

INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS SUPERIORES DE MONTERREY
CAMPUS ESTADO DE MÉXICO



MODELO TEÓRICO Y SIMULACIÓN CFD DE LOS CHORROS DE PLASMA EN EL PROCESO DE RECUBRIMIENTO METÁLICO.

TESIS QUE PARA OPTAR EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS EN SISTEMAS DE MANUFACTURA
PRESENTA

NAYELI YOHABET CABALLERO CÁRDENAS

Asesor: Dr. ARMANDO BRAVO ORTEGA

Comité de M. en C. VÍCTOR ROMERO M.

Tesis: M. en C. SOFÍA FADDÉVA

Jurado: M en C VICTOR ROMERO M.

M en C SOFÍA FADDÉVA

Dr. ARMANDO BRAVO O.

Presidente

Secretario

Vocal

Atizapán de Zaragoza, Edo. Méx., Agosto 2002.

RESUMEN

Muchos materiales, en especial los metales, pueden ser alterados en su superficie mediante ataques químicos, electroquímicos, o por contacto con otras superficies.

Los daños y gastos producidos por el deterioro de los materiales es muy alto, por lo que en la actualidad se aplican diversos métodos para evitar que esto ocurra, (o por lo menos mantenerlo dentro de los límites soportables), entre estos métodos de recubrimientos encontramos: recubrimiento por conversión, recubrimiento por electro deposición, recubrimiento por deposición física de vapor, recubrimiento por deposición química de vapor y recubrimiento por plasma.

Dentro del recubrimiento por plasma, se encuentran diversas ventajas, entre las que destaca la importancia de la ecología, debido a que no se produce ninguna reacción contaminante y no existen desperdicios; otra ventaja muy importante es la seguridad del personal, ya que este método no es tóxico y es un proceso que facilita su automatización. Por lo anterior la presente tesis se enfoca a este método de recubrimiento.

El objetivo de la presente tesis, fue el desarrollo de una metodología de investigación para el análisis numérico y simulación de los chorros o jets de plasma para el recubrimiento metálico. El recubrimiento por rociado de plasma es un camino poco estudiado por la industria manufacturera en México, por lo que mi objetivo fue planteado con el fin de aportar alternativas dentro del amplio campo de los recubrimientos superficiales aplicables en nuestro País y nuestra industria.

Durante el desarrollo de esta tesis establecí el modelo teórico, obtenido por medio de una extensa investigación bibliográfica y recopilación de datos.

Posteriormente hice algunas simplificaciones y suposiciones al modelo, para dar lugar a la simulación en 2 dimensiones, obteniendo el chorro o jet de plasma de gas Argón y gas Nitrógeno respectivamente. Se realizaron nueve simulaciones, donde se variaron parámetros como: voltaje, corriente, potencia y gas para producir el plasma. Dichas simulaciones fueron realizadas en el paquete CFD Fluent 5.

Este estudio se basó en experimentos anteriores que forman parte del estudio del Recubrimiento por rociado de plasma realizados en el ITESM-CEM, además de tomar como base datos bibliográficos de los recubrimientos superficiales, en especial de la técnica APS. Cabe señalar que la aportación de la presente tesis es el abrir el panorama industrial a *nuevos* métodos de recubrimiento, métodos que existen hace tiempo pero que no se emplean en la industria Mexicana.

