ánodo cilíndrico, hueco y coaxial al cátodo.
5. En la galería de materiales, se buscan el argón (Ar), cobre puro (Cu) y tungsteno (W), también conocido como Wolframio; estos se asignan a las diferentes partes del componente de trabajo de la siguiente forma: Argón para la región interna del soplete, cobre para los electrodos y Tungsteno como recubrimiento en la punta del cátodo.
6. Se define la malla, por defecto: refinar la malla no modifica los resultados (ver resultado expuesto en la imagen 17 del capítulo 4.2).
7. Finalmente, se corre la simulación
 - a) Estudio dependiente del tiempo para la transferencia de calor en sólidos y fluidos, manteniendo los demás módulos en régimen estacionario.
 - b) Posteriormente, se estudia el estado estacionario con todos los módulos en este régimen.

3.2 El sistema físico y las condiciones iniciales y de contorno

El dominio computacional se construyó distinguiendo entre las regiones sólidas y la región de fluido: el cátodo, la superficie de la punta de este, el ánodo, su superficie externa e interna y el canal de flujo de fluido.

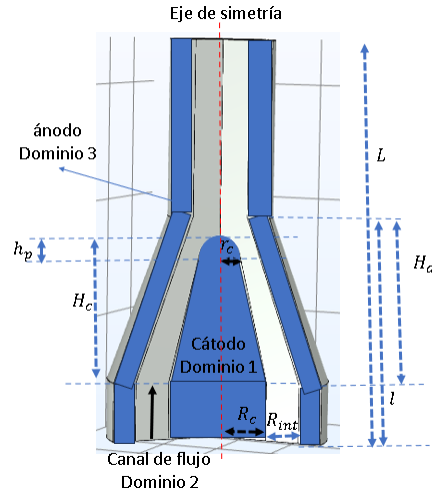


Figura 9: Componentes de una antorcha de plasma y dimensiones utilizadas en el presente estudio.

- **Cátodo:** Se modela considerando un recubrimiento de tungsteno (W) en la superficie activa (**punta del cátodo**), que incrementa la resistencia al desgaste por evaporación y mejora la emisión de electrones secundarios.
- **Ánodo:** Se simula un ánodo con dos superficies de contacto: **la superficie interna**, interfaz fluido-sólido, **y la externa**, interfaz sólido-fluido de enfriamiento, esta última sometida a un sistema de refrigeración por fluido.
- **Canal de Flujo:** Representa la zona en la que circula el gas, donde se imponen condiciones dinámicas y de transferencia de calor.

A cada uno de estos dominios se les asigna las propiedades de los materiales: cobre, para los electrodos, y argón, para el dominio del fluido (Ar); los valores precisos de las propiedades de estos materiales se condensan en la tabla 2, además, del hidrógeno y el nitrógeno, cuyas propiedades se muestran en la grafica 38, de la sección 4.5.3. Cada uno de estos dominios se subdivide en elementos triangulares, cuadriláteros y líneas rectas. En la figura

SIMULACIÓN MULTIFÍSICA DE ANTORCHA CON COMSOL

10 se observan las tres geometrías utilizadas en el proyecto: se basan en las expuestas por (Chine-P et al. (2018); Chinè (2017)): Las características principales del mallado, junto con los parámetros de control (tamaños máximos y mínimos de elemento, factores de curvatura y tasas de crecimiento), se resumen en las tablas 4 y 5.

Cuadro 2: Propiedades de los Materiales Utilizados

Propiedad	Símbolo Función	Cobre	Tungsteno	Argón	Unidad
Densidad	ρ	8960	17800	$\rho(T)$	kg/m^3
Capacidad calorífica	C_p	385	132	$c_p(T)$	$J/(kgK)$
Conductividad térmica	k	400	175	$k(T)$	$W/(mK)$
Conductividad eléctrica	σ	$5,998 \cdot 10^7$	—	$\sigma(T)$	S/m
Permitividad relativa	ϵ_r	1	—	1	—
Módulo de Young	E	$1,10 \cdot 10^{11}$	$3,6 \cdot 10^{11}$	—	Pa
Coefficiente de Poisson	ν	0,35	0,28	—	—
Resistividad de referencia	ρ_0	$1,72 \cdot 10^{-8}$	—	—	$\Omega \cdot m$
Coefficiente de temp. resistividad	α	0,0039	—	—	$1/K$
Temperatura de referencia	T_0	298	—	—	K
Módulo de Murnaghan	—	—	$-4,7 \cdot 10^{11}, -7,9 \cdot 10^{11}, -1,1 \cdot 10^{12}$	—	Pa
Parámetro de Lamé λ	λ	—	$1,79 \cdot 10^{11}$	—	Pa
Parámetro de Lamé μ	μ	—	$1,41 \cdot 10^{11}$	—	Pa
Viscosidad dinámica	μ	—	—	$\mu(T)$	$Pa \cdot s$
Coefficiente de emisión volumétrico	—	—	—	$Q_{rad}(T)$	W/m^3

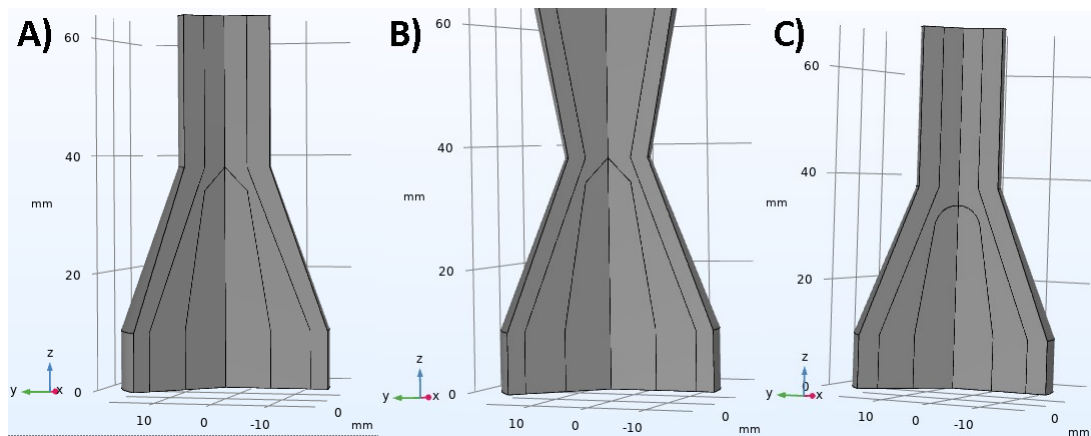


Figura 10: A) Geometría de la antorcha de cátodo cónico convergente y ánodo tubular recto. B) Geometría de la antorcha de cátodo cónico convergente y ánodo divergente. C) Geometría de la antorcha de cátodo de punta redondeada y ánodo recto. Estas se denominan en adelante A) cónico-tubular, B) cónico-tobera y C) esférico-tubular.

En la simulación, las condiciones térmicas del sistema se definieron de la siguiente

Cuadro 3: Parámetros de la geometría de las antorchas de plasma de arco eléctrico. Las tres antorchas consideradas tienen las mismas dimensiones: La segunda sección cónica del ánodo corresponde a la sección tubular. $h_p = 2,5[mm]$ para la antorcha c).

Cantidad	Valor (mm)	
L	Longitud total	68
l	Altura del catodo	38,5
H_c	Altura de la primer seccion conica del catodo	24,5
h_p	Altura de la punta del catodo	4
r_c	Radio mayor de la punta del cátodo	3
H_a	Altura de la primer sección cónica de del ánodo	28

manera. El enfriamiento del ánodo se modeló imponiendo una condición de flujo de calor convectivo en su superficie externa, con un coeficiente de transferencia de $10^4 [Wm^{-2}K^{-1}]$ y una temperatura externa de $500[K]$. Esta condición, también se presenta como fuente o sumidero de calor para los casos en los que la temperatura del ánodo sea inferior o superior a este valor, respectivamente. Además, se suponen pérdidas por emisión de radiación electromagnética con coeficiente de emisión neta de $h = 10^4 [Wm^{-3}K^{-1}]$ y plasma ópticamente delgado, es decir, no existe absorción de la radiación emitida por el fluido en ninguna otra parte del sistema. La temperatura inicial del sistema es de $300[K]$ y la punta del cátodo tiene la condición de emisión termoionica que garantiza la emisión de electrones secundarios, su temperatura es de $3500[K]$ y fuente de densidad de corriente de

$$J = -0,8 \times 10^8 [A/m^2]. \quad (31)$$

Todas las superficies que no cuentan con condiciones térmicas impuestas se consideran aislantes,

$$-\vec{n} \cdot \vec{q} = 0, \quad (32)$$

garantizando que el flujo de calor a través de dichos contornos es nulo.

Las propiedades de los gases de trabajo se obtienen de la librería de materiales de Comsol siendo modificada la conductividad eléctrica mínima (σ_{min}) con un valor de $8000[S/m]$ con el objetivo de garantizar la corriente inicial en la región del fluido. El fluido ingresa en la antorcha con flujo de vórtice libre expresado como

$$v_{\theta} = \frac{K}{r} [m/s] \quad (33)$$

con $K = 81 \times 10^{-3} [s/m^2]$ y con una componente de la velocidad

$$\vec{v}_z = 4\hat{z} \left[\frac{m}{s} \right] \quad (34)$$

y temperatura de $300[K]$. En la salida se cumple la siguiente condición de estrés viscoso 12 con presión externa $p_0 = 0[atm]$. Finalmente, los efectos gravitacionales se consideran despreciables.

Cuadro 4: Estadísticas Generales de la Malla para las Tres Geometrías

Descripción	Figura 10.a	Figura 10.b	Figura 10.c
<i>Vértices de malla</i>	1 827	2 912	2 181
(Elementos de vértice)	14	14	15
<i>Triángulos</i>	2 834	4 780	3 465
<i>Cuadriláteros (Quads)</i>	332	420	354
<i>Elementos de arista</i>	320	412	364
<i>Número total de elementos</i>	3 166	5 200	3 819
<i>Calidad mínima de elemento</i>	0,2955	0,3154	0,3079
<i>Calidad media de elemento</i>	0,8406	0,8364	0,8356
<i>Ratio de área de elemento</i>	0,025553	0,029572	$1,1941 \cdot 10^{-4}$
<i>Área de mallado (mm^2)</i>	852	942	852

Cuadro 5: Parámetros de Configuración de Tamaño para las Tres Geometrías

Descripción	Figura 10.a	Figura 10.b	Figura 10.c
<i>Tamaño máximo de elemento</i>	4,56	3,60	4,56
<i>Tamaño mínimo de elemento</i>	0,0204	0,0204	0,0204
<i>Factor de curvatura</i>	0,30	0,30	0,30
<i>Tasa máxima de crecimiento de elemento</i>	1,30	1,30	1,30

4 Resultados y discusión

La solución del sistema de ecuaciones diferenciales parciales (EDP) que constituye el modelo físico-matemático propuesto corresponde a campos escalares dependientes de las variables espaciales y temporal: el potencial eléctrico $\phi(\vec{r})$, el campo de temperatura $T(\vec{r}; t)$, la distribución de presión $p(\vec{r})$ y el campo vectorial de velocidades $\vec{v}(\vec{r})$.

Las soluciones transitorias de las ecuaciones del modelos, obtenidas mediante esquemas de elementos finitos con mallado adaptativo, es decir, ajustando el tamaño de los elementos en la zona cercana a los bordes geométricos para mejorar la precisión del resultado, se muestran en las figuras 11 - 13 y la soluciones en estado estacionario se muestran en las figuras 16 - 19 que se presentan en las siguientes subsecciones. Estas corresponden a tres configuraciones geométricas de antorchas de arco no transferido operando en régimen transitorio con idénticas condiciones iniciales y de contorno.

4.1 Evolución temporal de la temperatura durante el encendido de la antorcha

La evolución temporal de la temperatura durante el primer segundo del encendido de la antorcha se muestran en las figuras 11 - 13 y en las figuras 14 y 15 se muestran los valores máximos y mínimos: cada perfil se muestra en los mismos 8 instantes.

En el instante inicial ($t = 1 [ms]$), las tres geometrías presentan idéntica temperatura

máxima de $3,50 \cdot 10^3 [K]$ (figura 14), mientras que la mínima varía: $300 [K]$ en cónico-tobera (figura 11), $184 [K]$ en cónico-tubular (figura 12) y $193 [K]$ en esférico-tubular (figura 13). El calentamiento Joule eleva rápidamente la temperatura máxima alcanzando $8,83 \cdot 10^3 [K]$ en cónico-tobera (figura 11), $8,88 \cdot 10^3 [K]$ en cónico-tubular (figura 12) y $1,16 \cdot 10^4 [K]$ en esférico-tubular a $t = 2,138 [ms]$. En la figura 14 se muestra la evolución temporal de estos valores.

Cabe destacar un resultado que expone las fronteras del modelo implementado: en el instante $t = 1,122 [ms]$, la configuración cónico-tubular presenta una temperatura mínima no física de $-0,46 [K]$ (figura 15). Esta anomalía no es un simple error numérico, sino una consecuencia directa y esperada de la ruptura de la suposición de Equilibrio Termodinámico Local (LTE). En efecto, los modelos basados en LTE, como el utilizado en este trabajo, presentan limitaciones conocidas precisamente en las regiones donde se manifiesta este artefacto: zonas de baja densidad de energía y en la proximidad de las paredes frías de la antorcha. La aparición de este resultado subraya que, para obtener una descripción físicamente precisa en dichas condiciones, es necesario emplear modelos de no-equilibrio térmico (Trelles et al. (2007)).

En $t \approx 100 [ms]$, la tasa de aumento de la temperatura máxima se reduce drásticamente: la diferencia entre $t = 100 [ms]$ y $t = 1000 [ms]$ es inferior a $10 [K]$ en las tres configuraciones (figura 15), lo que indica la aproximación al régimen estacionario. Esto refleja el equilibrio entre la generación de calor por efecto Joule $\vec{J} \cdot \vec{E}$ y las pérdidas térmicas por conducción en el cátodo $\nabla \cdot (k \nabla T)$ y convección en el flujo de argón $\rho C_p \vec{u} \cdot \nabla T$ así como emisión de radiación electromagnética Q_{rad} .

Las diferencias (ΔT) que se muestran en la figura 15 evidencian que la geometría

esférica-tubular (figura 13) experimenta una estabilización más rápida con $\Delta T_{\text{máx}} = 100[K]$ entre $t = 2,138[ms]$ y $4,074[ms]$ frente a los $760[K]$ de incremento en cónico-tubular (figura 12) en el mismo intervalo. Además, en los primeros instantes, la esférica-tubular (figura 13) registra la mayor razón de cambio de calentamiento: $\Delta T_{\text{máx}} = 4400[K]$ entre $t = 1,122[ms]$ y $1,349[ms]$, mientras que cónico-tubular (figura 12) y cónico-tobera (figura 11) alcanzan $\Delta T_{\text{máx}} = 1550[K]$ y $2230[K]$, respectivamente. Este comportamiento contrasta con la suave pendiente de cónico-tobera (figura 11) en el arranque ($\Delta T_{\text{máx}} = 70[K]$ entre $t = 1[ms]$ y $1,122[ms]$), evidenciando cómo la forma de la punta modula la concentración de corriente y, por ende, el calentamiento Joule.

Si comparamos estos datos con las temperaturas absolutas de la figura 14, observamos que a $t = 2,138[ms]$ la esférica-tubular (figura 13) ya alcanza $T_{\text{máx}} = 1,16 \cdot 10^4[K]$, mientras que cónico-tobera (figura 11) solo llega a $T_{\text{máx}} = 8,83 \cdot 10^3[K]$. Las Figuras 11 - 13 ilustran cómo el perfil térmico se concentra en la punta, mostrando un gradiente mayor en la configuración esférica. A medida que t avanza hacia $1000[ms]$, las antorchas convergen a valores de $T_{\text{máx}} \approx 9,6 \cdot 10^3[K]$ - $1,17 \cdot 10^4[K]$, pero con ritmos distintivos según la forma de la punta del cátodo.

Estos resultados subrayan que las puntas esféricas favorecen un arranque térmico rápido e intenso y una rápida estabilización, mientras que las cónicas proporcionan un calentamiento más lento. Esto implica que una geometría esférica puede reducir el tiempo de encendido e incrementa los gradientes térmicos. Por el contrario, las puntas cónicas mitigan estos gradientes.

SIMULACIÓN MULTIFÍSICA DE ANTORCHA CON COMSOL

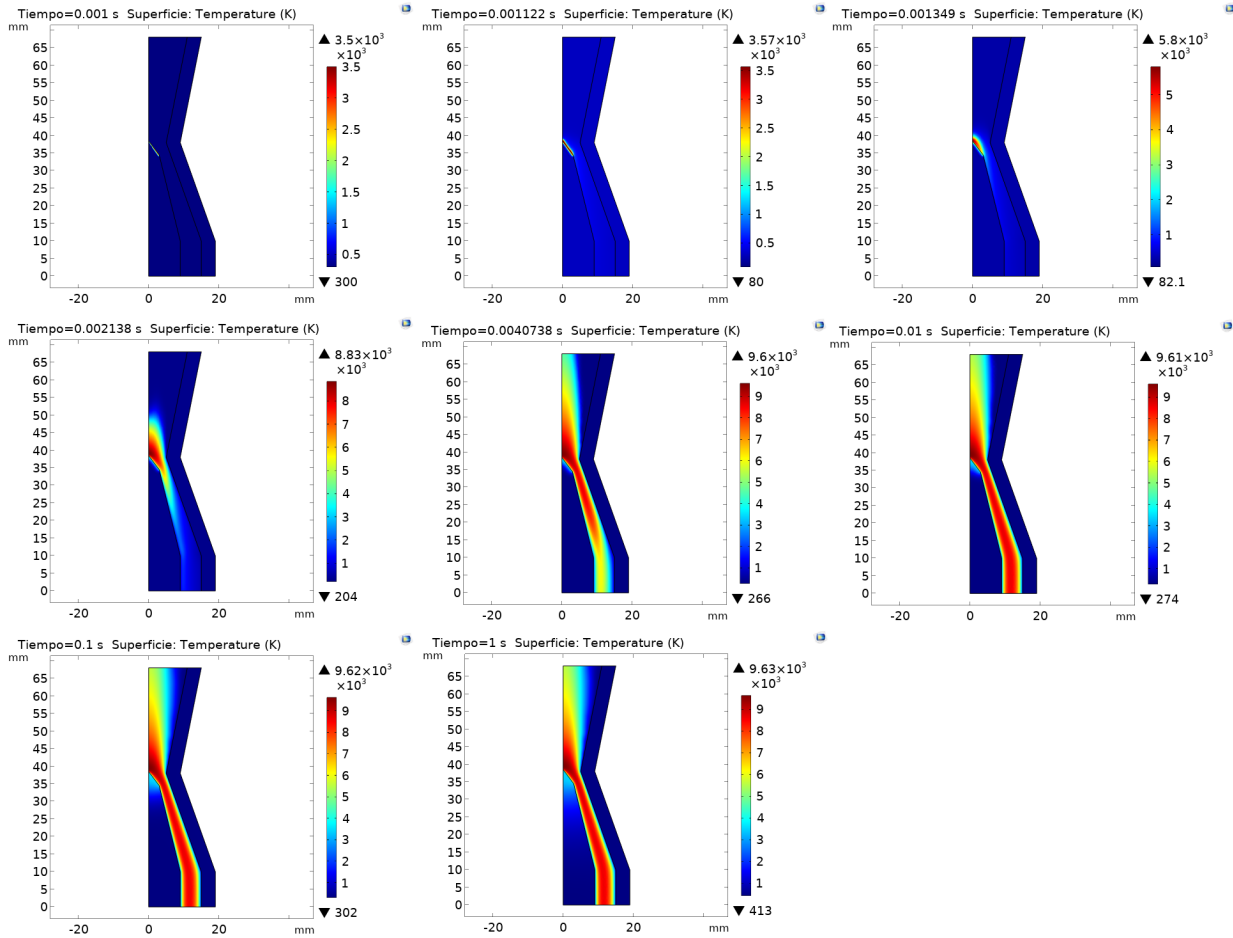


Figura 11: Evolución del perfil de temperatura: encendido de la antorcha (tipo (a)) de arco eléctrico no transferido con ánodo en forma de tobera y cátodo en forma de varilla cónica convergente hacia la salida del chorro.