ÍNDICE GENERAL

1	<u>CAPÍTULO UNO: INTRODUCCIÓN</u>	1
1.1	ANTECEDENTES	1
1.2	PROBLEMÁTICA Y NECESIDADES EXISTENTES	2
1.2.1	TÉCNICAS DE RECUBRIMIENTO	2
1.2.2	ASPECTOS GENERALES DE LA TÉCNICA DE RECUBRIMIENTO POR ROCIADO DE PLASMA	4
1.2.2.1	Campos de Aplicación para el Recubrimiento por Rociado de Plasma.	5
1.2.3	SITUACIÓN NACIONAL SOBRE EL RECUBRIMIENTO POR PLASMA	6
1.3	JUSTIFICACIÓN	7
1.3.1	IMPORTANCIA DEL ESTUDIO DE CHORROS DE PLASMA	8
1.4	OBJETIVO DE LA TESIS	10
1.5	ORGANIZACIÓN DE LA TESIS	10
2	<u>CAPÍTULO DOS: MARCO TEÓRICO</u>	11
2.1	CONCEPTOS GENERALES SOBRE FLUIDOS.	11
2.1.1	PROPIEDADES TERMODINÁMICAS DE FLUIDOS	12
2.2	COMBUSTIÓN Y REACCIONES QUÍMICAS	17
2.2.1	CONCEPTOS GENERALES DE LA COMBUSTIÓN	18
2.2.1.1	Combustibles Gaseosos	19
2.2.2	TERMODINÁMICA DE LA COMBUSTIÓN	20
2.2.3	PROPIEDADES DE LOS CHORROS	22
2.2.3.1	Temperatura de Auto inflamación, energía mínima de inflamación y distancia de extinción.	22
2.2.3.2	Velocidad de Propagación	23
2.2.3.3	Límites de Inflamabilidad	24
2.2.3.4	Forma y Longitud de la Flama y los Chorros	24
2.2.3.5	Estabilidad	26
2.3	COMPORTAMIENTO DE CHORROS SUPERSÓNICOS	26
2.3.1	CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES	27
2.3.2	FLUJOS SUPERSÓNICOS TURBULENTOS.	28
2.3.3	MODELO K- ϵ . PARA FLUJOS TURBULENTOS	30
2.4	PLASMA Y SUS PROPIEDADES.	30
2.4.1	PROPIEDADES DE LOS PLASMA TÉRMICOS	31
2.5	DEFINICIONES Y CONCEPTOS BÁSICOS DEL PROCESO DE RECUBRIMIENTO POR ROCIADO DE PLASMA	32

3	<u>CAPÍTULO TRES: MODELAJE TEÓRICO DEL CHORRO DE PLASMA</u>	35
3.1	ESTADO ACTUAL DE CHORROS O JETS-DE PLASMA	36
3.1.1	CHORRO DE PLASMA EN CAMPOS ESPECÍFICOS COMO: VIAJES ESPACIALES, CORTE, SOLDADURA Y OTROS.	37
3.2	CHORRO DE PLASMA EN EL RECUBRIMIENTO POR ROCIADO DE PLASMA	39
3.2.1	BASES TEÓRICAS	40
3.2.2	SUPOSICIONES TEÓRICAS	41
3.2.3	DINÁMICA DEL CHORRO DE PLASMA Y TRANSFERENCIA DE CALOR	42
3.2.3.1	INTERACCIÓN CHORRO – PARTÍCULAS	44
3.2.4	PARÁMETROS CRÍTICOS	45
4	<u>CAPITULO CUATRO: MODELAJE CFD DEL CHORRO DE PLASMA</u>	51
4.1	CFD: DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONALES	52
4.2	EMPLEO DEL PAQUETE GAMBIT	52
4.2.1	MALLADO DE LA REGIÓN DEL CHORRO.	53
4.2.2	DEFINICIÓN DE CONDICIONES DE FRONTERA	55
4.3	EMPLEO DEL PAQUETE FLUENT .	56
4.3.1	VARIACIÓN DE PARÁMETROS EN LA SIMULACIÓN	57
4.3.2	SIMULACIÓN DEL JET SUPERSÓNICO.	59
4.4	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	60
5	<u>CAPÍTULO CINCO: ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES</u>	69
5.1	SELECCIÓN Y VALIDACIÓN DE UN JET SUPERSÓNICO DE PLASMA.	69
5.1.1	VALIDACIÓN CON LOS PARÁMETROS CRÍTICOS Y LOS RESULTADOS OBTENIDOS DE LA MODELACIÓN Y SIMULACIÓN.	88
5.2	CONCLUSIONES	91
6	<u>BIBLIOGRAFÍA</u>	94

NOMENCLATURA

A	Área.
c	Velocidad del sonido.
C_p	Calor específico a presión constante.
C_v	Calor específico a volumen constante.
e	Energía interna total por unidad de masa.
F	Fuerza.
g	Gravedad.
g	Fuerza gravitacional
h	Entalpía.
h_0	Entalpía de estancamiento.
k	Conductividad térmica.
m	Masa.
Ma	Número de Mach.
P	Presión.
Q	Calor neto absorbido.
q	Flujo de calor.
ρ	Densidad.
R	Constante del Gas Ideal.
r	eje radial
Re	Número de Reynolds.
S	Densidad relativa.
s	entropía
Sh	Potencia por unidad de volumen
T	Temperatura
u	Energía interna.
V	Volumen.
v	Velocidad.
W	Trabajo.
z	eje axial
Z	factor de compresibilidad
γ	Relación de calores específicos.
ϵ	Energía de disipación de turbulencia
κ	Energía cinética de turbulencia
μ	Coefficiente de viscosidad.
τ	Esfuerzo cortante.
v	Volumen específico.