SIMULACIÓN MULTIFÍSICA DE ANTORCHA CON COMSOL

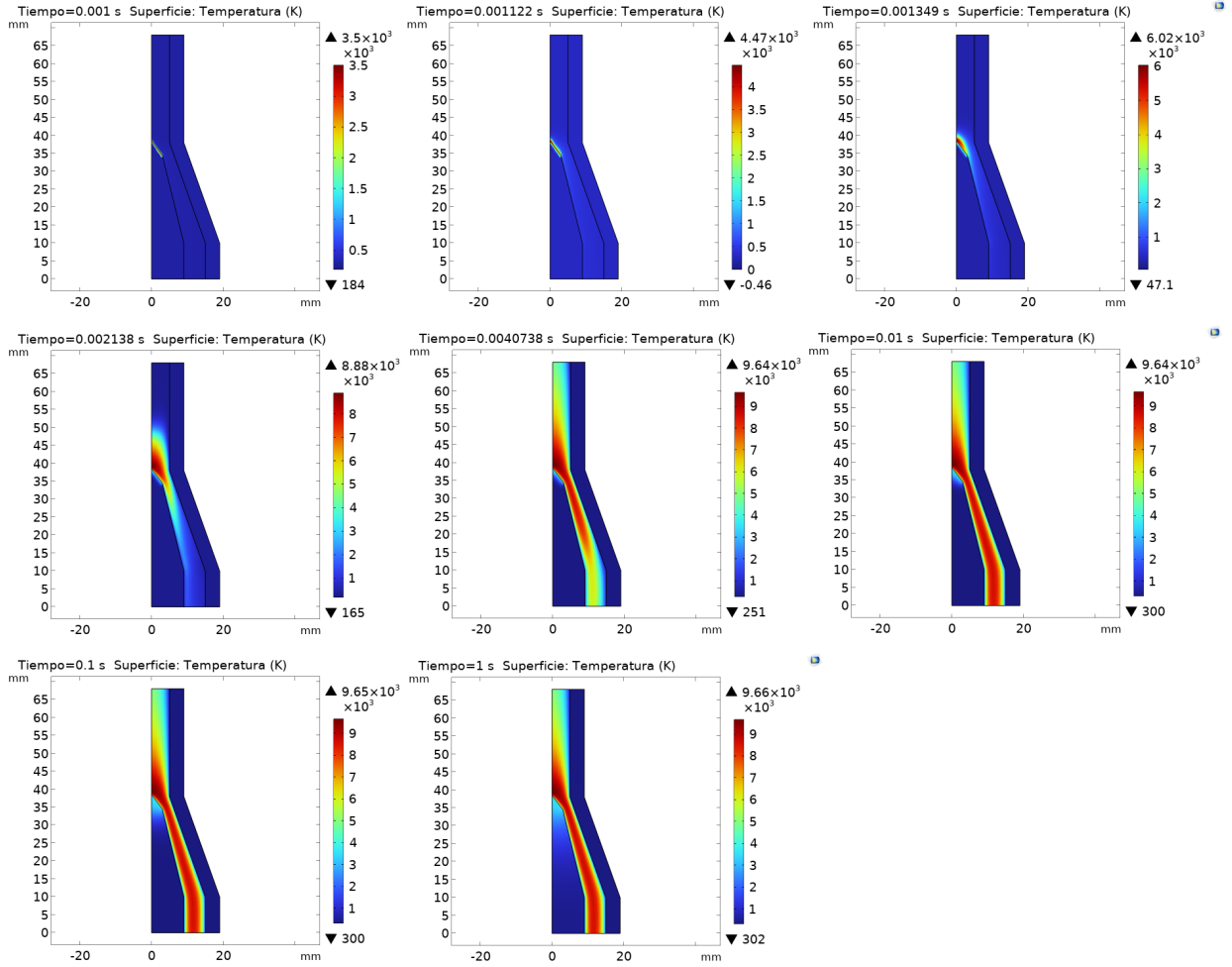


Figura 12: Evolución del perfil de temperatura: encendido de la antorcha (tipo (b)) de arco eléctrico no transferido con ánodo en forma de tubo y cátodo en forma de varilla cónica convergente hacia la salida del chorro.

SIMULACIÓN MULTIFÍSICA DE ANTORCHA CON COMSOL

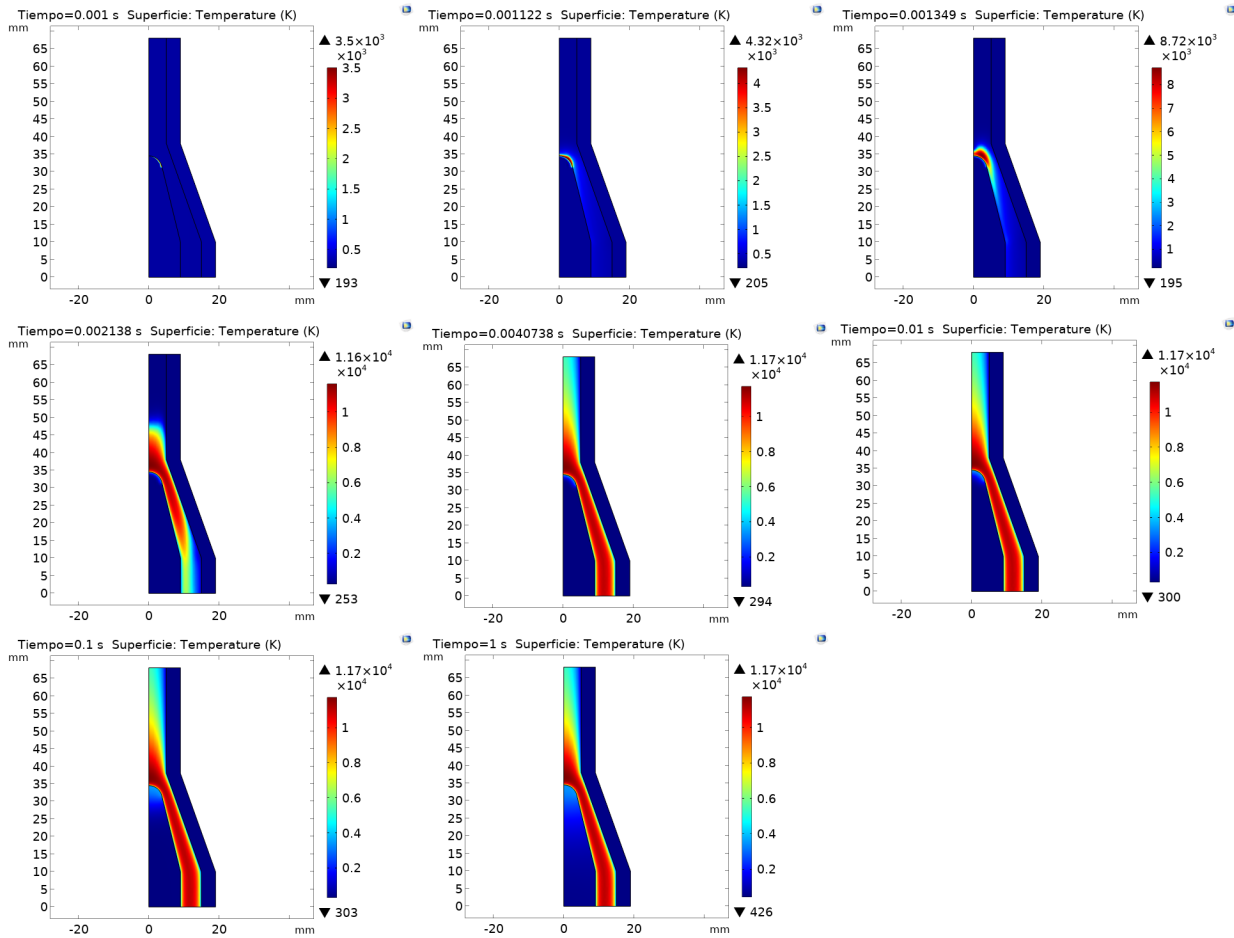


Figura 13: Evolución del perfil de temperatura: encendido de la antorcha (tipo (c)) de arco eléctrico no transferido con ánodo en forma de tubo y cátodo en forma de varilla cónica convergente con punta redondeada hacia la salida del chorro.

SIMULACIÓN MULTIFÍSICA DE ANTORCHA CON COMSOL

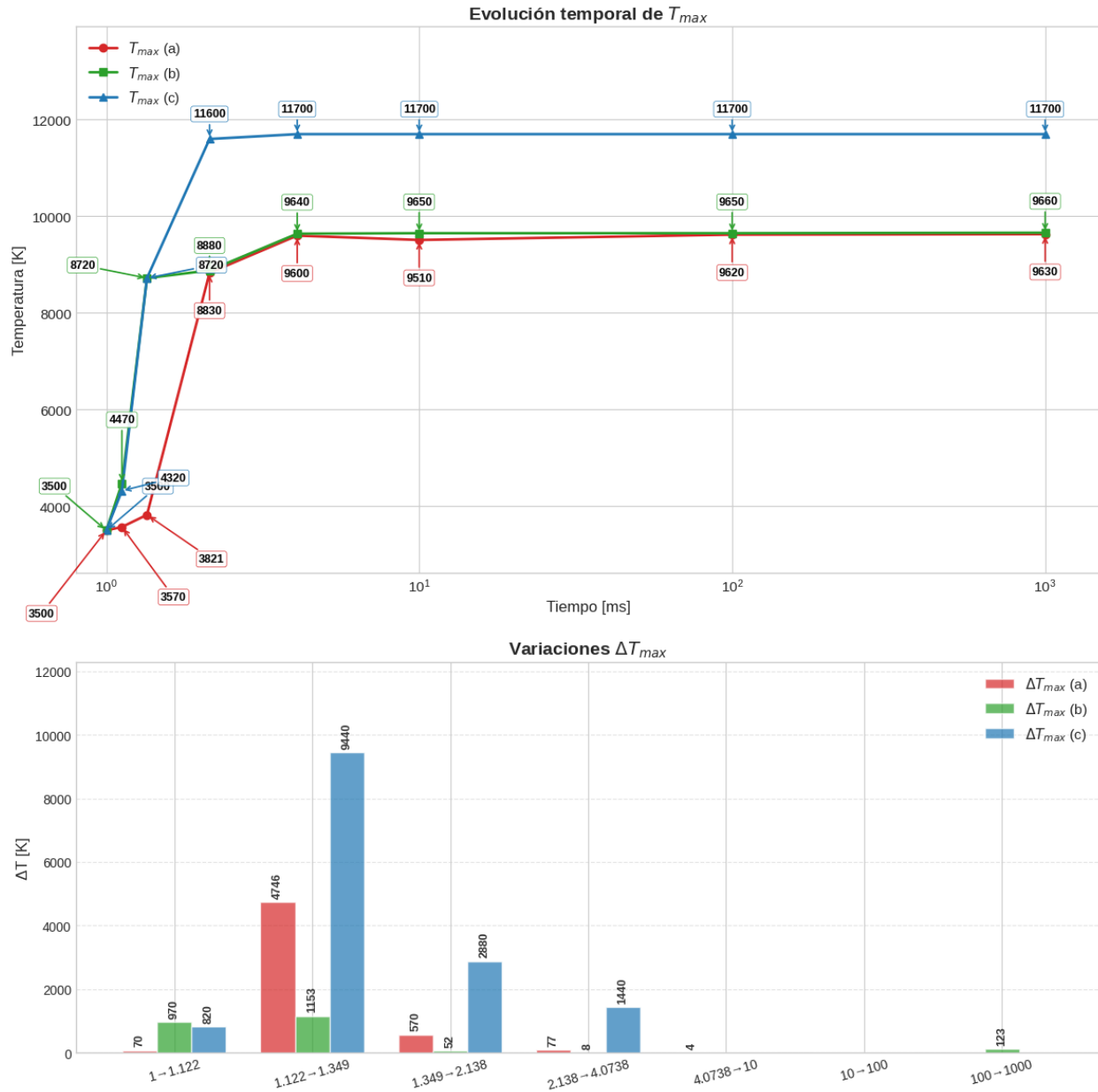


Figura 14: Comparación de la evolución temporal de la temperatura en las tres configuraciones de antorchas: a) Punta cónica con ánodo tobera, b) Punta cónica con ánodo tubular y c) Punta esférica con ánodo tubular.

SIMULACIÓN MULTIFÍSICA DE ANTORCHA CON COMSOL

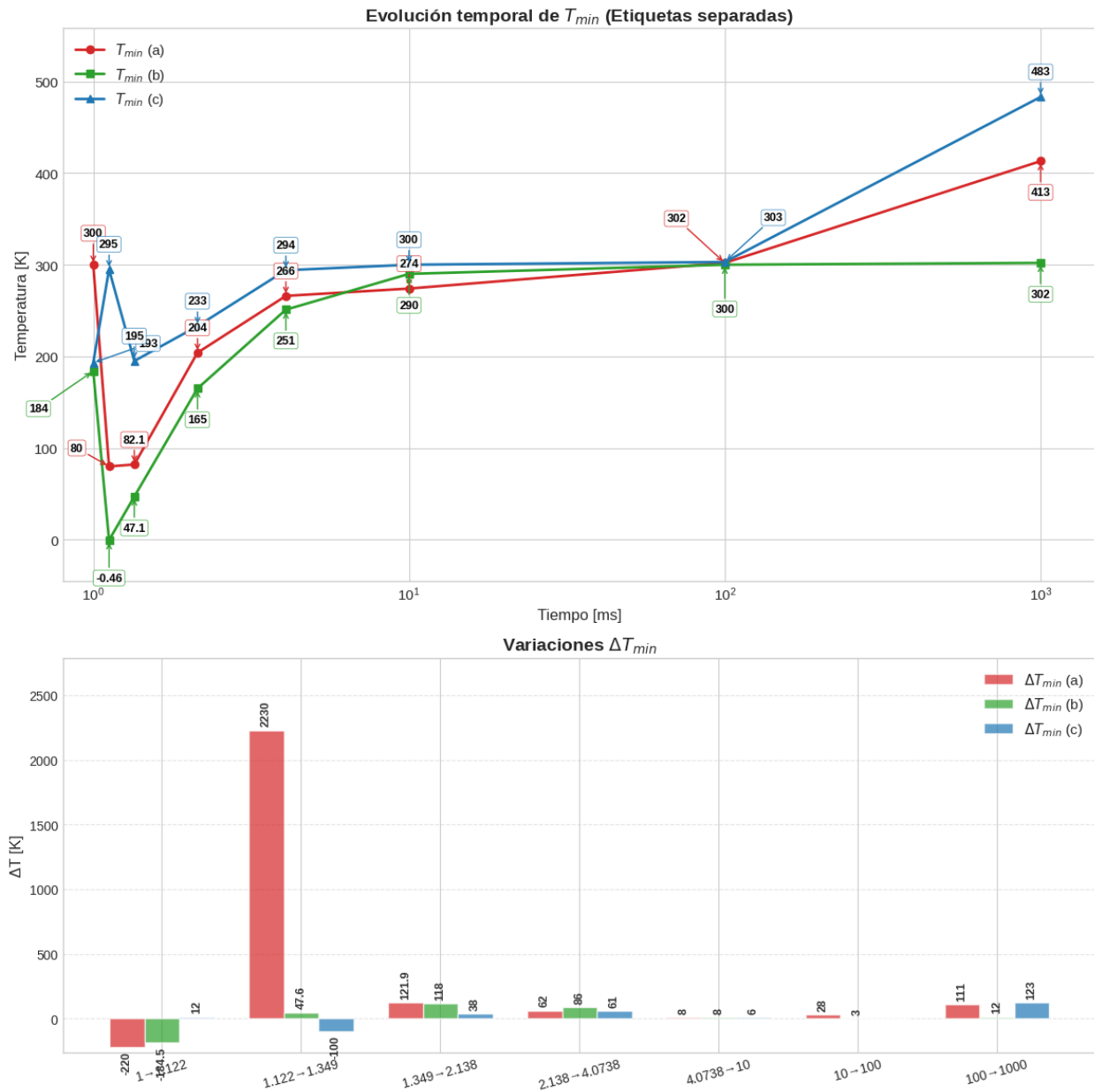


Figura 15: Comparación de la evolución temporal de la temperatura en las tres configuraciones de antorchas: a) Punta cónica con ánodo tobera, b) Punta cónica con ánodo tubular y c) Punta esférica con ánodo tubular.

4.2 Perfil de temperatura de las antorchas de plasma en estado estacionario

La solución del modelo implementado para la temperatura, en estado estacionario, se muestra en la figura 16 para las tres geometrías consideradas: a) cónico-tobera, b) cónico-

tubular y c) esférico-tubular. Note que la tendencia de la temperatura máxima evidenciada en el estado transitorio se refleja en el resultado estacionario: valores en el siguiente orden

$$T_{esferico-tubular} > T_{conico-tubular} > T_{conico-tobera}.$$

Se observa en la figura 16 que en la región de diámetro reducido de flujo en la antorcha incrementa la temperatura máxima en régimen estacionario en esta zona, con respecto al valor mas estable del estado transitorio: las diferencias en la temperatura mas alta alcanzada para cónico-tobera $1,27 \cdot 10^3 [K]$; cónico-tobera $1,44 \cdot 10^3$ y esférico-tubular $800 [K]$. La antorcha esférica-tubular (figura 16.c) alcanza una temperatura máxima de $1,25 \times 10^4 [K]$, que es $1,40 \times 10^3 [K]$ ($\approx 12,6 \%$) superior a la de la cónica-tubular (16.b), con $1,11 \times 10^4 [K]$, y $1,60 \times 10^3 [K]$ ($\approx 14,7 \%$) superior a la cónico-tobera (16.a), con $1,09 \times 10^4 [K]$. Estos resultados sugieren que el calentamiento Joule opera de manera análoga en las tres configuraciones, generando gradientes térmicos comparables en la región central del fluido, donde se concentra la mayor parte de la energía térmica.

Se observa en la Figura 16 que la temperatura de la antorcha sigue incrementando lentamente, como se evidenció antes, hasta el estado estacionario. Específicamente, la antorcha esférica-tubular (Figura 16.c) alcanza una temperatura máxima de $1,25 \cdot 10^4 [K]$. Este valor es $1,40 \cdot 10^3 [K]$ ($\approx 12,6 \%$) superior al de la configuración cónica-tubular (Figura 16.b), que registra $1,11 \cdot 10^4 [K]$. Además, supera en $1,60 \cdot 10^3 [K]$ ($\approx 14,7 \%$) a la antorcha cónico-tobera (Figura 16.a), cuya temperatura máxima es de $1,09 \cdot 10^4 [K]$. De refinar la malla computacional, es decir hacer el tamaño promedio de elemento mas pequeño (denominado malla extremadamente fina por COMSOL Multiphysics[®]), manteniendo las mismas condiciones de operacion se obtienen temperaturas superiores de hasta $12,7 \cdot 10^3 [K]$, $200 [K]$ ($\approx 1,6 \%$) superior al resultado obtenido con tamaño de elemento promedio mas grande (denominado

mallla normal por COMSOL Multiphysics®).

Los rangos de temperatura reportados en fuentes externas son coherentes con los resultados expuestos previamente: (Shalai et al. (2022)) miden experimentalmente temperaturas electrónicas de $6725 \pm 740[K]$ y simulan temperatura electrónica $T_e = 6850[K]$ y del gas $T_g = 6215[K]$ en un micromotor de electroplasma de argón; (Siddanathi et al. (2023)) y (Chiné et al. (2019)) reportan rangos entre $12000[K]$ y $15306[K]$ en antorchas de arco no transferido y simulaciones con COMSOL Multiphysics®; y (Li and Chen (2001)) modelan temperaturas aún mayores, entre $23000[K]$ y $24000[K]$, en simulaciones tridimensionales de arcos en argón. Por lo que los 9630 hasta $12500[K]$ observados en el presente estudio se encuentran dentro del rango medio de temperatura reportado.