LISTA DE FIGURAS

FIG. 1.1 PROCESO DE RECUBRIMIENTO POR ROCIADO DE PLASMA	5
FIG. 1.2 FACTORES DE LOS QUE DEPENDE LA CALIDAD DEL RECUBRIMIENTO.	8
FIG. 2.1 VARIACIÓN TÍPICA DE LA VELOCIDAD DE UN FLUIDO	16
FIG. 2.2 MODELO DE MALLARD Y LE CHATELIER.	23
FIG. 2.3 CHORRO DIFUSO LAMINAR	25
FIG. 2.4 CHORROS TURBULENTOS	26
FIG. 2.5 GRÁFICA DE HUGONIOT	28
FIG. 2.6 JET DE PLASMA Y FLUJO TURBULENTO	29
FIG. 2.7 TRANSICIÓN DE CHORRO LAMINAR-TURBULENTO	29
FIG. 2.8 PLASMA EL CUARTO ESTADO DE LA MATERIA	33
FIG. 3.1 CHORRO Y PISTOLA DE PLASMA	35
FIG. 3.2 ROCIADO POR PLASMA – JET DE PLASMA	36
FIG. 3.3 SOLDADURA	37
FIG. 3.4 CORTE CON PLASMA.	38
FIG. 3.5 TIG VS CHORRO DE PLASMA.	38
FIG. 3.6 PROCESOS EN LA PISTOLA DE PLASMA – JET DE PLASMA	39
FIG. 3.7 JET DE PLASMA SIMÉTRICO	41
FIG. 3.8 REGIONES DEL CHORRO	42
FIG. 3.9 JET DE PLASMA	43
FIG. 3.10 PARTÍCULAS FUNDIDAS ROCIADAS CONTRA EL SUSTRATO	45
FIG. 3.11 ESQUEMA TÉRMICO DEL JET DE PLASMA	46
FIG. 3.13 ENERGÍA DE DISOCIACIÓN-IONIZACIÓN VS TEMPERATURA	48
FIG. 4.1 REGIÓN AMBIENTE	52
FIG. 4.2 REGIÓN DE LA BOQUILLA	53
FIG. 4.3A. MALLADO DEL MODELO AXISIMÉTRICO PARA EL ANÁLISIS DEL CHORRO DE PLASMA.	54
FIG. 4.4A CONDICIONES DE FRONTERA EN LA ZONA AMBIENTE.	55
FIG. 4.4B CONDICIONES DE FRONTERA ZONA BOQUILLA	56
FIG. 4.5 REGIÓN CÁTODO- ÁNODO	57
FIG. 4.6 EXPERIMENTO No.1	60
FIG. 4.7 EXPERIMENTO No.2	61
FIG. 4.8 EXPERIMENTO No.3	62
FIG. 4.9 EXPERIMENTO No.4	63
FIG. 4.10 EXPERIMENTO No.5	64
FIG. 4.11 EXPERIMENTO No.6	65
FIG. 4.12 EXPERIMENTO No.7	66
FIG. 4.13 EXPERIMENTO No.8	67
FIG. 4.14 EXPERIMENTO No.9	68
FIG. 5.1A GRÁFICA TEMPERATURA VS POSICIÓN DEL EXPERIMENTO No. 1	70
FIG. 5.1B GRÁFICA VELOCIDAD VS POSICIÓN DEL EXPERIMENTO No. 1	70
FIG. 5.1C GRÁFICA FRAC. MASA VS POSICIÓN DEL EXPERIMENTO No. 1	71
FIG. 5.2A GRÁFICA TEMPERATURA VS POSICIÓN DEL EXPERIMENTO No. 2	72