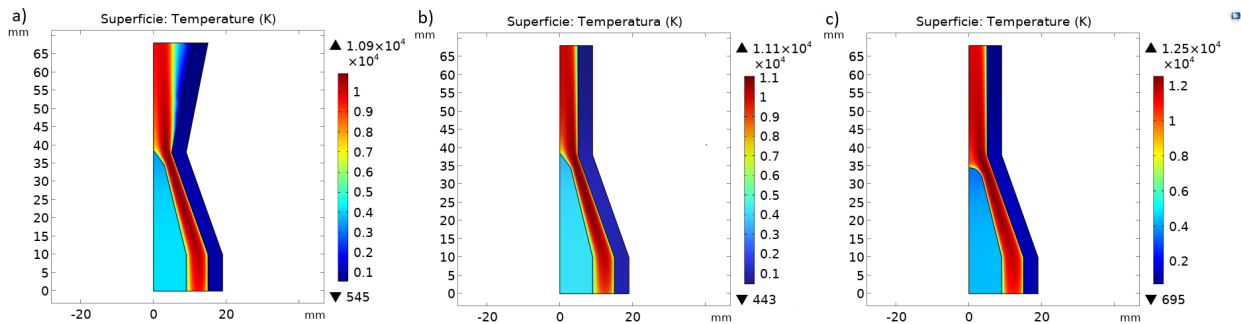


Figura 16: Distribución espacial de la temperatura en los 3 tipos de antorchas de plasma considerados: (a), (b) y (c). La máxima se localiza en la región central de flujo. Las temperaturas máximas alcanzadas son: a) $1,09 \times 10^4$ K, b) $1,11 \times 10^4$ K y c) $1,25 \times 10^4$ K.

SIMULACIÓN MULTIFÍSICA DE ANTORCHA CON COMSOL

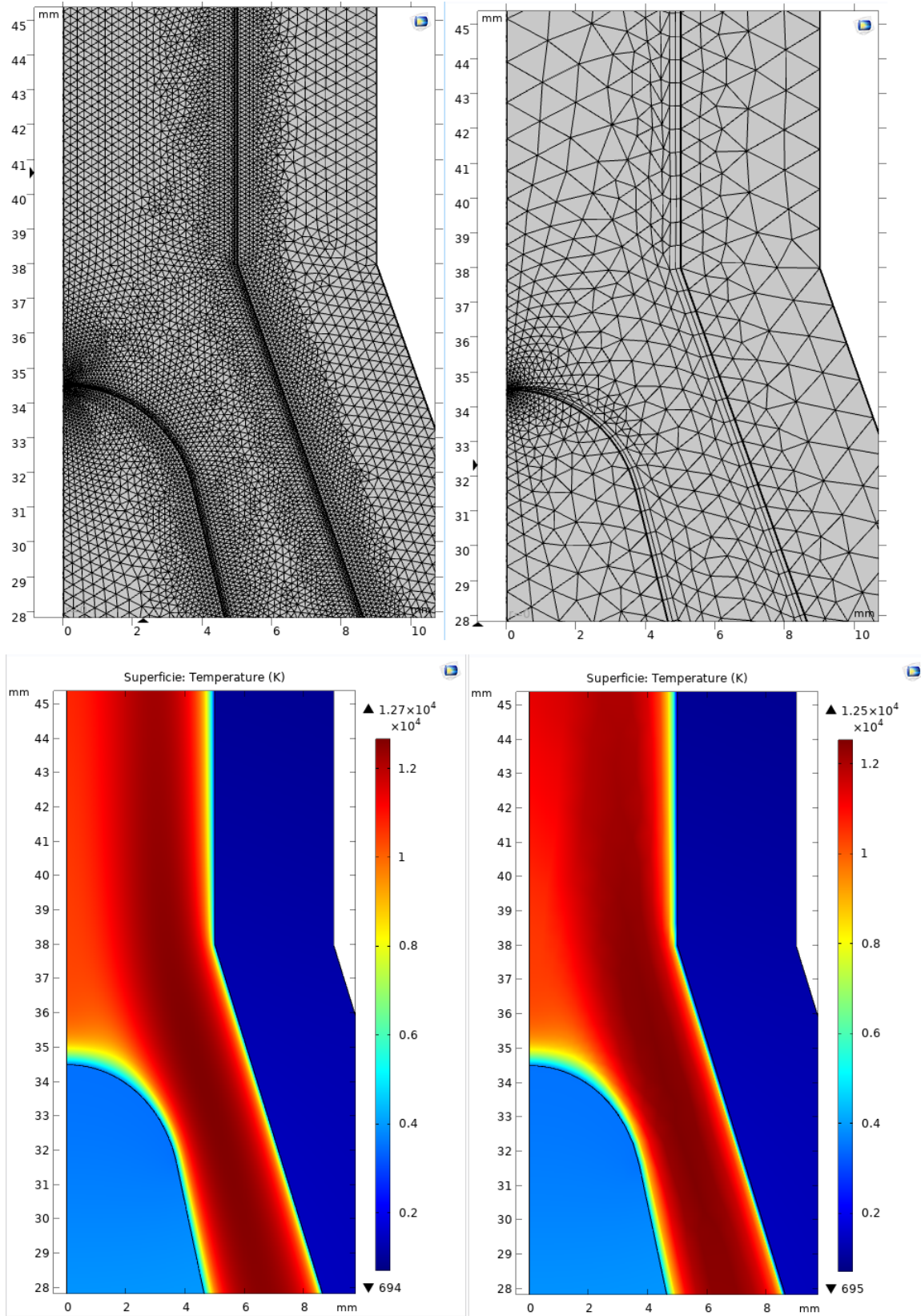


Figura 17: Temperatura de la antorcha esférico-tubular, en la fila inferior de este arreglo de imágenes, con dos diferentes tamaños promedio de los elementos finitos vistos en la primer fila.

4.3 Perfil de rapidez de fluido en la antorcha

En la figura 18 se observa el perfil de rapidez del chorro en estado estacionario para los tres tipos de antorchas considerados: (a), (b) y (c). En las imágenes se puede observar que la rapidez aumenta desde la entrada del gas hacia la salida del chorro, alcanzando su pico cerca de la punta del cátodo, donde el campo eléctrico es más intenso. Este incremento brusco obedece a la conversión de energía eléctrica en térmica y, posteriormente, en cinética del flujo producto del calentamiento Joule y al efecto tobera generado por el estrechamiento del conducto. El fuerte gradiente de velocidad en dicha región refleja además la presencia de una capa límite muy delgada junto a las paredes de la antorcha. A medida que el fluido se acerca a la salida de la antorcha, la velocidad disminuye debido a la expansión del gas hacia la región de menor presión y a las interacciones con las superficies de los electrodos.

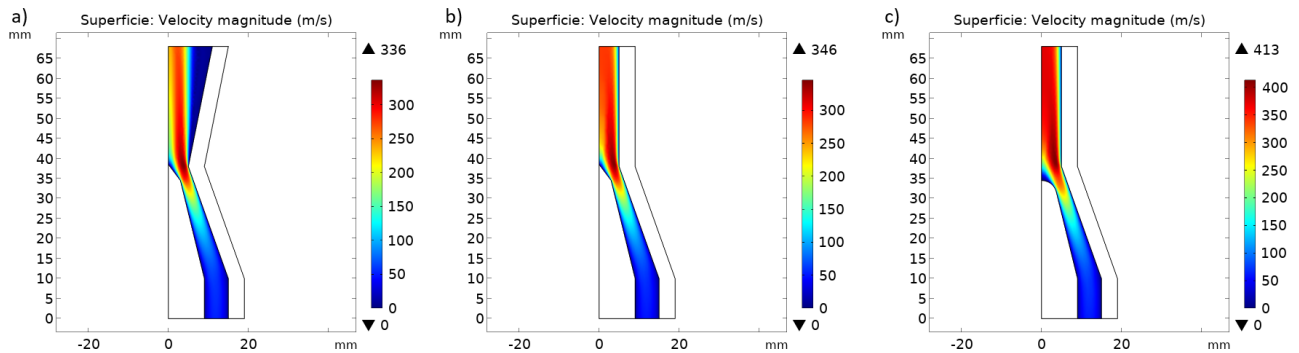


Figura 18: Perfiles de rapidez del fluido para las tres geometrías consideradas: (a), (b) y (c). El máximo de velocidad se localiza entre la punta del cátodo y el final de la sección convergente del ánodo en a) y b), mientras que en la geometría c) aparece ligeramente más adelante (aguas abajo).

Se aprecia que la geometría esférica-tubular (figura 18.c) exhibe el valor de rapidez pico más elevado ($413 [m/s]$), localizado poco más adelante de la punta del cátodo y el extremo convergente del ánodo, mientras que las geometrías cónica-tubular (figura 18.b) y

cónico-tobera (figura 18.a) alcanzan máximos inferiores ($\approx 346 [m/s]$ y $336 [m/s]$, respectivamente), situados entre 35 y $45 [mm]$ desde la entrada. Además, el núcleo de alta velocidad en la antorcha esférica-tubular (figura 18.c) es más ancho y se extiende de forma más prolongada, lo que indica un gradiente de velocidad más moderado hacia la zona de expansión; en cambio, la geometría cónico-tobera (figura 18.a) presenta un núcleo más estrecho y un decaimiento mayor tras la convergencia, sugiriendo un estrechamiento pronunciado que favorece la disipación rápida al exterior. La antorcha cónico-tobera (figura 18.b), por su parte, tiene un comportamiento intermedio, con un núcleo de amplitud moderada y una transición gradual hacia la región de expansión. Estos resultados evidencian que la geometría interna de la antorcha determina la distribución y magnitud de la velocidad del chorro, modulando la extensión del núcleo de alta velocidad y su disipación, lo que impacta el transporte de energía y la estabilidad del plasma en la salida, de acuerdo con las ecuaciones de conservación de cantidad de movimiento 8 y de energía 13 del modelo físico-matemático.

Los resultados expuestos previamente se encuentran dentro del rango de cientos de metros por segundo observado y discutido en otras fuentes que modelan el chorro de plasma térmico. (de la Figal et al. (2010)) estudia 7 modelos de antorcha de plasma y obtiene valores de rapidez del chorro entre 210 y $1167 [m/s]$ con la velocidad de entrada del gas (V_{en}), entre $75 - 100 [m/s]$, el más cercano al rango de $336 - 413 [m/s]$ es el modelo 2 con rapidez de salida de $273 [m/s]$ y temperatura de $13550 [K]$. La diferencia, entre los valores más cercanos, es de $18,75 \%$. Por su parte (Siddanathi et al. (2023)) evidencia que la rapidez máxima alcanzada en su simulación supera los $600 [m/s]$ con temperatura superior a los $16000 [K]$, usando oxígeno como gas de trabajo. Otros gases como el aire y el nitrógeno presentan valores en torno a los

500[m/s]. (Alshunaifi et al. (2021)) Obtiene rapidez de 90, 110 y 150 [m/s] usando nitrógeno y diferentes magnitudes de corriente eléctrica.

4.4 Perfil de potencial eléctrico en la antorcha

En la figura 19 se observa el perfil de potencial eléctrico en las tres antorchas consideradas. Se observa en las tres geometrías que el ánodo está a 0[V] y desciende de manera continua hasta alcanzar valores negativos máximos del potencial de $-1,09[V]$ en cónico-tobera (19.a), $-1,08[V]$ en cónico-tubular (19.b) y $-1,65[V]$ en esférico-tubular (19.c). La caída de potencial más pronunciada se concentra en la zona de estrechamiento, donde las líneas de equipotencial se agrupan entre las regiones de alto y bajo voltaje. De acuerdo con la ecuación de Laplace (5) y la ley de Ohm (7) la reducción de la sección transversal en el canal incrementa la densidad de carga e incrementando el gradiente de potencial eléctrico. En consecuencia, el campo eléctrico es más intenso, entonces, el calentamiento Joule (ver ecuación 23) es mayor en esa zona. Esto se refuerza en los perfiles de temperatura (figura 16) debido a que allí la temperatura es la más alta y, luego de la punta del cátodo, es la primer zona donde se incrementa la temperatura rápidamente (ver incremento de la temperatura en las figuras 11 - 13).

La diferencia de potencial eléctrico entre los electrodos presentada previamente es mas baja que lo reportado por otros autores tales como el de (Tang et al. (2022)) que calcula la caída de voltaje de la columna de plasma entre 22 y 25[V], y compara este valor calculado con un voltaje experimental de la fuente de poder de 29,5[V] bajo las condiciones: 600[A] de corriente, 50SLM de flujo de gas; En (de la Figal et al. (2010)) se exponen los resultados del estudio numérico de 7 modelos con voltajes de 47,3 y 100[V] entre los electrodos. La

diferencia entre las magnitudes de 1,08 hasta 1,65[V] puede explicarse por la relación inversa entre el potencial eléctrico y la corriente evidenciada en la figura 2 de (Kamińska et al. (2015)).

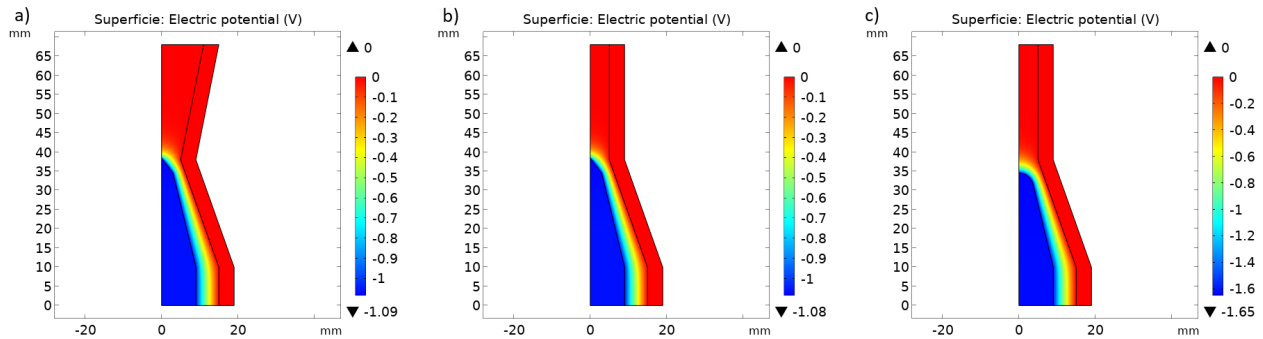


Figura 19: Distribución espacial del potencial eléctrico en los tres tipos de antorcha considerados: (a), (b) y (c), manteniendo idénticas, para las tres antorchas, todas las mas condiciones de la simulación.

4.5 Influencia de los parámetros de entrada sobre la evolución del perfil de temperatura durante la ignición

En esta sección se presentan los resultados del estudio paramétrico de la evolución de la temperatura considerando diferentes magnitudes de flujo másico (Q) y la fuente de corriente eléctrica impuesta en la punta del cátodo (Q_j). Para cada una de las tres configuraciones geométricas (cónico-tobera, cónico-tubular y esférico-tubular) se estudiaron los siguientes valores de flujo másico: $Q = \{2,778 \cdot 10^{-4}, 8,33 \cdot 10^{-4}, 2,2224 \cdot 10^{-3}, 2,778 \cdot 10^{-3}\} [m^3/s]$ y $Q_j = \{-1 \cdot 10^8, -6,7 \cdot 10^7, -3,4 \cdot 10^7, -1 \cdot 10^6\} [A/m^2]$ Los resultados son expuestos en la figuras 24 - 26 para la geometría esférico-tubular; 27 - 30 para la geometría conico-tobera; 31 - 34 para la geometría conico-tubular.

Las curvas que describen la evolución temporal de la temperatura máxima en función de Q y Q_j se muestran en las figuras 20 - 22, correspondientes respectivamente a las geo-

metrías cónico-tobera, cónico-tubular y esférico-tubular. Se estudia la temperatura máxima a partir de los $3500[K]$ dado que desde este valor se presenta la emisión de electrones en la superficie del cátodo que enriquece la dinámica del calentamiento. Note que en los casos $Q = 2,778 \cdot 10^{-3}$ con $Q_j = -1 \cdot 10^8$ y $-6,7 \cdot 10^7$ para la geometría cónico-tubular tiene un perfil adicional en $t = 2,138 [ms]$. Esto es debido a que para esa combinación Q , Q_j y geometría evoluciona muy rápidamente y es necesario adicionar un perfil en el arreglo de imágenes para tener buena visibilidad de la evolución en el tiempo de este caso.

A continuación se presenta un análisis de las tendencias observadas.

4.5.1 Evolución de la temperatura para los diferentes valores de parámetros

Cuando la fuente de corriente es más alta $Q_j = -1 \cdot 10^8 [A/m^2]$ el calentamiento Joule en la región del fluido incrementa, por lo que la temperatura máxima T_{max} alcanza rápidamente valores elevados (del orden de $10\,000 - 12\,000[K]$ en los primeros $10[ms]$), regulada por el valor del caudal (Q). En contraste, para densidades intermedias ($Q_j = -6,7 \cdot 10^7$ y $Q_j = -3,4 \cdot 10^7 [A/m^2]$) la temperatura máxima se estabiliza en valores notablemente menores, típicamente entre $5\,000[K]$ y $10\,000 [K]$. Finalmente, al imponer una fuente de corriente muy baja ($Q_j = -1 \cdot 10^6 [A/m^2]$) el aporte de calor es insuficiente para superar el umbral termo-iónico del cátodo y, en todos los casos, T_{max} permanece cercano a $3\,500[K]$, que corresponde al valor aproximado de emisión termo-iónica de tungsteno (línea de referencia en las gráficas 20 - 22), sin que se produzca un calentamiento significativo del gas.

Resultados similares han sido reportados por (Demir et al. (2020)), quienes observaron que la temperatura máxima en antorchas DC de argón se encuentra fuertemente influenciada por la magnitud de la corriente: al aumentar de 50 a $250 [A]$, la temperatura del plasma

osciló entre 13 200 y 16 000 [K], mostrando también una sensibilidad marcada al régimen de calentamiento Joule. Sin embargo, a diferencia del presente estudio, (Guo et al. (2015)) reportaron que la temperatura no varió significativamente con la corriente en presencia de caudales constantes, lo cual atribuyeron a la estabilidad de la entalpía entrante. Estas diferencias podrían deberse al uso de mezclas gaseosas (argón-hidrógeno) y a las condiciones geométricas particulares consideradas por dichos autores.

En todos los gráficos paramétricos (figuras 20 - 22) se aprecia que, a medida que Q_j decrece en magnitud absoluta, la pendiente inicial del ascenso térmico (de T_{max} versus t) disminuye, posiblemente debido a la relación directa entre densidad de corriente y tasa de generación de energía térmica expresada en el termino fuente de calentamiento Joule. De manera general, al aumentar el flujo de argón el fluido se somete a mayor enfriamiento convectivo, de modo que la *temperatura máxima estacionaria*¹ disminuye para cualquier valor fijo de Q_j . Por ejemplo, en la geometría cónico-tobera (figuras 27 - 30) con $Q_j = -1 \cdot 10^8 \text{ [A/m}^2\text{]}$, se observa que al incrementar el flujo másico desde $Q = 2,224 \cdot 10^{-3} \text{ [m}^3\text{/s]}$ hasta $Q = 2,778 \cdot 10^{-3} \text{ [m}^3\text{/s]}$ la temperatura máxima se reduce en $\approx 500 \text{ [K]}$. Este efecto de enfriamiento inducido por el aumento de caudal también fue reportado por (Liu et al. (2019)), quienes identificaron que al aumentar el flujo de 8,5 a 14SLPM, la temperatura en la zona de salida de la antorcha se incrementó de 16 980[K] a 17 173[K]. Este comportamiento aparentemente contradictorio, donde el aumento del caudal puede enfriar el núcleo pero calentar la salida, concuerda con lo descrito por (Guo et al. (2015)), quienes también observaron un descenso general de temperatura en el cuerpo de la antorcha con caudales crecientes, pero un aumento en la región de

¹No es el estado estacionario del perfil de temperatura: es la región de estabilidad (estado estacionario) usando el modelo transitorio.

salida. En conjunto, estos hallazgos resaltan que el efecto del caudal sobre el perfil térmico es altamente dependiente del dominio espacial considerado y de las condiciones de contorno hidrodinámicas y electromagnéticas.

SIMULACIÓN MULTIFÍSICA DE ANTORCHA CON COMSOL

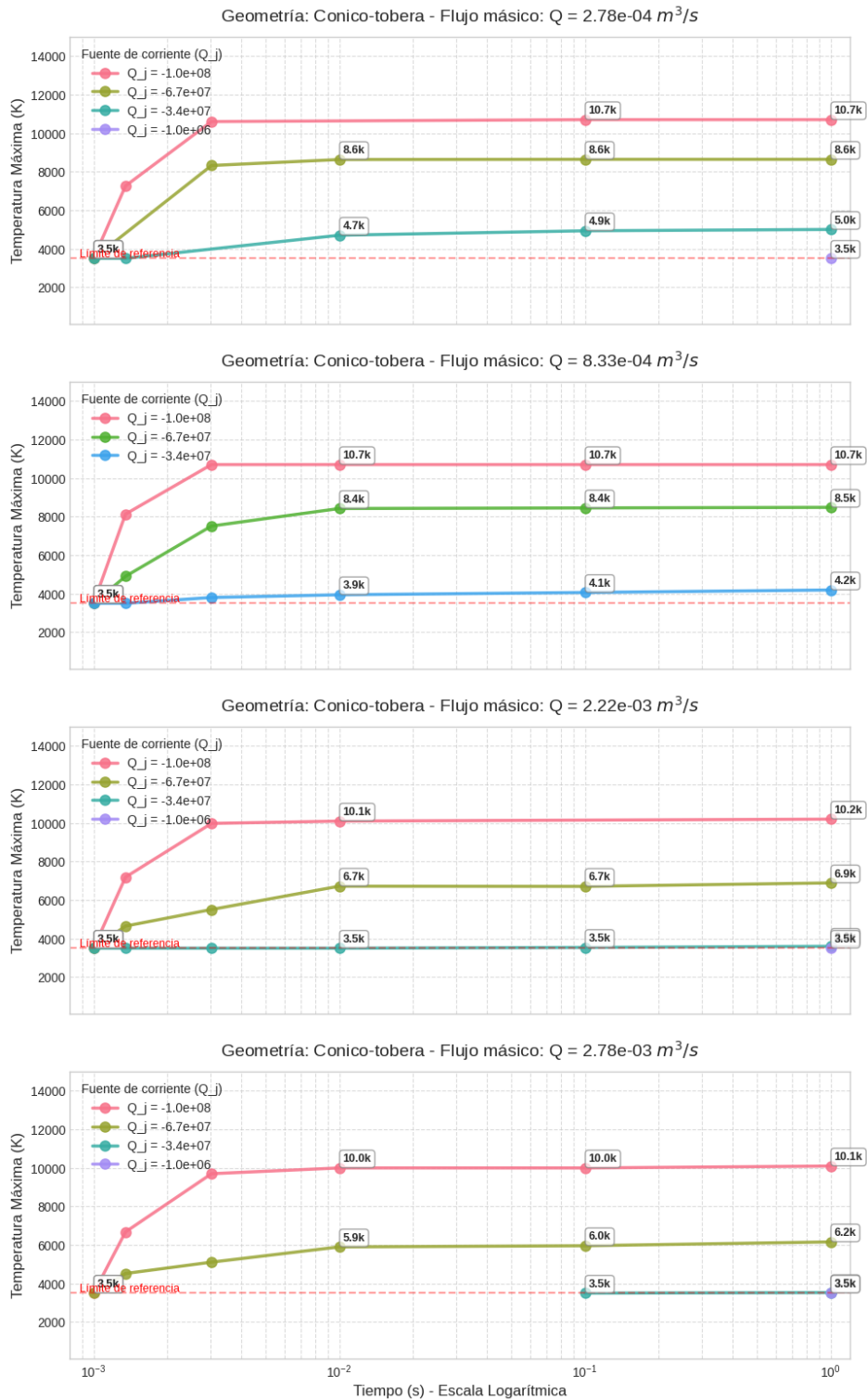


Figura 20: Evolución de la temperatura máxima en el tiempo para diferentes magnitudes de la fuente de corriente (Q_j) y flujos másicos (Q), correspondiente a la geometría cónico-tobera.

SIMULACIÓN MULTIFÍSICA DE ANTORCHA CON COMSOL

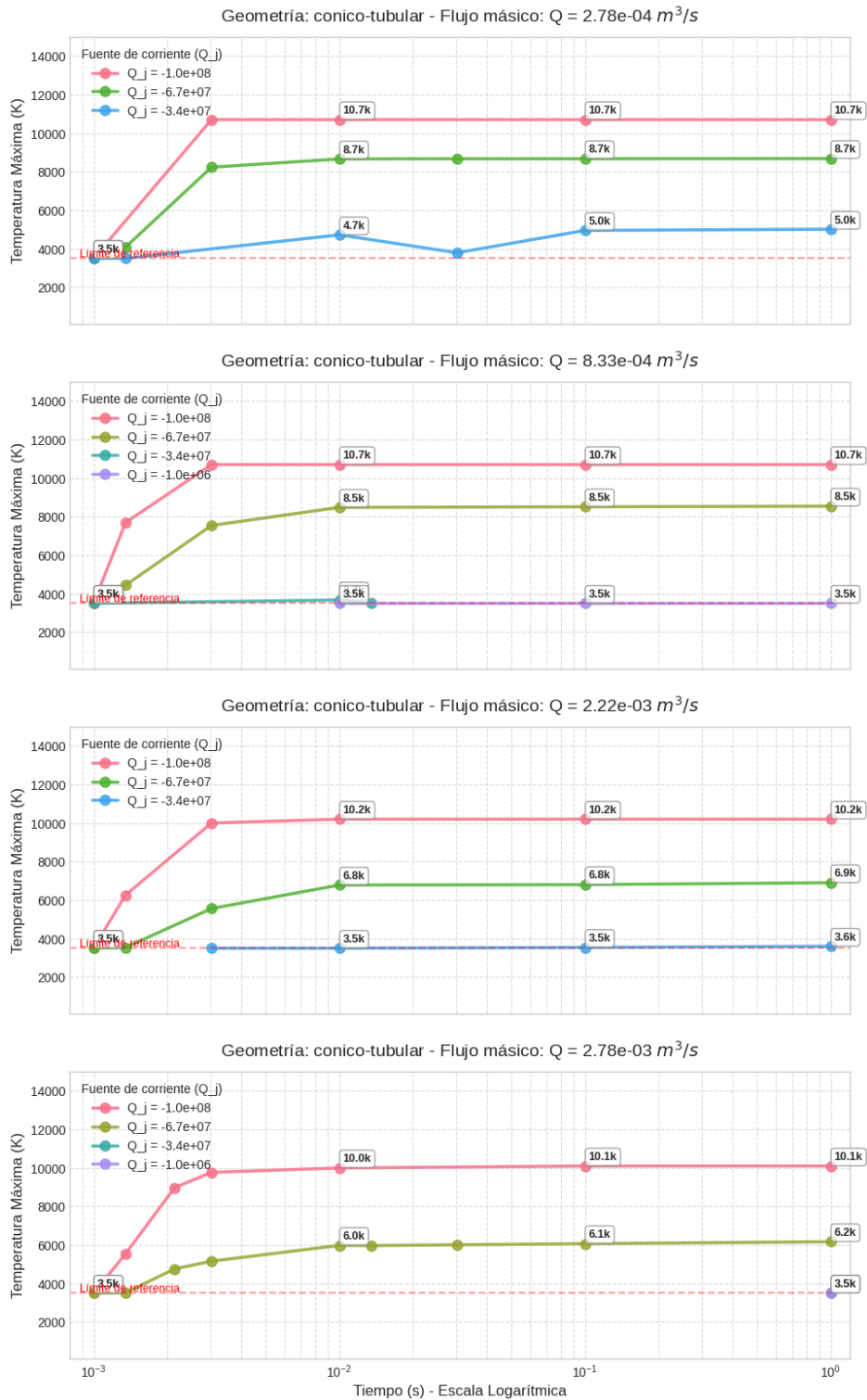


Figura 21: Evolución de la temperatura máxima en el tiempo para diferentes magnitudes de la fuente de corriente (Q_j) y flujos másicos (Q), correspondiente a la geometría cónico-tubular.

SIMULACIÓN MULTIFÍSICA DE ANTORCHA CON COMSOL

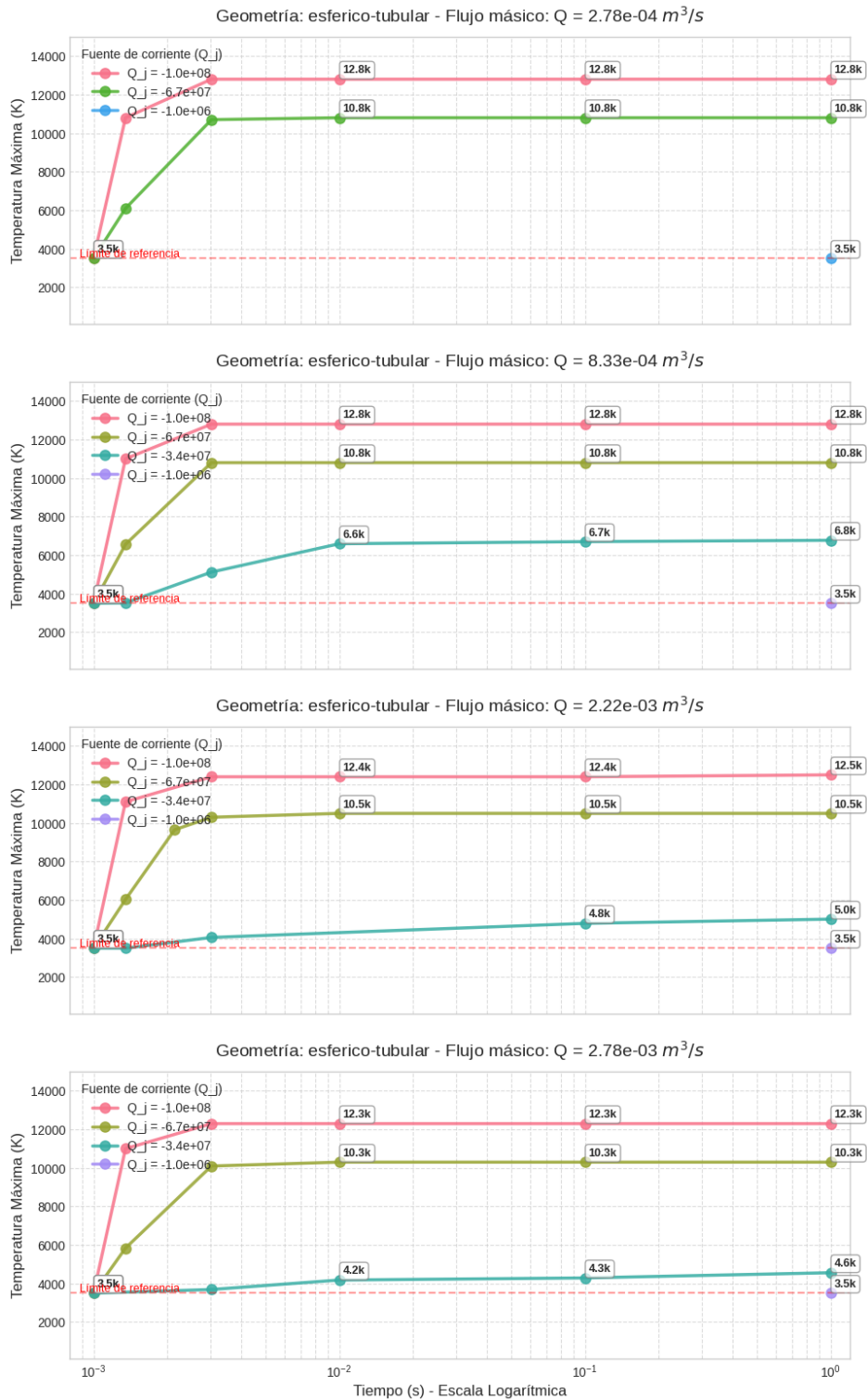


Figura 22: Evolución de la temperatura máxima en el tiempo para diferentes magnitudes de la fuente de corriente (Q_j) y flujos másicos (Q), correspondiente a la geometría esférico-tubular.

4.5.2 Distribución de la temperatura en las tres geometrías durante los primeros instantes para las diferentes combinaciones de parámetros

La disipación de la temperatura en todas las configuraciones inicia en la punta del cátodo en todas las combinaciones de valores Q , Q_j y geometrías. Como se puede observar en las figura 23 - 34, para valores altos del flujo másico y de fuente de corriente en la punta del cátodo la zona de mayor temperatura se expande aguas abajo, posiblemente debido a la mayor convección: observe, por ejemplo, los primeros casos $Q = 2,778 \cdot 10^{-3} [m^3/s]$ (figuras 23 - 32) y $Q = 2,2224 \cdot 10^{-3} [m^3/s]$ (figuras 24 - 31) con $Q_j = -3,4 \cdot 10^7$ y $Q_j = -6,7 \cdot 10^7 [A/m^2]$ y note que la zona de mayor temperatura (rojo oscuro en las figuras) se extiende hacia la salida del fluido para el flujo mas alto. A magnitudes de fuente de corriente alta $Q_j = -6,7 \cdot 10^7$ y $Q_j = -1 \cdot 10^7$ y caudales bajos $Q = 2,778 \cdot 10^{-4} [m^3/s]$ (figura 25 - 33) y $Q = 8,33 \cdot 10^{-4} [m^3/s]$ (figuras 26 - 34) la conducción de calor es predominante y se disipa la temperatura hacia el ánodo y hacia la entrada del fluido. En este ultimo caso, la superficie de salida de la antorcha se mantiene a temperaturas muy bajas; en especial, para el caso de $Q = 2,778 \cdot 10^{-4} [m^3/s]$ esta por debajo de la mitad de la temperatura máxima. Los únicos mecanismos de transferencia interna de energía simulados son la conducción y la convección: determinan, a partir de la punta del cátodo, en que dirección se disipa la energía generada en la superficie y el fluido cercano a la punta del cátodo.

En todas las combinaciones de parámetros y en las tres geometrías se observa que a partir de $t = 10 [ms]$ se alcanza un estado de equilibrio entre los fenómenos de conducción, convección y radiación electromagnética que gobiernan el equilibrio térmico en el sistema. Sin embargo, la evolución temporal de algunos perfiles muestra que la dinámica no se detiene al

frenar el incremento de la temperatura máxima. Seguido a esto la zona de alta temperatura se expande incrementando el gradiente térmico. Cerca a los electrodos se forma una capa delgada ($< 1[mm]$) de baja temperatura que aísla los electrodos del núcleo de plasma. Sin embargo, no se puede estudiar el sistema en esta región porque no se cumple la suposición de equilibrio termodinámico local (LTE): la interacción con la superficie del electrodo y con el flujo entrante a baja temperatura rompe el equilibrio térmico.

Los resultados obtenidos muestran coherencia cuantitativa con estudios previos basados en modelos magnetohidrodinámicos (MHD) para antorchas de argón, y se alinean con tendencias reportadas para otros gases de trabajo. En particular, (Guo et al. (2015)) demostraron en simulaciones tridimensionales de antorchas DC no transferidas (con mezclas Ar-H₂ de $6,66 \times 10^{-4} [m^3/s]$ y $1,33 \times 10^{-4} [m^3/s]$, respectivamente) que:

- El incremento de caudal ($Q \approx 8,0 \times 10^{-4} [m^3/s]$) reduce la temperatura global pero aumenta la temperatura en la salida ($\approx +200 [K]$)
- La corriente eléctrica no afecta significativamente la temperatura, debido a la entalpía constante del flujo entrante

Este último resultado contrasta con los hallazgos del presente trabajo, donde la fuente de corriente (Q_j) mostró un impacto determinante en el calentamiento inicial. Adicionalmente, (Liu et al. (2019)) reportaron un aumento de temperatura en la salida ($16\,980 [K] \rightarrow 17\,173 [K]$) al incrementar el flujo de 8,5 a 14 SLPM, mientras que (Demir et al. (2020)) observaron variaciones de 14 300–15 400 K con caudales de 30–75 SLPM, validando así la sensibilidad del sistema a los parámetros operativos aquí analizados.

SIMULACIÓN MULTIFÍSICA DE ANTORCHA CON COMSOL

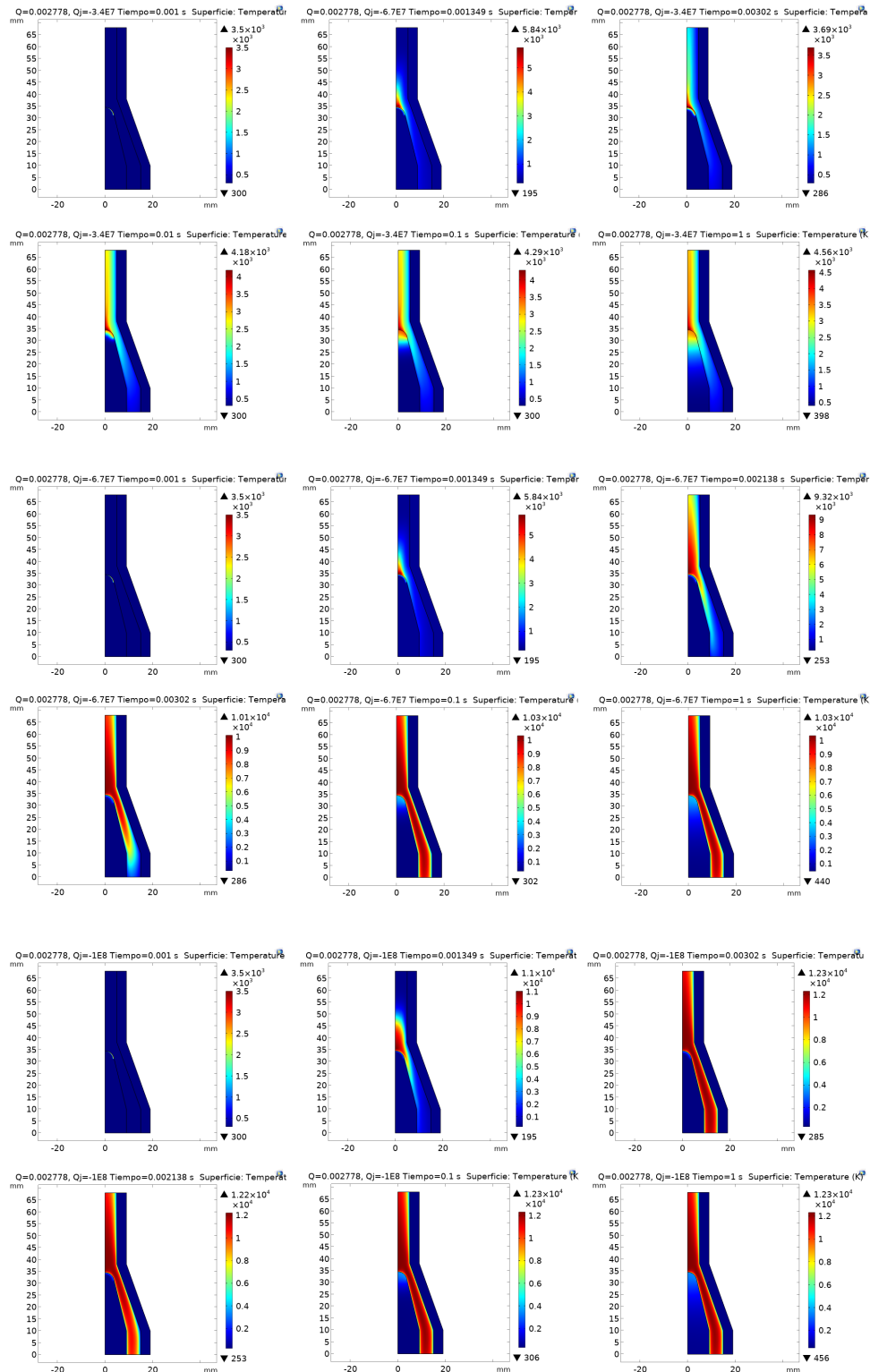


Figura 23: Evolución de la distribución de temperatura para la geometría **cónico-tubular** con flujo másico $Q = 2,778 \cdot 10^{-3} [m^3/s]$. Las filas (1-2, 3-4 y 5-6) muestran la variación para diferentes valores de la fuente de corriente en la punta del cátodo (Q_j), y cada perfil muestra la distribución de temperatura a diferentes instantes de tiempo (t). Note que los valores asignados a cada color en la barra lateral evoluciona en el tiempo, es decir es diferente para cada perfil.

SIMULACIÓN MULTIFÍSICA DE ANTORCHA CON COMSOL

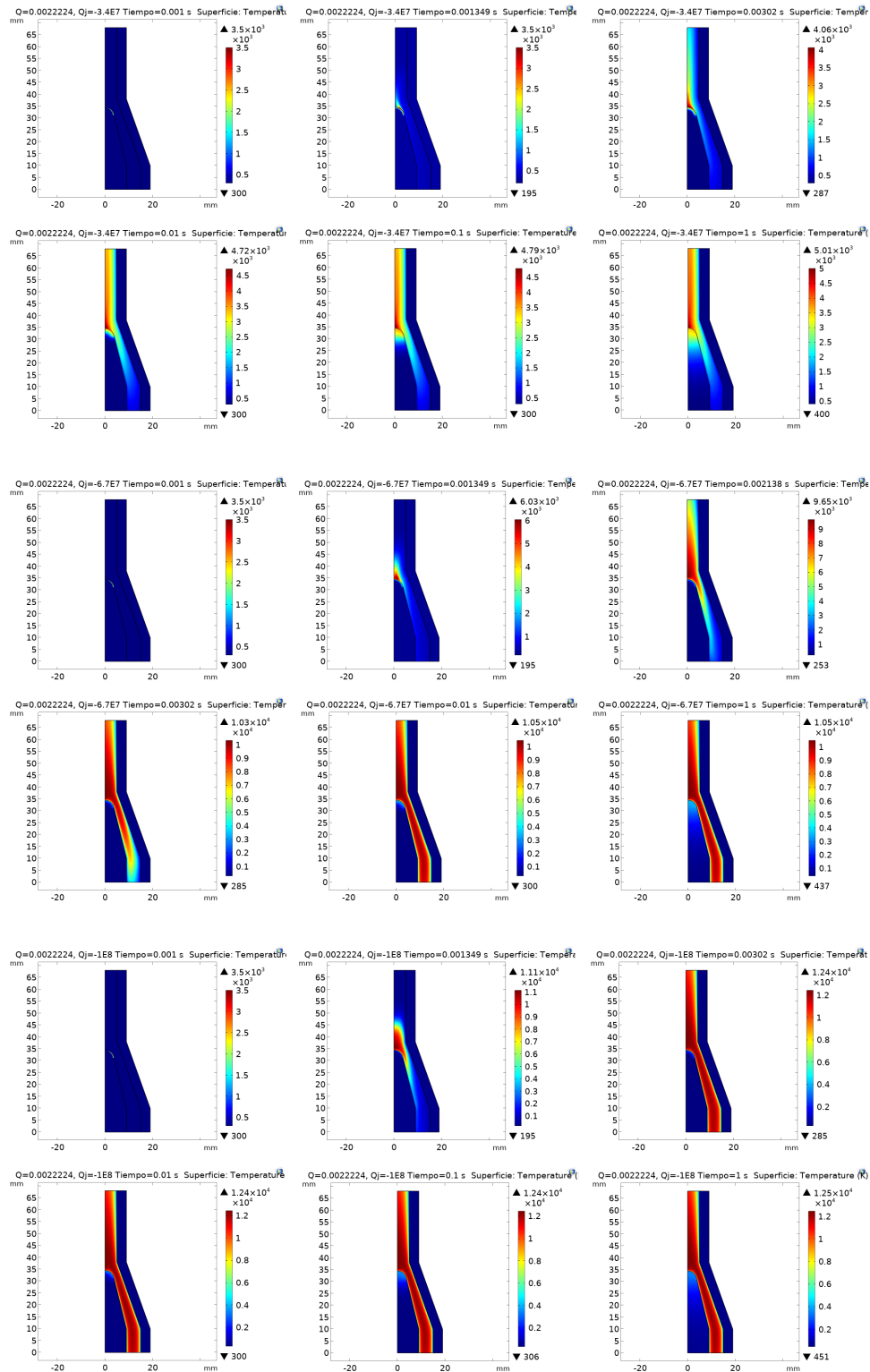


Figura 24: Evolución de la distribución de temperatura para la geometría **cónico-tubular** con flujo másico $Q = 2,2224 \cdot 10^{-3} [m^3/s]$. Las filas (1-2, 3-4 y 5-6) muestran la variación para diferentes valores de la fuente de corriente en la punta del cátodo (Q_j), y cada perfil muestra la distribución de temperatura a diferentes instantes de tiempo (t). Note que los valores asignados a cada color en la barra lateral evolución en el tiempo, es decir es diferente para cada perfil.

SIMULACIÓN MULTIFÍSICA DE ANTORCHA CON COMSOL

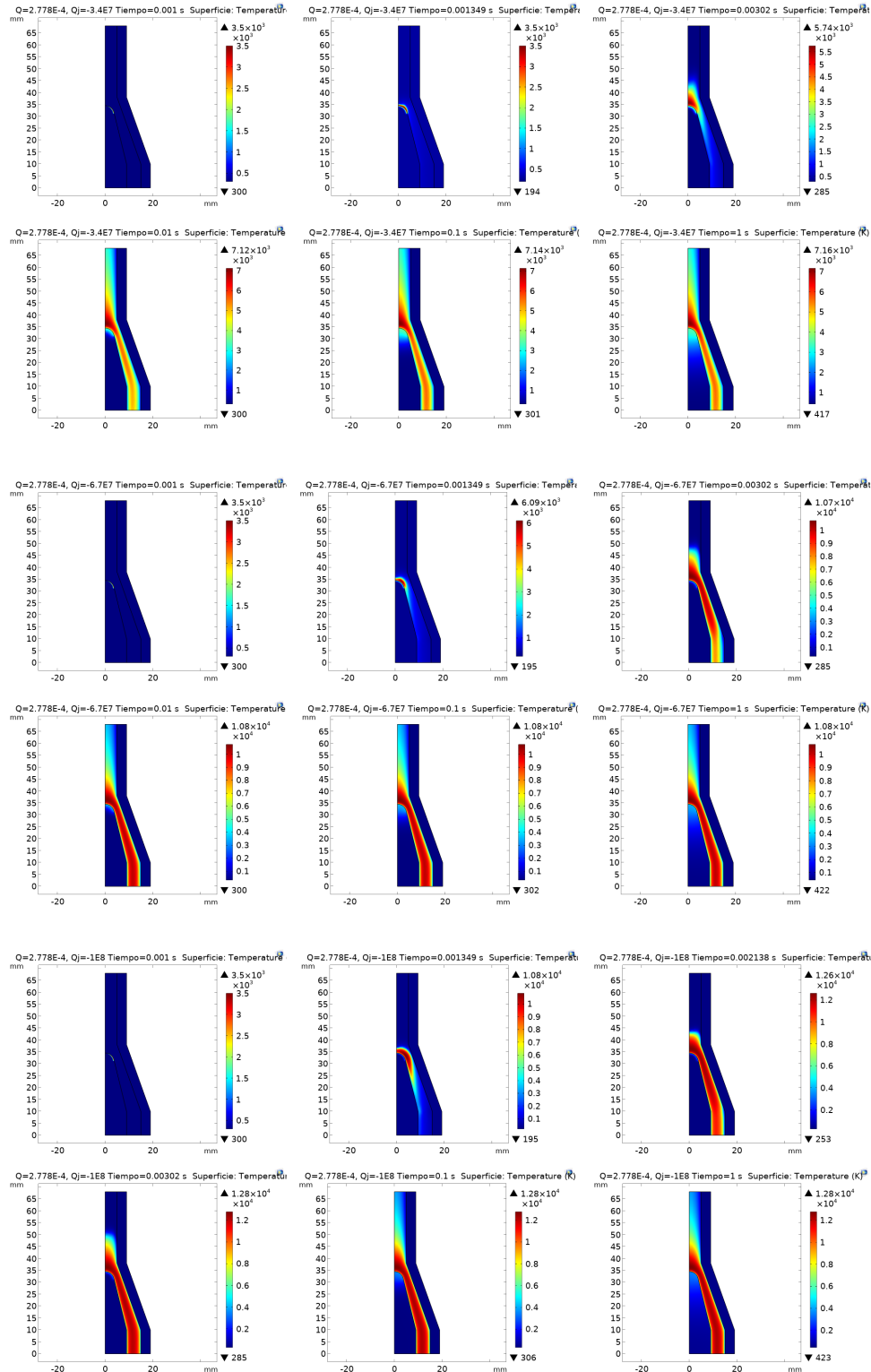


Figura 25: Evolución de la distribución de temperatura para la geometría **esferico-tubular** con flujo másico $Q = 2,778 \cdot 10^{-4} [m^3/s]$. Las filas (1-2, 3-4 y 5-6) muestran la variación diferentes valores de la fuente de corriente en la punta del cátodo (Q_j), y cada perfil muestra la distribución de temperatura a diferentes instantes de tiempo (t). Note que los valores asignados a cada color en la barra lateral evoluciona en el tiempo, es decir es diferente para cada perfil.

SIMULACIÓN MULTIFÍSICA DE ANTORCHA CON COMSOL

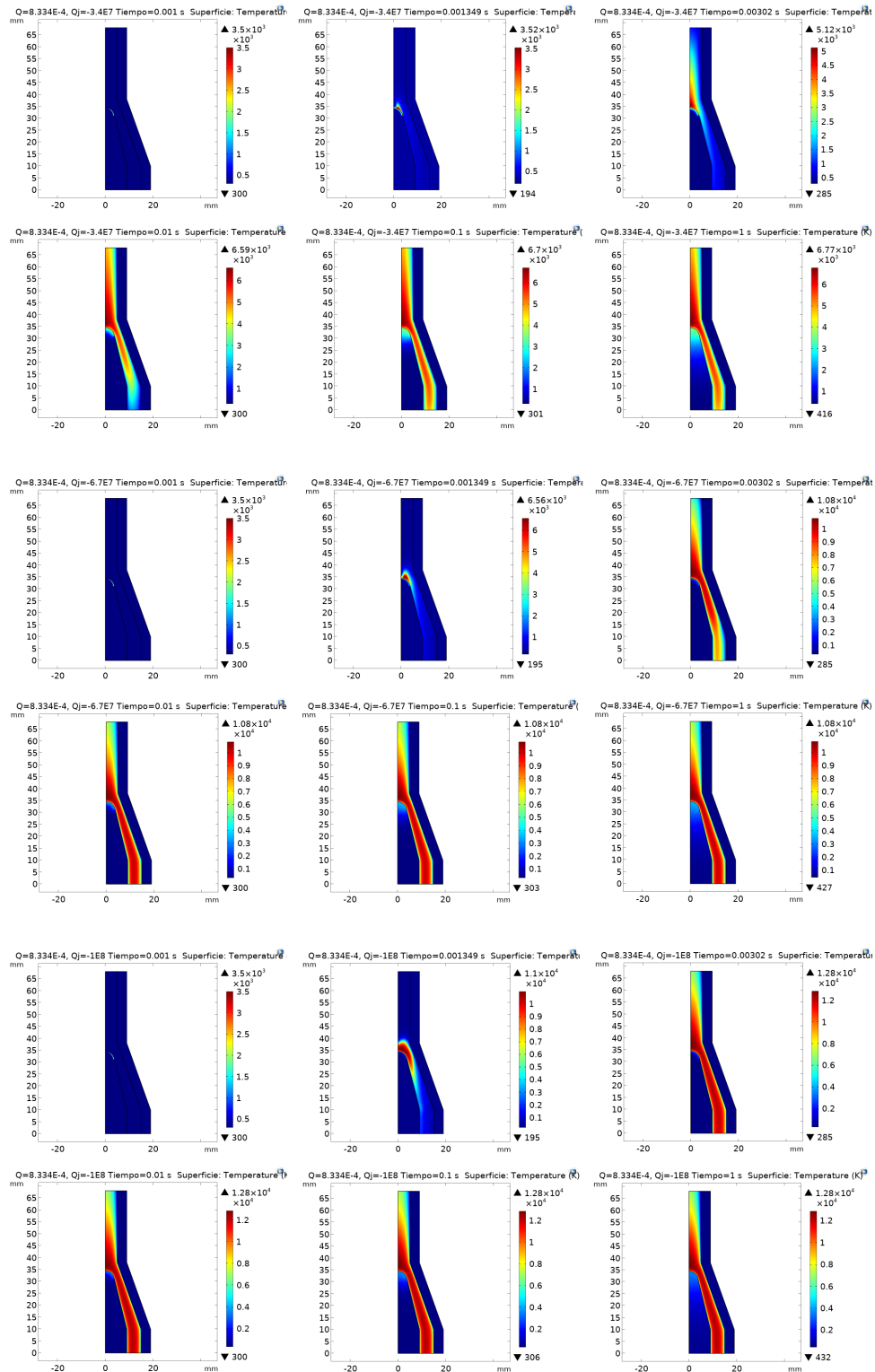


Figura 26: Evolución de la distribución de temperatura para la geometría **esferico-tubular** con flujo másico $Q = 8,334 \cdot 10^{-4} \text{ [m}^3/\text{s]}$. Las filas (1-2, 3-4 y 5-6) muestran la variación para diferentes valores de la fuente de corriente en la punta del cátodo (Q_j), y cada perfil muestra la distribución de temperatura a diferentes instantes de tiempo (t). Note que los valores asignados a cada color en la barra lateral evoluciona en el tiempo, es decir es diferente para cada perfil.

SIMULACIÓN MULTIFÍSICA DE ANTORCHA CON COMSOL

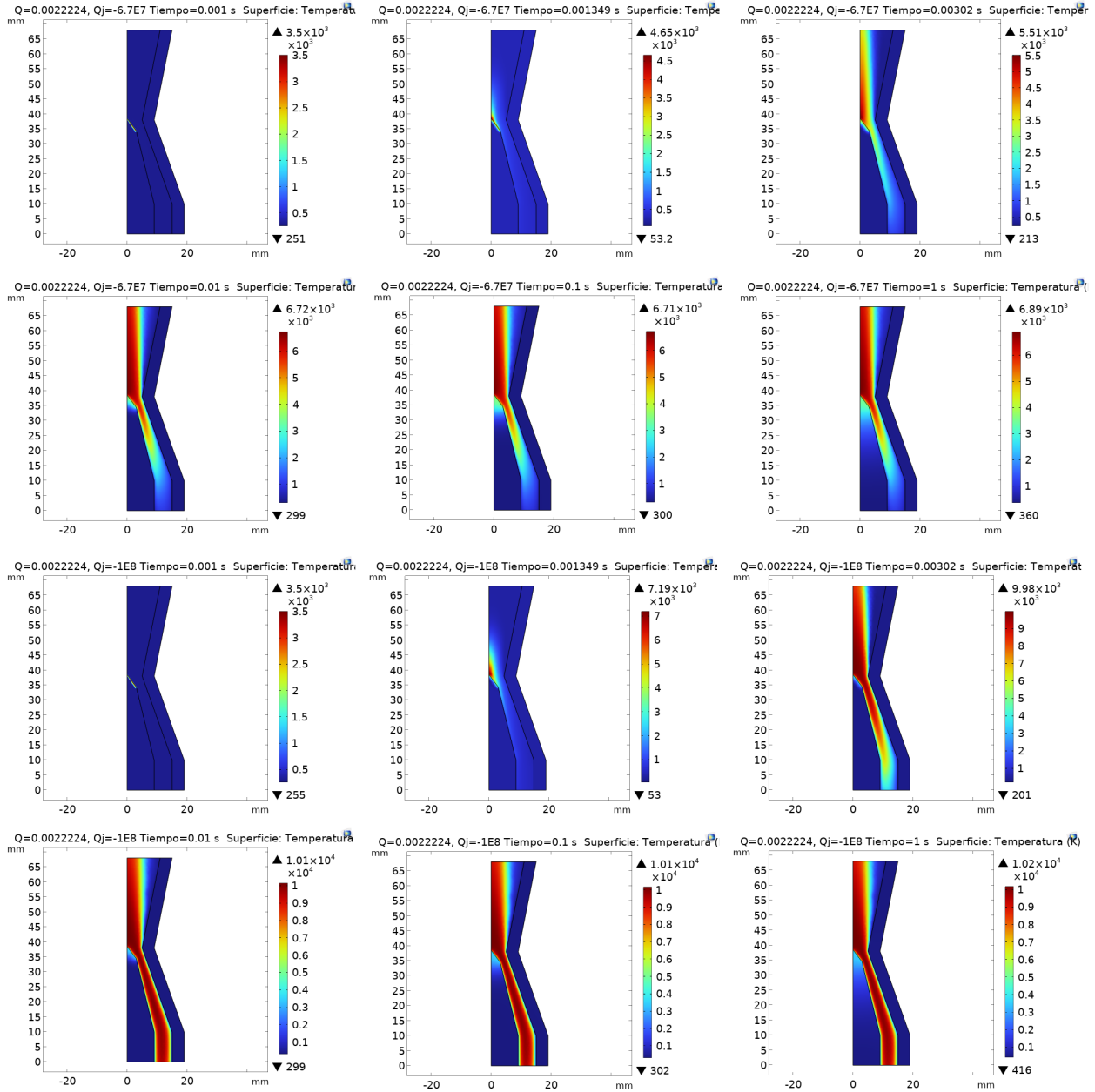


Figura 27: Evolución de la distribución de temperatura para la geometría **cónico-tobera** con flujo másico $Q = 2,2224 \cdot 10^{-3} \text{ [m}^3/\text{s]}$. Las filas (1-2 y 3-4) muestran la variación para diferentes valores de la fuente de corriente en la punta del cátodo (Q_j), y cada perfil muestra la distribución de temperatura a diferentes instantes de tiempo (t). Note que los valores asignados a cada color en la barra lateral evoluciona en el tiempo, es decir es diferente para cada perfil.

SIMULACIÓN MULTIFÍSICA DE ANTORCHA CON COMSOL

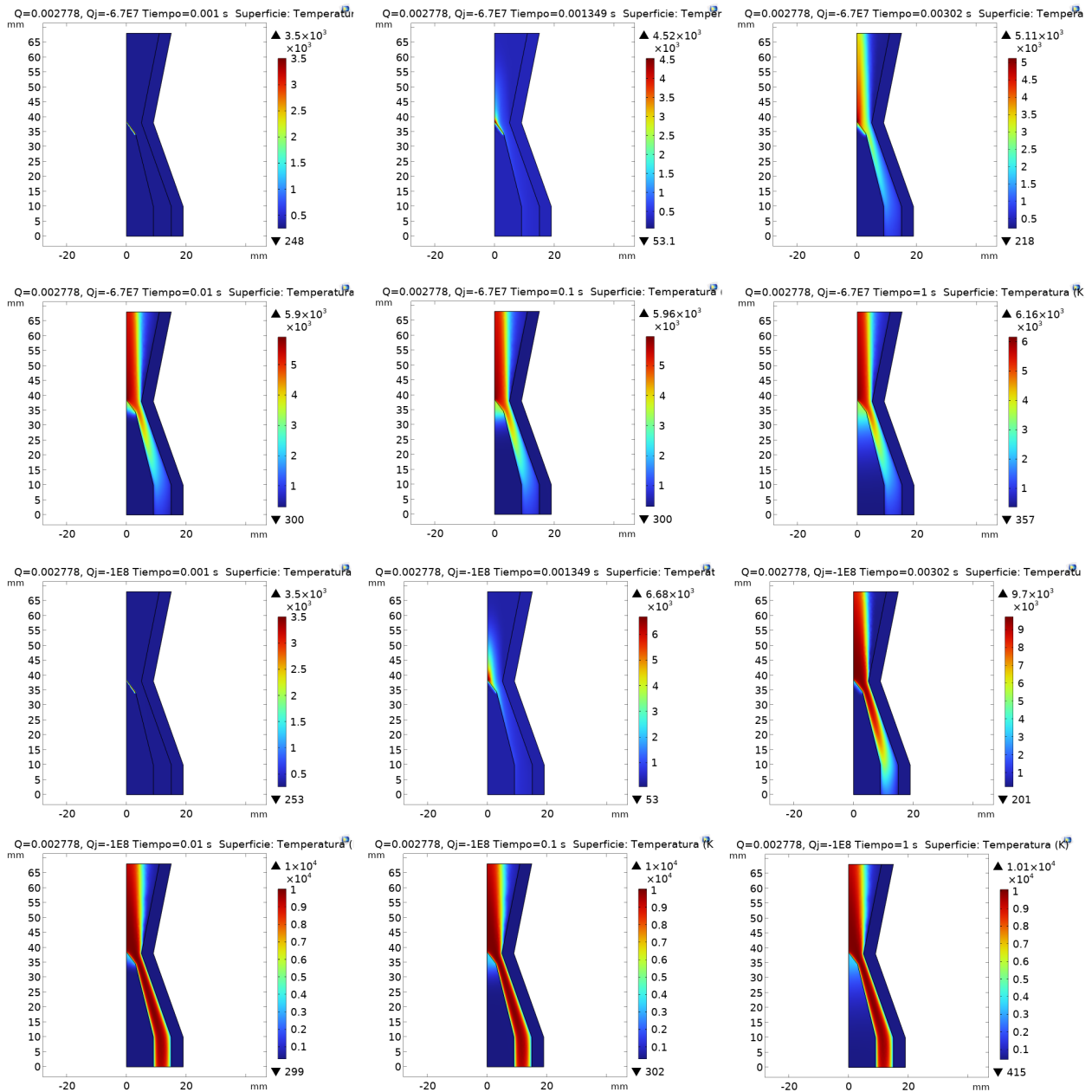


Figura 28: Evolución de la distribución de temperatura para la geometría **cónico-tobera** con flujo másico $Q = 2,778 \cdot 10^{-3}$ [m^3/s]. Las filas (1-2 y 3-4) muestran la variación para diferentes valores de la fuente de corriente en la punta del cátodo (Q_j), y cada perfil muestra la distribución de temperatura a diferentes instantes de tiempo (t). Note que los valores asignados a cada color en la barra lateral evoluciona en el tiempo, es decir es diferente para cada perfil.

SIMULACIÓN MULTIFÍSICA DE ANTORCHA CON COMSOL

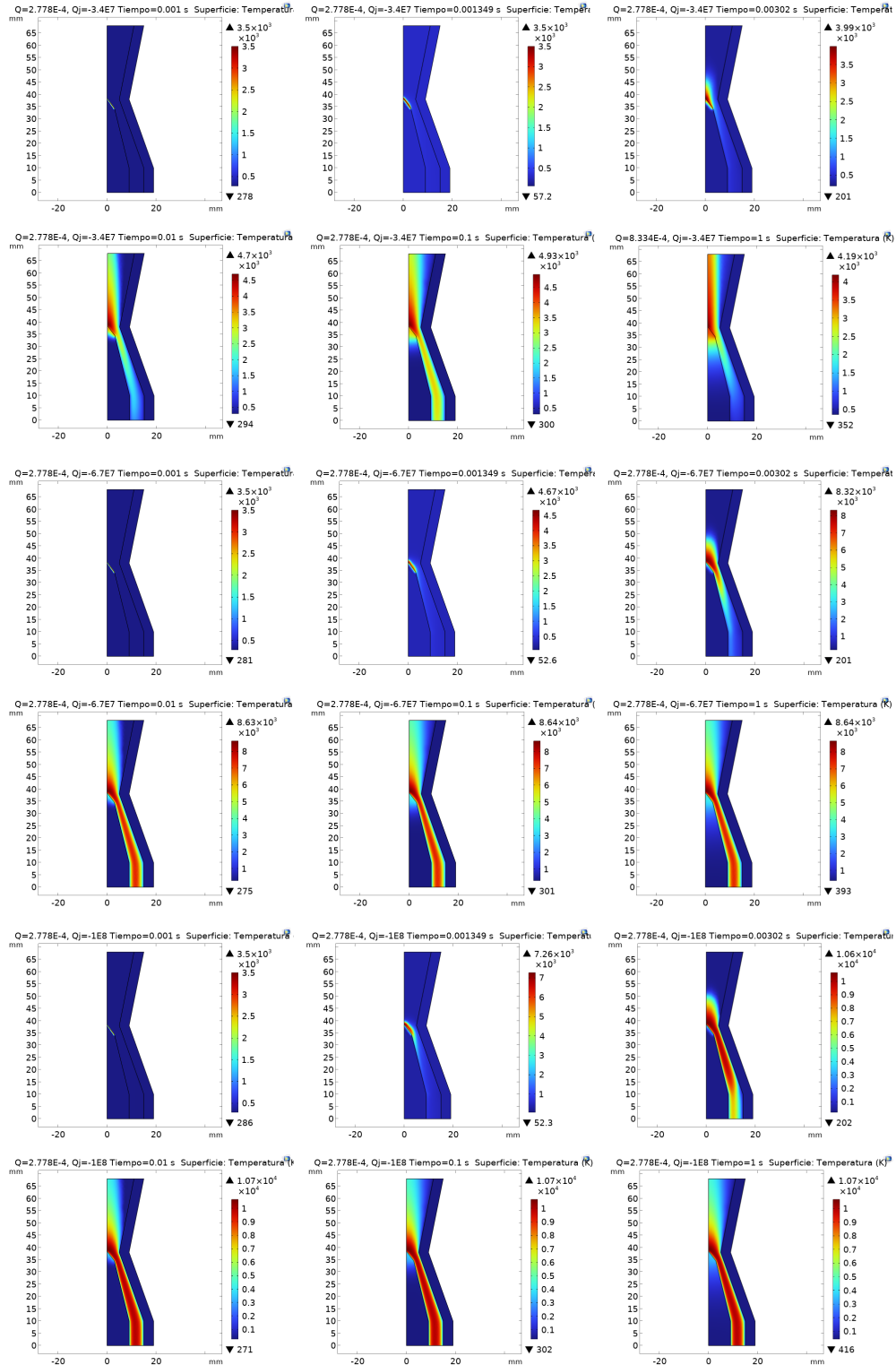


Figura 29: Evolución de la distribución de temperatura para la geometría **cónico-tobera** con flujo másico $Q = 2,778 \cdot 10^{-4}$ [m^3/s]. Las filas (1-2, 3-4 y 5-6) muestran la variación para diferentes valores de la fuente de corriente en la punta del cátodo (Q_j), y cada perfil muestra la distribución de temperatura a diferentes instantes de tiempo (t). Note que los valores asignados a cada color en la barra lateral evoluciona en el tiempo, es decir es diferente para cada perfil.

SIMULACIÓN MULTIFÍSICA DE ANTORCHA CON COMSOL

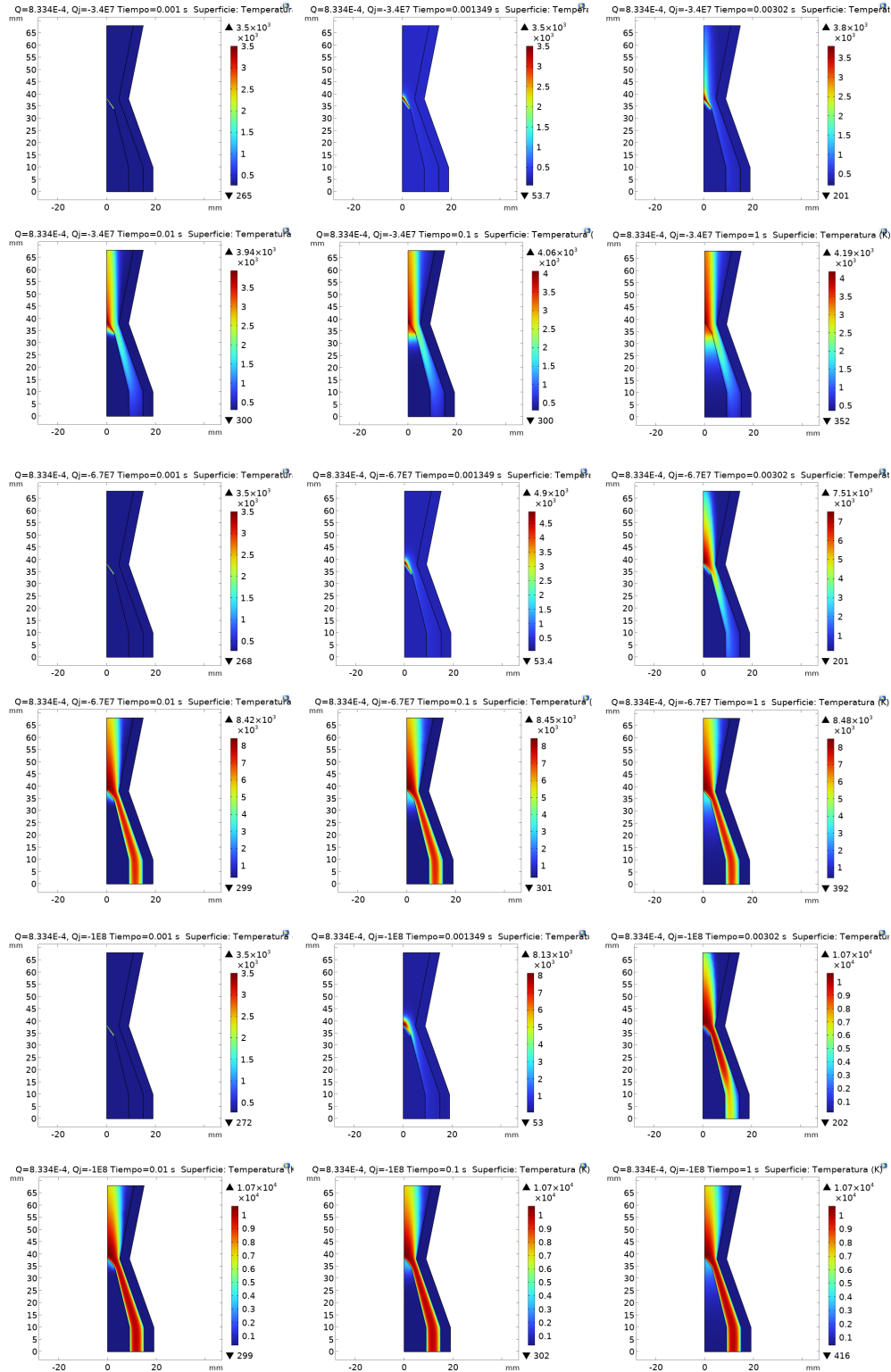


Figura 30: Evolución de la distribución de temperatura para la geometría **cónico-tobera** con flujo másico $Q = 8,334 \cdot 10^{-3} [m^3/s]$. Las filas (1-2, 3-4 y 5-6) muestran la variación para diferentes valores de la fuente de corriente en la punta del cátodo (Q_j), y cada perfil muestra la distribución de temperatura a diferentes instantes de tiempo (t). Note que los valores asignados a cada color en la barra lateral evoluciona en el tiempo, es decir es diferente para cada perfil.

SIMULACIÓN MULTIFÍSICA DE ANTORCHA CON COMSOL

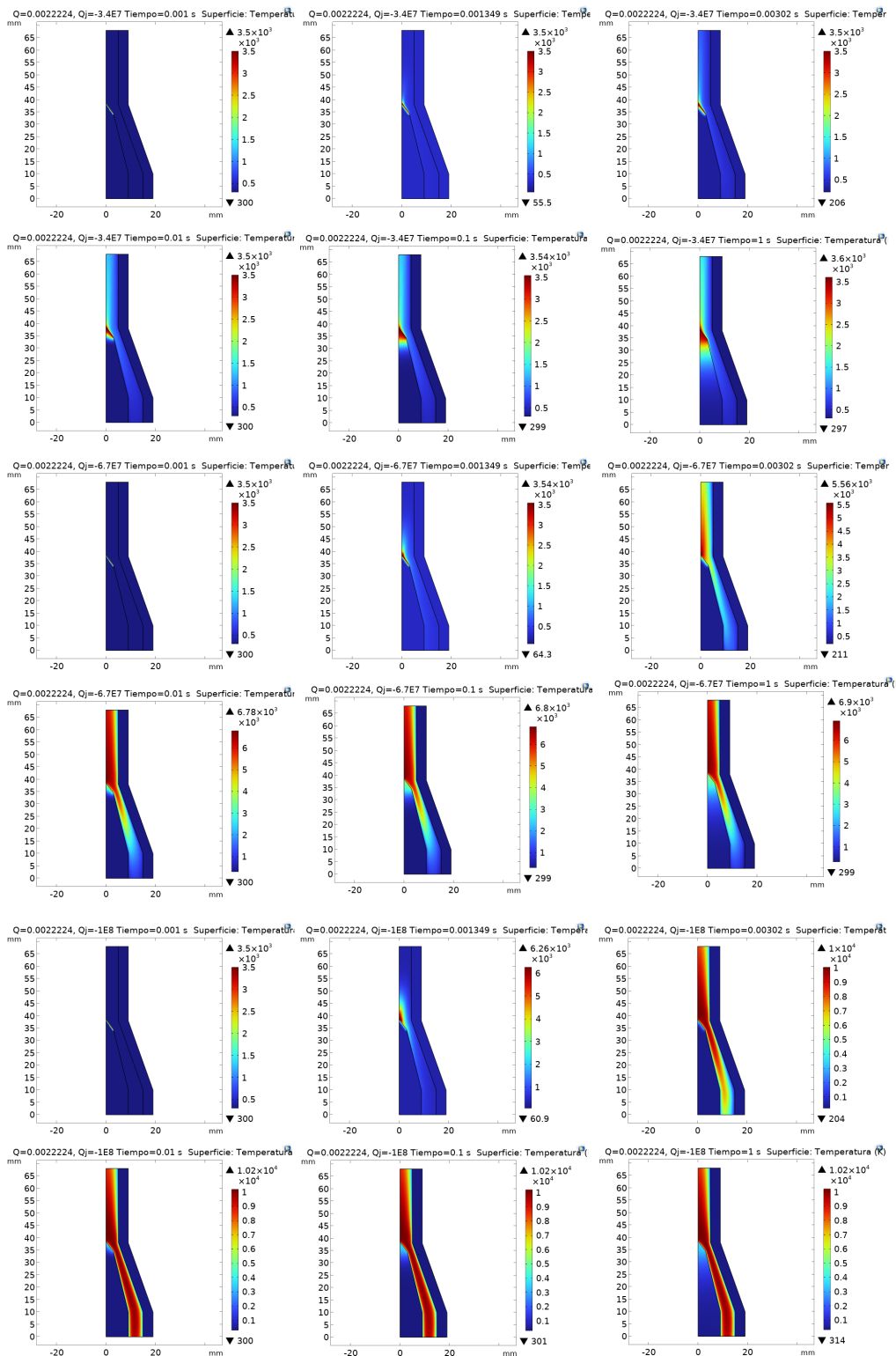


Figura 31: Evolución de la distribución de temperatura para la geometría **cónico-tubular** con flujo másico $Q = 2,224 \cdot 10^{-3} \text{ [m}^3/\text{s]}$. Las filas (1-2, 3-4 y 5-6) muestran la variación para diferentes valores de la fuente de corriente en la punta del cátodo (Q_j), y cada perfil muestra la distribución de temperatura a diferentes instantes de tiempo (t). Note que los valores asignados a cada color en la barra lateral evolucionan en el tiempo, es decir es diferente para cada perfil.

SIMULACIÓN MULTIFÍSICA DE ANTORCHA CON COMSOL

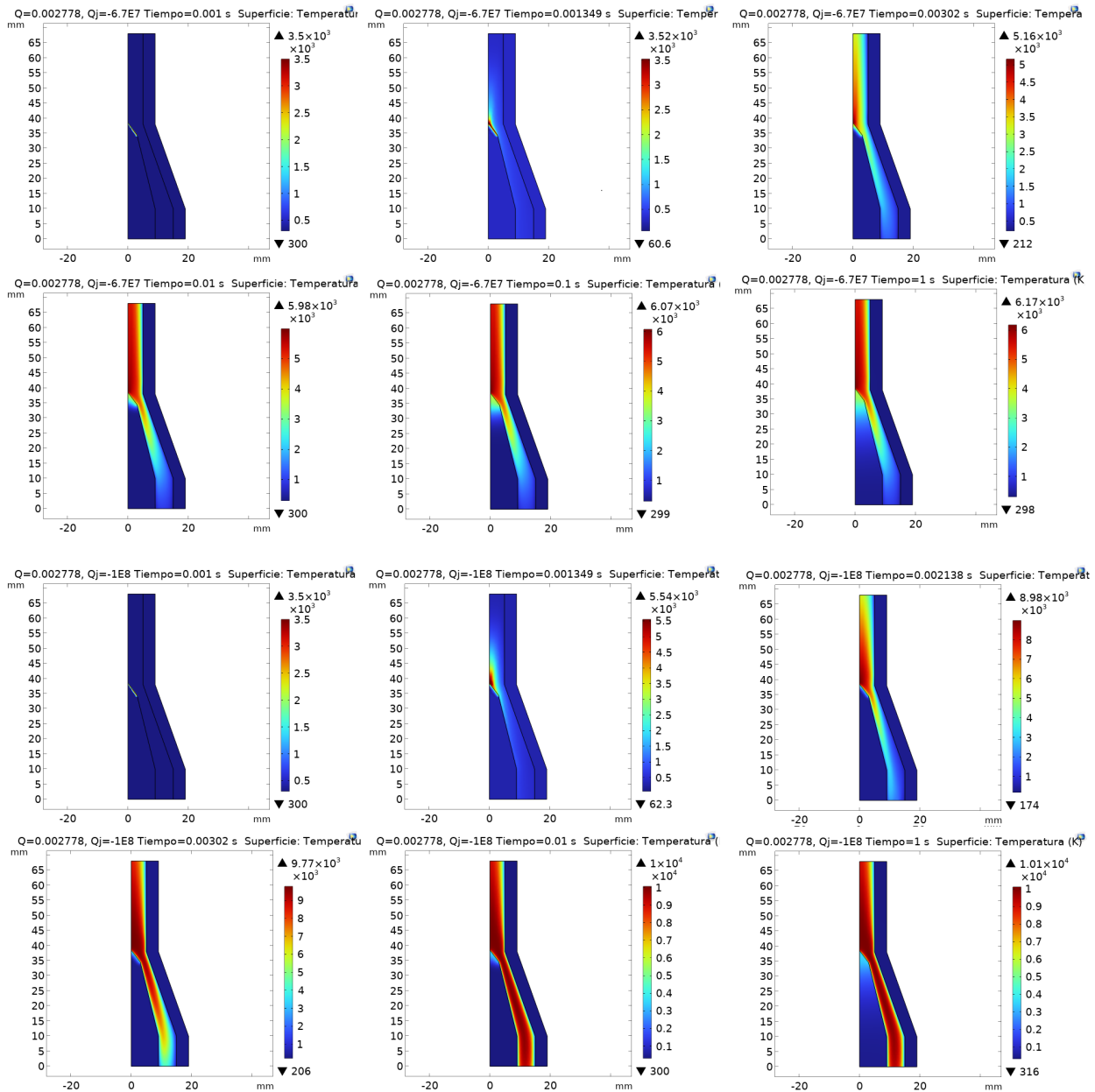


Figura 32: Evolución de la distribución de temperatura para la geometría **cónico-tubular** con flujo másico $Q = 2,778 \cdot 10^{-3}$ [m^3/s]. Las filas (1-2 y 3-4) muestran la variación para diferentes valores de la fuente de corriente en la punta del cátodo (Q_j), y cada perfil muestra la distribución de temperatura a diferentes instantes de tiempo (t). Note que los valores asignados a cada color en la barra lateral evoluciona en el tiempo, es decir es diferente para cada perfil.

SIMULACIÓN MULTIFÍSICA DE ANTORCHA CON COMSOL

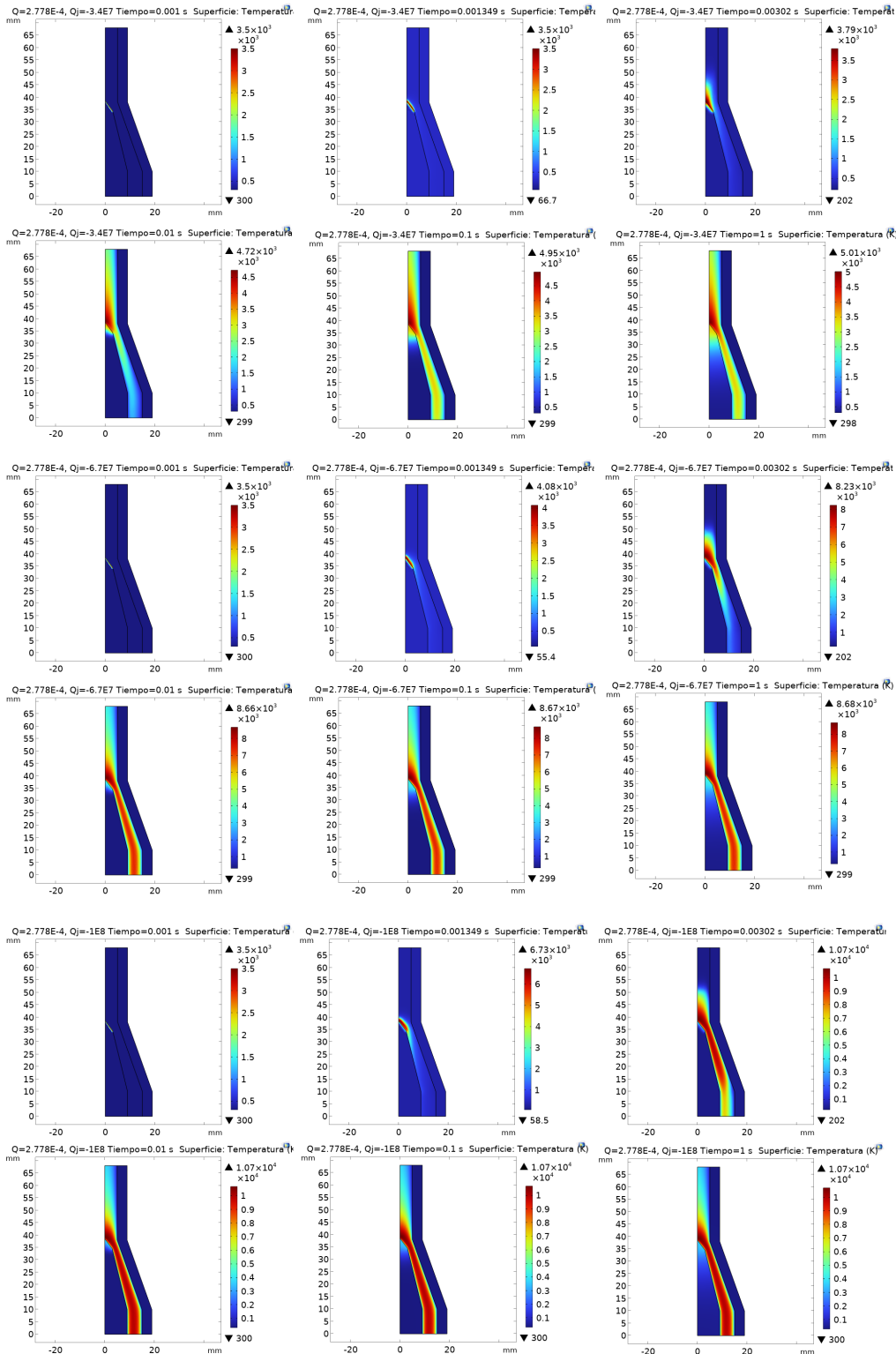


Figura 33: Evolución de la distribución de temperatura para la geometría **cónico-tubular** con flujo másico $Q = 2,778 \cdot 10^{-4}$ $[m^3/s]$. Las filas (1-2, 3-4 y 5-6) muestran la variación para diferentes valores de la fuente de corriente en la punta del cátodo (Q_j), y cada perfil muestra la distribución de temperatura a diferentes instantes de tiempo (t). Note que los valores asignados a cada color en la barra lateral evoluciona en el tiempo, es decir es diferente para cada perfil.

SIMULACIÓN MULTIFÍSICA DE ANTORCHA CON COMSOL

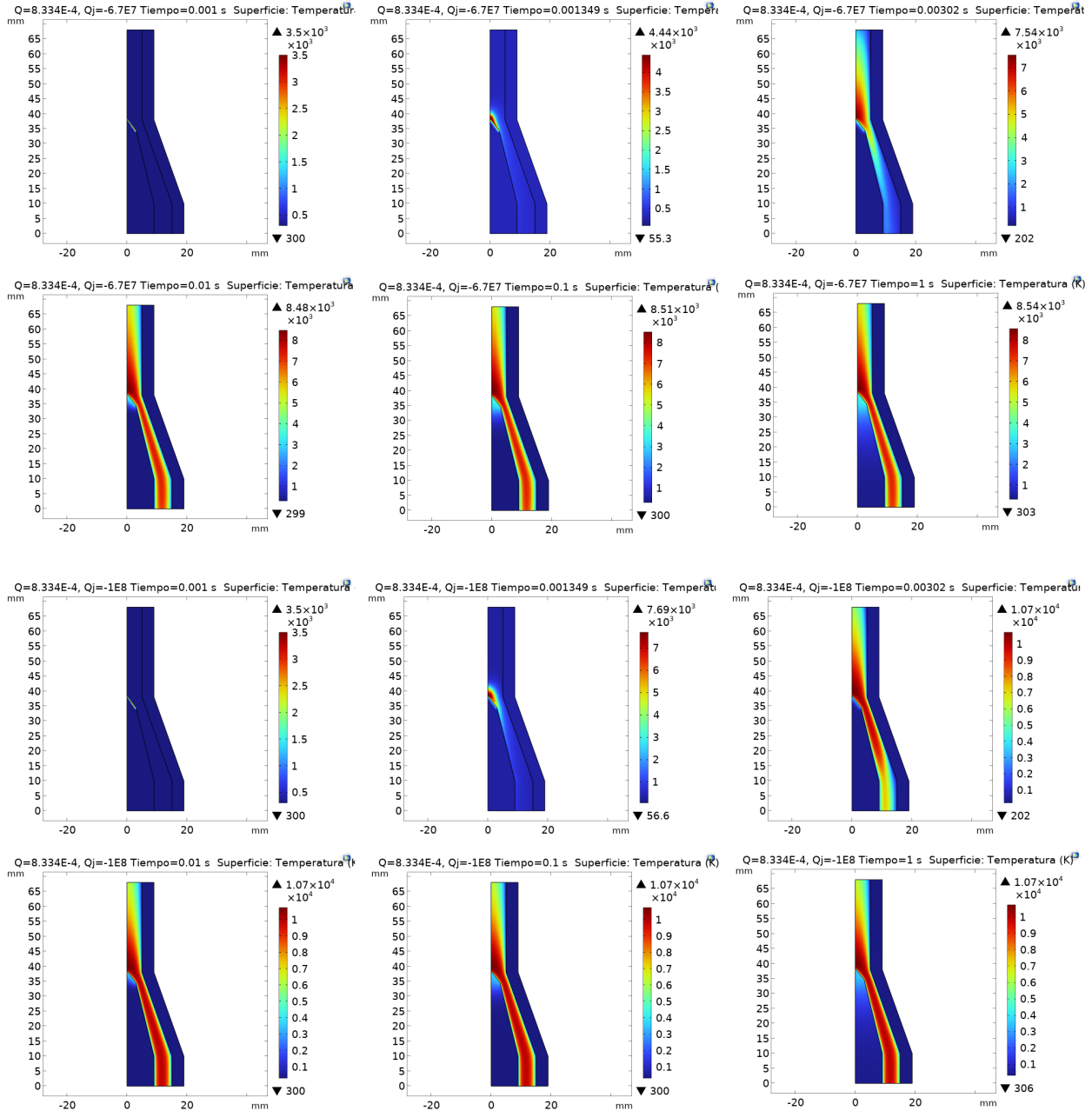


Figura 34: Evolución de la distribución de temperatura para la geometría **cónico-tubular** con flujo másico $Q = 8,334 \cdot 10^{-4} \text{ [m}^3/\text{s]}$. Las filas (1-2 y 3-4) muestran la variación para diferentes valores de la fuente de corriente en la punta del cátodo (Q_j), y cada perfil muestra la distribución de temperatura a diferentes instantes de tiempo (t). Note que los valores asignados a cada color en la barra lateral evoluciona en el tiempo, es decir es diferente para cada perfil.

4.5.3 Estudio de los perfiles en estado estacionario usando diferentes gases precursores

En las figuras 35 - 36 se observan los perfiles de potencial eléctrico, rapidez del chorro y temperatura en la antorcha esférico-tubular. Cada una de estas simulaciones se realizan para los tres gases de trabajo (Ar , H_2 y N_2). A continuación se discutirá el cambio en los perfiles debido a las diferencias en las propiedades de los gases de trabajo: capacidad calorífica a presión constante ($c_p(T)$), conductividad térmica ($k(T)$), densidad ($\rho(T)$), conductividad eléctrica ($\sigma(T)$), viscosidad dinámica ($\mu(T)$) y pérdidas por radiación ($Q_{rad}(T)$).

La solución a las ecuaciones del modelo (los campos de temperatura, rapidez y potencial eléctrico) depende críticamente de las propiedades del material del gas, las cuales varían con la temperatura. Los datos proporcionados en la librería de materiales de Comsol Multiphysics[®] son la entrada fundamental que define el comportamiento de cada gas. Se muestra la dependencia de estas propiedades de la temperatura en las graficas 38.

En la figura 35 se observa que el potencial eléctrico en la antorcha no depende del gas de trabajo utilizado. Esto es consistente con la ecuación 5 en la que no se presenta ninguna propiedad de los materiales por lo que al cambiar el gas manteniendo iguales condiciones de operacion no se afecta este perfil.

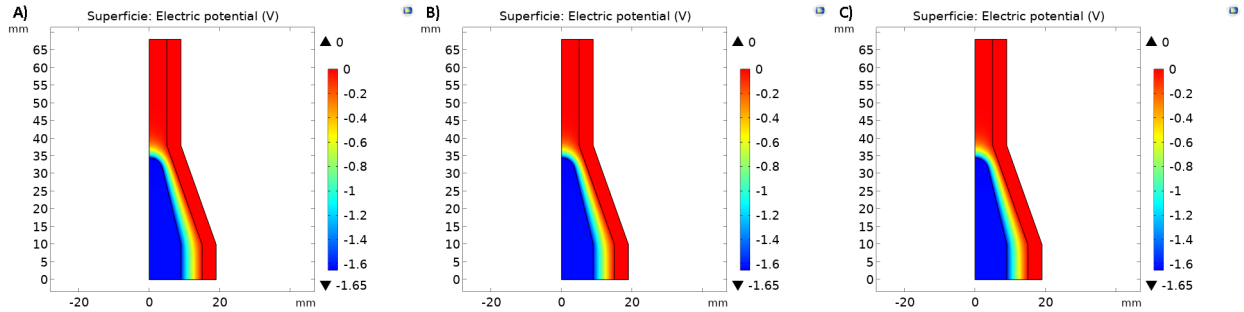


Figura 35: Figura 31. Perfil de potencial eléctrico (V) en estado estacionario para diferentes gases de trabajo. Se compara el potencial eléctrico para: (A) Argón, (B) Hidrógeno y (C) Nitrógeno. Los perfiles son virtualmente idénticos, demostrando que, bajo las condiciones simuladas, el potencial eléctrico no depende de las propiedades del gas. Este resultado es coherente con la ecuación 5, que no incluye términos dependientes del material.

La generación y transferencia de calor al fluido es diferente para cada gas, como se observa en los perfiles de temperatura (figura 36). En (A) el argón: alcanza la temperatura máxima más alta, $1,26 \times 10^4 [K]$. El núcleo del plasma es intenso y bien definido. En (B) el hidrógeno: registra la temperatura máxima más baja, con un pico de solo $5,55 \times 10^3 [K]$. Además, la zona caliente parece más difusa y se extiende hasta tocar la superficie del cátodo. Y en (C) el nitrógeno: presenta una temperatura intermedia de $7,72 \times 10^3 [K]$. La zona de mayor temperatura esta cerca del cátodo en el canal que forma con el ánodo, para el argón y el nitrógeno, sin embargo, para el hidrógeno se extiende desde el fluido hasta el cátodo. Esto evidencia que el equilibrio entre la convección, conducción y radiación depende de las propiedades del gas.

La diferencia en los perfiles puede explicarse por la influencia de las propiedades de los gases de trabajo (figura 38).

Los picos en la gráfica de $C_p(T)$ (ver figura 38) representan sumideros de energía donde, el gas absorbe calor para procesos como la disociación e ionización. El argón (Ar)

muestra solo un pico de ionización relativamente pequeño a alta temperatura ($\approx 15,000[K]$). Sin picos de disociación, la energía eléctrica se convierte eficientemente en calor, lo que le permite alcanzar la temperatura más alta. El hidrógeno (H_2) muestra un pico de disociación gigantesco a baja temperatura ($\approx 4000[K]$). El sistema debe invertir una enorme cantidad de energía solo para romper las moléculas de H_2 , energía que no contribuye a aumentar la temperatura del plasma. Este es un factor clave de por qué es el gas más frío. El nitrógeno (N_2) también tiene un pico de disociación significativo ($\approx 8,000[K]$), que consume mucha energía y lo mantiene más frío que el argón. Sin embargo, este pico es menos extremo que el del hidrógeno, permitiéndole alcanzar una temperatura intermedia.

Una alta conductividad térmica ($k(T)$) enfría el núcleo del plasma al transportar la energía hacia las zonas más frías (ver figura 38). El argón (Ar) tiene la conductividad térmica más baja de los tres en el rango clave de operación. El calor generado se queda “atrapado” en el núcleo, permitiendo que la temperatura se eleve. El hidrógeno (H_2) tiene conductividad térmica excepcionalmente alta, con un pico masivo que coincide con su disociación ($\approx 4000[K]$). Este máximo local actúa como un “refrigerante interno”, es sumidero del calor generado y es el principal responsable de su baja temperatura final. El nitrógeno (N_2) tiene conductividad térmica mayor que la del argón pero mucho menor que la del hidrógeno. Disipa el calor de forma más moderada, lo que contribuye a su temperatura intermedia.

El calentamiento Joule es directamente proporcional a $\sigma(T)$. El argón (Ar): El gráfico (ver figura 38) muestra que el argón se vuelve conductor a la temperatura más baja. Esto permite que el efecto Joule comience antes y sea más intenso, resultando en el calentamiento más eficaz y la temperatura más alta. El hidrógeno (H_2) y el nitrógeno (N_2) necesitan superar primero su fase de disociación (que consume energía) antes de que su conductividad

SIMULACIÓN MULTIFISICA DE ANTORCHA CON COMSOL

eléctrica aumente significativamente. Este retraso en volverse conductores contribuye a sus temperaturas más bajas en comparación con el argón.

La emisión de radiación ($Q_{rad}(T)$) (ver figura 38) se comporta como un sumidero de energía térmica: se emite en toda la antorcha pero no se absorbe nuevamente. El argón (Ar) y el nitrógeno (N_2) muestran pérdidas radiactivas significativas a altas temperaturas, lo que ayuda a limitar la temperatura máxima.

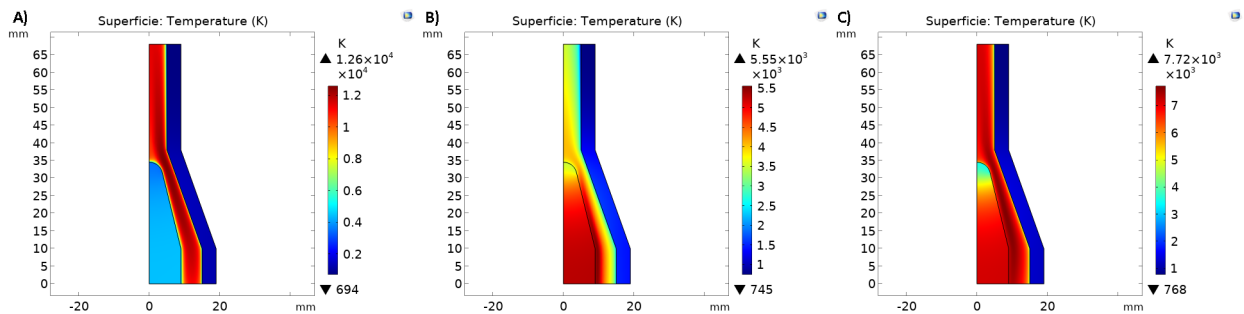


Figura 36: Perfil de temperatura del chorro al interior de la antorcha usando diferentes gases de trabajo: A) Argón, B) Hidrógeno y C) Nitrógeno.

En los perfiles de rapidez del chorro (figura 37) se observa que la cinemática del fluido también es afectada por el cambio de gas de trabajo. La rapidez máxima es diferente para cada gas: $416[m/s]$ para el argón, $184[m/s]$ para el hidrógeno y $330[m/s]$ para el nitrógeno. La mayor temperatura del Argón (37.A) provoca la expansión térmica más significativa. Esto genera el mayor gradiente de presión y la mayor aceleración, resultando en la velocidad de salida más alta. La menor temperatura del Hidrógeno (37.B) conduce a una menor expansión térmica, lo que explica por qué produce el chorro más lento, a pesar de ser el gas más ligero. El Nitrógeno (37.C), con su temperatura intermedia, produce una velocidad también intermedia, siguiendo la misma lógica. La zona de máxima rapidez cambia: es mas extensa y cercana al eje de simetría para el hidrógeno que para el nitrógeno y la menos extensa y es

la del argón.

El mecanismo principal de aceleración es la expansión térmica del gas al ser calentado intensamente en la región del arco. El gas caliente, de menor densidad, se expande y es forzado a través de la boquilla constrictora, convirtiendo la energía térmica en energía cinética (velocidad). $\rho(T)$ es relevante en los términos de densidad de corriente de fluido y flujo resultante del equilibrio de fuerzas en las ecuaciones de Navier-Stokes (ecuaciones 8 y 9): es la propiedad más crítica en estas ecuaciones y el principal acople con la ecuación de calor.

La viscosidad ($\mu(T)$) es responsable de las pérdidas de momento por cizallamiento, especialmente cerca de las paredes (la capa límite): se observa en los perfiles de rapidez (ver figura 37) el alto gradiente de rapidez al acercarse al ánodo (en la capa límite). El argón (Ar) presenta un pico de viscosidad moderado alrededor de los 10 000[K], como se muestra en la figura 38. El hidrógeno (H_2) mantiene la viscosidad más baja en casi todo el rango de temperatura. Esto implica menores pérdidas por fricción. El nitrógeno (N_2) exhibe el pico de viscosidad más alto, lo que sugiere mayores efectos de cizallamiento en su rango de operación.

En contraste, (Jeon et al. (2025)) mostró que, al introducir N_2 en una mezcla de $Ar-H_2$, la temperatura aumenta en la punta del cátodo pero disminuye hacia la salida del fluido, reduciendo así la temperatura de salida. La zona de máxima temperatura se desplaza en dirección del flujo y la rapidez del chorro se incrementa. Estos resultados son coherentes con lo expuesto previamente: el nitrógeno alcanza la menor temperatura máxima, por lo que el equilibrio térmico de la mezcla reportada por (Jeon et al. (2025)) tiende a valores más bajos. Sin embargo, mientras que dicho autor observó un aumento de velocidad al añadir nitrógeno, en los resultados de esta tesis la rapidez es menor para N_2 que para Ar (véase figura 37).

SIMULACIÓN MULTIFISICA DE ANTORCHA CON COMSOL

En la tabla 6 se observa que la mezcla de Ar-H₂ alcanza valores máximos de temperatura y rapidez diferentes al cambiar la concentración de H₂. Este comportamiento contrasta con lo observado en la presente tesis: en los resultados de (Park et al.) la adición de hidrógeno redujo ambos parámetros, mientras que aquí el análisis se realiza con gases puros, lo que podría explicar las diferencias detectadas.

Cuadro 6: Síntesis de los resultados de Park et al. (Park et al.) sobre el efecto de la concentración de hidrógeno en plasma de argón. Se observa una reducción en la temperatura y velocidad máximas al aumentar el porcentaje de H₂.

Mezcla de Gas (Ar-H ₂)	Temperatura Máxima (K)	Velocidad Máxima (m/s)
Baja concentración (0,5 % H ₂)	15 400	1 950
Alta concentración (20 % H ₂)	14 750	1 740
Reducción	4,2 %	10,8 %

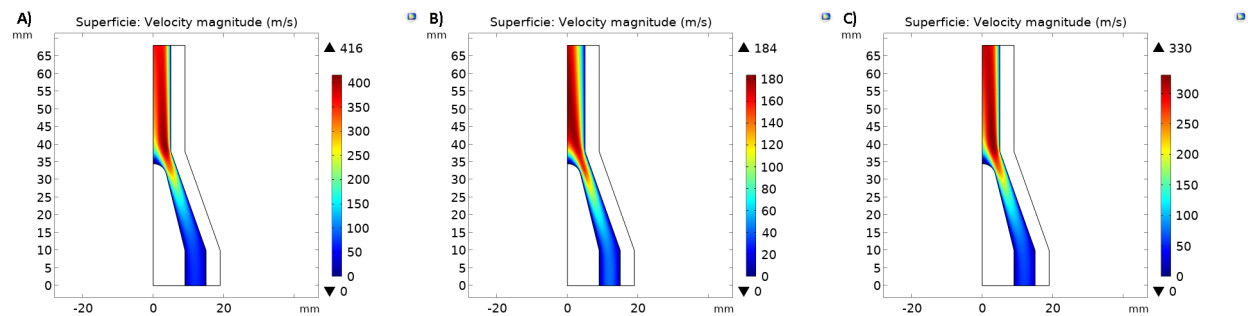


Figura 37: Perfil de rapidez del chorro al interior de la antorcha usando diferentes gases de trabajo: A) Argón, B) Hidrógeno y C) Nitrógeno. Note el cambio en la ubicación de la región de máxima rapidez (rojo oscuro).

SIMULACIÓN MULTIFÍSICA DE ANTORCHA CON COMSOL

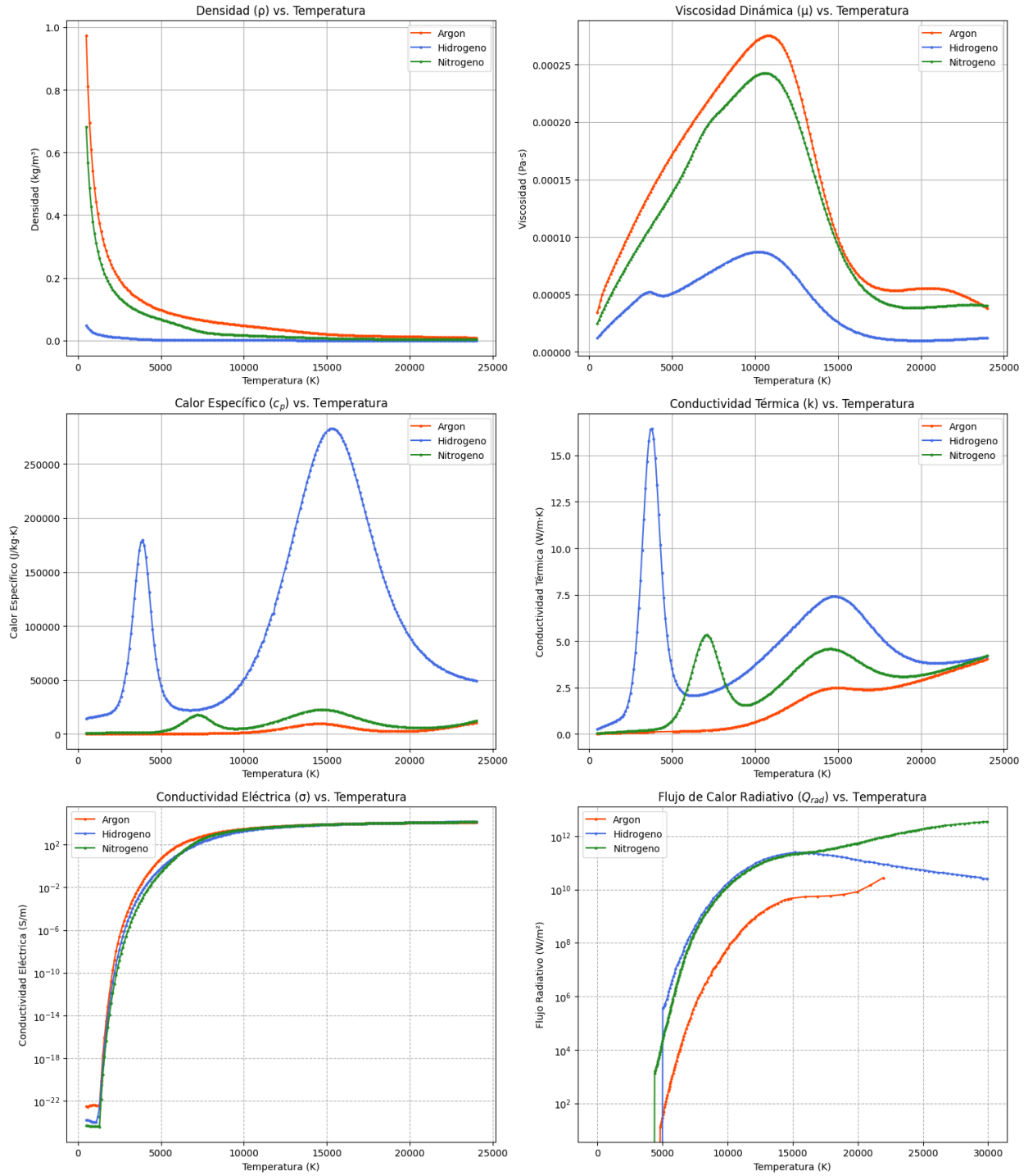


Figura 38: Propiedades físicas de los gases utilizados. la curva punteada roja corresponde al argón (Ar), en azul al Hidrógeno (H_2) y en verde al nitrógeno (N_2).

5 Conclusiones

En este trabajo de investigación se implementó un modelo multifísico de ecuaciones diferenciales parciales para estudiar computacionalmente el encendido y operación estacionaria de tres configuraciones geométricas de antorchas de plasma de arco no transferido: esférica-tubular, cónica-tubular y cónica-tobera. Cada una fue operando con las mismas combinaciones de los parámetros de funcionamiento. La **fente de corriente** (Q_j) en la punta del cátodo es el parámetro dominante en el calentamiento inicial; el **flujo másico** (Q) modula el enfriamiento convectivo; la **geometría** de la punta del cátodo y la boquilla influyeron en la rapidez de incremento de la temperatura: la punta esférica permite alcanzar el estado estable mas rápido y llegar a la mayor temperatura. Los rangos obtenidos ($9\,630 - 12\,500 [K]$ y $336 - 413 [m/s]$) muestran consistencia con estudios experimentales con plasma de argón: $6\,725 \pm 740 [K]$ (Shalai et al. (2022)) y $12\,000 - 15\,306 [K]$ (Siddanathi et al. (2023)); Simulaciones CFD 2D: $16\,980 - 17\,173 [K]$ (Liu et al. (2019)); Modelos 3D: $14\,300 - 15\,400 [K]$ y $210 - 1\,167 [m/s]$ (Demir et al. (2020); de la Figal et al. (2010)) confirmando la validez del modelo para aplicaciones de plasma térmico. La detección de anomalías térmicas ($T_{min} = -0,46 [K]$) en la configuración cónica-tubular sugiere limitaciones del modelo de Equilibrio Termodinámico Local (LTE) en regiones frías, recomendando modelos de no-LTE para mayor precisión (Trelles et al. (2007)). Al reproducir las mismas condiciones de operación para la misma antorcha, la simulación evidencia una marcada sensibilidad de los resultados frente a las propiedades de los gases de trabajo: la temperatura y rapidez del chorro son de $16\,600 [K]$ y $416 [m/s]$ para el argón, $7\,720 [K]$ y $330 [m/s]$ para el nitrógeno y $5\,550 [K]$ y $184 [m/s]$ para el hidrógeno.

SIMULACIÓN MULTIFISICA DE ANTORCHA CON COMSOL

Futuras investigaciones deberán incorporar:

- Modelos de turbulencia en la dinámica de fluidos
- Fuerza de Lorentz en acoplamientos electromagnéticos y las especies ionizadas del gas:
esto podría incrementar la rapidez de salida del gas y reducir su temperatura
- Modelos N-LTE y dinámica del arco
- Mezcla de gases de trabajo en lugar de gases puros.

Referencias

- (2023). Día internacional de cero desechos: La onu aboga por el cambio hacia una economía circular. <https://news.un.org/es/story/2023/03/1519822>.
- ALIMANT, A. and BILLIERES, D. (2017). Antorcha de plasma con inyector lateral.
- Alshunaifi, I. A., Elaissi, S., Ghiloufi, I., Alterary, S. S., and Alharbi, A. A. (2021). Modelling of a non-transferred plasma torch used for nano-silica powders production. *Applied Sciences 2021, Vol. 11, Page 9842*, 11:9842.
- Bondarenko, D., Gabbar, H. A., and Stoute, C. A. (2017). Engineering design of plasma generation devices using elmer finite element simulation methods. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 20:160–167.
- Boulos, M. I., Fauchais, P., and Pfender, E. (2016). Electrode phenomena in plasma sources. *Handbook of Thermal Plasmas*, pages 1–43.
- Changming, D., Chao, S., Gong, X., Ting, W., and Xiange, W. (2018). Plasma methods for metals recovery from metal-containing waste. *Waste Management*, 77:373–387.
- Chine-P, B., Vargas-B, I., and Mata-C, M. (2018). I- plare torch: Diseño y simulación de una antorcha de plasma térmico de arco no transferido para el tratamiento de residuos.
- Chinè, B. (2017). A plasma torch model.
- Chiné, B., Mata, M. F., and Vargas, I. V. (2019). Modelación de una antorcha de plasma de arco no transferido. *Tecnociencia*, 32(1):13–26.

SIMULACIÓN MULTIFISICA DE ANTORCHA CON COMSOL

COMSOL Multiphysics (1998a). *AC/DC Module User's Guide*.

COMSOL Multiphysics (1998b). *CFD Module User's Guide*.

COMSOL Multiphysics (1998c). *Heat Transfer Module User's Guide*.

COMSOL Multiphysics (1998d). *Plasma Module User's Guide*.

COMSOL Multiphysics (1998e). *User's Guide*.

CROWE, G. A., KUSAK, T., LAPCIK, Z., and Leiteritz, N. G. (2014). Plasma torch and components.

de la Figal, J. G., Pérez, A. F., Carceller, R. C., and Junior, C. A. (2010). Simulación de antorcha de plasma. *Revista Cubana de Ingeniería*, 1:25–30.

Demir, F., Yurtkuran, E., Unal, R., and Ozsunar, A. (2020). 3d cfd modelling of non-transferred argon plasma torch. *Materials Today: Proceedings*, 32:12–17.

Gazzo, R. and Librandi, V. (2007). Tratamiento de desechos y aprovechamiento.

Gomez, E., Rani, D. A., Cheeseman, C. R., Deegan, D., Wise, M., and Boccaccini, A. R. (2009). Thermal plasma technology for the treatment of wastes: A critical review. *Journal of Hazardous Materials*, 161:614–626.

Gritter, L. T., Crompton, J. S., and Koppenhoefer, K. C. (2017). Simulation of atmospheric air micro plasma jet for biomedical applications.

Guo, Z., Yin, S., Liao, H., and Gu, S. (2015). Three-dimensional simulation of an ar-

gon-hydrogen dc non-transferred arc plasma torch. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 80:644–652.

Gutierrez, A. (2022). Informe de los objetivos de desarrollo sostenible.

Heberlein, J. and Murphy, A. B. (2008). Thermal plasma waste treatment. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 41:053001.

Iván, V. and Blanco, V. (2012). Determinación del potencial y los requerimientos para aplicar la tecnología de gasificación por plasma en el tratamiento de desechos y la producción de energía eléctrica en el país.

Jeon, B., Kwon, H., Yoo, Y. W., Kim, D. H., Park, Y., Kang, Y.-j., Murphy, A. B., and Park, H. (2025). Computational modeling of the effect of nitrogen on the plasma spray process with ar-h2-n2 mixtures. *Processes*, 13(4):1155.

JOHN, R. R., BENNETT, S., and CONNORS, J. F. (1963). Arcjet engine performance-experiment and theory. *AIAA Journal*, 1(11):2517–2525.

Jovel, D. R. and Walker, M. L. R. (2022). Review of high-power electrostatic and electrothermal electric propulsion. *Journal of Propulsion and Power*, 38:1051–1081.

Kamińska, A., Bialek, A., and Dudeck, M. A. (2015). Performances of an argon arc-jet thruster for satellites. *Romanian Journal of Physics*, 60:549–559.

Kaza, S., Yao, L., Bhada-Tata, P., and Woerden, F. V. (2018). What a waste 2.0: a global snapshot of solid waste management to 2050.

SIMULACIÓN MULTIFISICA DE ANTORCHA CON COMSOL

Kim, M., Lee, Y. H., Oh, J. H., Hong, S. H., Min, B. I., Kim, T. H., and Choi, S. (2020).

Synthesis of boron nitride nanotubes using triple dc thermal plasma reactor with hydrogen injection. *Chemical Engineering Journal*, 395:125148.

KRINK, V., LAURISCH, F., and GRUNDKE, T. (2014). Boquilla para una antorcha de

plasma refrigerada por líquido, disposición de la misma y un capuchón de boquilla así como antorcha de plasma refrigerada por líquido con una disposición de este tipoe plasma con la misma.

Kurihara, K., Sasaki, K., Kawarada, M., physics letters, N. K. A., and undefined 1988 (1988).

High rate synthesis of diamond by dc plasma jet chemical vapor deposition. *pubs.aip.org*, 52:32.

Laroussi, M. and Akan, T. (2007). Arc-free atmospheric pressure cold plasma jets: A review.

Plasma Processes and Polymers, 4:777–788.

Li, H.-P. and Chen, X. (2001). Three-dimensional modelling of a dc non-transferred arc

plasma torch. *J. Phys. D: Appl. Phys*, 34:99–102.

Lichtin, D. A. and Blum, J. H. (2017). Arcjet propulsion systems for spacecraft and related

method.

Liu, S.-H., Trelles, J. P., Murphy, A. B., Li, L., Zhang, S.-L., Yang, G.-J., Li, C.-X., and Li,

C.-J. (2019). Numerical simulation of the flow characteristics inside a novel plasma spray torch. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 52(33):335203.

Lu, F. X., Tang, W. Z., Zhong, G. F., Huang, T. B., Liu, J. M., Li, G. H., Lo, T. L., Zhang,

Y. G., Sun, Z. L., Du, S. M., He, Q. Y., and Wang, S. I. (2000). Economical deposition of

SIMULACIÓN MULTIFISICA DE ANTORCHA CON COMSOL

- a large area of high quality diamond film by a high power dc arc plasma jet operating in a gas recycling mode. *Diamond and Related Materials*, 9:1655–1659.
- Lu, Z. P., Stachowicz, L., Kong, P., Heberlein, J., and Pfender, E. (1991). Diamond synthesis by dc thermal plasma cvd at 1 atm. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 11:387–394.
- Mannion, S. A., Murakami, T., McDonnell, C., Field, T. A., Riley, D., White, S., and Graham, W. G. (2020). Benchmarking an atmospheric pressure plasma jet using comsol multiphysics® take a picture to watch youtube of my poster background. *COMSOL Conference 2020 Europe*.
- Martín, J. and María, M. (2015). Estudio de las perturbaciones de las órbitas de los satélites artificiales.
- Marín, J. A. S. (2010). Estudio del comportamiento de cátodos termoiónicos en arcos de plasma.
- Mazouffre, S. (2016). Electric propulsion for satellites and spacecraft: established technologies and novel approaches. *IOP Science*.
- Meillot, E. and Guenadou, D. (2014). Dispositivo y procedimiento de destrucción de residuos líquidos, pulverulentos o gaseosos por plasma inductivo.
- Meredith, R. (1942). Welding torce.
- NAGASHEV, B. W. (1930). Atomic gas torch.
- Park, H., Kwon, H., Kang, Y.-j., Yoo, Y. W., Kim, D. H., Park, Y., Lee, S., and Kim, C.

Effect of gas mixtures on arc plasma and in-flight mgal2o4 particle behavior in plasma spraying.

Qunbo, F., Lu, W., and Fuchi, W. (2005). 3d simulation of the plasma jet in thermal plasma spraying. *Journal of Materials Processing Technology*, 166:224–229.

Schütze, A., Jeong, J. Y., Babayan, S. E., Park, J., Selwyn, G. S., and Hicks, R. F. (1998). The atmospheric-pressure plasma jet: A review and comparison to other plasma sources.

Selvan, B., Ramachandran, K., Sreekumar, K. P., Thiyagarajan, T. K., and Ananthapadmanabhan, P. V. (2009). Numerical and experimental studies on dc plasma spray torch. *Vacuum*, 84:444–452.

Shalai, V. V., Gorbunkov, V. I., and Kolganov, I. V. (2022). Modelado matemático de procesos térmicos de un micromotor de plasma eléctrico. *Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering*, 6(3):17–23.

Shao, S., Liu, P., Ye, S., Chen, L., Zhang, J., Wei, J., Liu, J., and Li, C. (2024). Comparison and analysis of properties of transparent and translucent diamonds prepared via dc arc plasma jet cvd. *Diamond and Related Materials*, 142:110710.

Shavelkina, M. B., Amirov, R. K., Kavyrshin, D. I., and Yusupov, D. I. (2019). Plasma jet-assisted synthesis of graphene using a dc plasma torch. *Plasma Physics Reports*, 45:1080–1086.

Siddanathi, S. L., Westerberg, L. G., Åkerstedt, H. O., Wiinikka, H., and Sepman, A. (2023). Computational modeling and temperature measurements using emission spectroscopy on a non-transferred plasma torch. *AIP Advances*, 13(2):025019.

- Sikarwar, V. S., Hrabovský, M., Oost, G. V., Pohořelý, M., and Jeremiáš, M. (2020). Progress in waste utilization via thermal plasma. *Progress in Energy and Combustion Science*, 81:100873.
- Tang, L., Liu, B., Xia, Q., and Peng, A. (2022). Three-dimensional analysis of the influence of the magnetic flux density on minimum pr in a faraday-type mhd channel. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 50(2):417–424.
- Tendero, C., Tixier, C., Tristant, P., Desmaison, J., and Leprince, P. (2006). Atmospheric pressure plasmas: A review. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 61:2–30.
- Trelles, J., Heberlein, J., and Pfender, E. (2007). Non-equilibrium modelling of arc plasma torches. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 40(19):5937.
- Trelles, J. P., Pfender, E., and Heberlein, J. (2006). Multiscale finite element modeling of arc dynamics in a dc plasma torch. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 26:557–575.
- Viegas, P., Slikboer, E., Bonaventura, Z., Guaitella, O., Sobota, A., and Bourdon, A. (2022). Physics of plasma jets and interaction with surfaces: Review on modelling and experiments. *Plasma Sources Science and Technology*, 31.
- Winter, J., Brandenburg, R., and Weltmann, K. D. (2015). Atmospheric pressure plasma jets: an overview of devices and new directions. *Plasma Sources Science and Technology*, 24:064001.
- Yoshikawa, T., Onoe, K., Oba, T., Yoshida, H., Suzuki, H., and Morimoto, S. (1987). Development of a low power dc arcjet for space propulsion. *19th International Electric Propulsion Conference, 1987*.