FIG. 5.2B GRÁFICA VELOCIDAD VS POSICIÓN DEL EXPERIMENTO NO. 2	72
FIG. 5.2C GRÁFICA FRACC. DE MASA VS POSICIÓN DEL EXPERIMENTO NO. 2	73
FIG. 5.3A GRÁFICA TEMPERATURA VS POSICIÓN DEL EXPERIMENTO NO. 3	74
FIG. 5.3B GRÁFICA VELOCIDAD VS POSICIÓN DEL EXPERIMENTO NO. 3	74
FIG. 5.3C GRÁFICA FRACC. DE MASA VS POSICIÓN DEL EXPERIMENTO NO. 3	75
FIG. 5.4A GRÁFICA TEMPERATURA VS POSICIÓN DEL EXPERIMENTO NO. 4	76
FIG. 5.4B GRÁFICA VELOCIDAD VS POSICIÓN DEL EXPERIMENTO NO. 4	76
FIG. 5.4C GRÁFICA FRACC. DE MASA VS POSICIÓN DEL EXPERIMENTO NO. 4	77
FIG. 5.5A GRÁFICA TEMPERATURA VS POSICIÓN DEL EXPERIMENTO NO. 5	78
FIG. 5.5B GRÁFICA VELOCIDAD VS POSICIÓN DEL EXPERIMENTO NO. 5	78
FIG. 5.5C GRÁFICA FRACC. DE MASA VS POSICIÓN DEL EXPERIMENTO NO. 5	79
FIG. 5.6A GRÁFICA TEMPERATURA VS POSICIÓN DEL EXPERIMENTO NO. 6	80
FIG. 5.6B GRÁFICA VELOCIDAD VS POSICIÓN DEL EXPERIMENTO NO. 6	80
FIG. 5.6C GRÁFICA FRACC. DE MASA VS POSICIÓN DEL EXPERIMENTO NO. 6	81
FIG. 5.7A GRÁFICA TEMPERATURA VS POSICIÓN DEL EXPERIMENTO NO. 7	82
FIG. 5.7B GRÁFICA VELOCIDAD VS POSICIÓN DEL EXPERIMENTO NO. 7	82
FIG. 5.7C GRÁFICA FRACC. DE MASA VS POSICIÓN DEL EXPERIMENTO NO. 7	83
FIG. 5.8A GRÁFICA TEMPERATURA VS POSICIÓN DEL EXPERIMENTO NO. 8	84
FIG. 5.8B GRÁFICA VELOCIDAD VS POSICIÓN DEL EXPERIMENTO NO. 8	84
FIG. 5.8C GRÁFICA FRACC. DE MASA VS POSICIÓN DEL EXPERIMENTO NO. 8	85
FIG. 5.9A GRÁFICA TEMPERATURA VS POSICIÓN DEL EXPERIMENTO NO. 9	86
FIG. 5.9B GRÁFICA VELOCIDAD VS POSICIÓN DEL EXPERIMENTO NO. 9	86
FIG. 5.9C GRÁFICA FRACC. DE MASA VS POSICIÓN DEL EXPERIMENTO NO. 9	87
FIG. 5.10 VARIACIÓN DE LA TEMPERATURA DEPENDIENDO EL GAS UTILIZADO	88
FIG. 5.11 VARIACIÓN DE LA VELOCIDAD DEPENDIENDO EL GAS UTILIZADO	88
FIG. 5.12 VARIACIÓN DE LA TEMPERATURA PARA CADA EXPERIMENTO REALIZADO CON GAS AR	89
FIG. 5.13 VARIACIÓN DE LA VELOCIDAD PARA CADA EXPERIMENTO REALIZADO CON GAS AR	89
FIG. 5.14 VARIACIÓN DE LA LONGITUD PARA CADA EXPERIMENTO REALIZADO CON GAS AR.	89
FIG. 5.15 TEMPERATURA FLAMA- PARTÍCULA	90

LISTA DE TABLAS

TABLA 1.1 TABLA COMPARATIVA DE RECUBRIMIENTOS	3
TABLA 1.2 TABLA DESCRIPTIVA DE LOS MÉTODOS DE ROCIADO POR PLASMA	4
TABLA 1.3 TABLA DE PROPIEDADES Y APLICACIONES	6
TABLA 1.4 EMPRESAS MANUFACTURERAS EN MÉXICO	7
TABLA 2.1 CLASIFICACIÓN DE GASES COMBUSTIBLES	19
TABLA 2.2 VALORES DE GASES SEGÚN ISO-6976-19	20
TABLA 2.3 TABLA COMPARATIVO DETONACIÓN, DEFLAGRACIÓN.	27
TABLA 3.1 ETAPAS DEL ROCIADO DE PLASMA	40
TABLA 3.2 FACTORES QUE INFLUYEN EN EL CHORRO DE PLASMA	47
TABLA 3.3 RANGO DE VARIACIÓN DE PARÁMETROS QUE AFECTAN AL JET DE PLASMA.	47
TABLA 4.1 DIMENSIONES BOQUILLA · AMBIENTE	53
TABLA 4.2 DATOS EXPERIMENTALES	58
TABLA 4.3 RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN.	59

1 CAPÍTULO UNO: INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES

La manufactura es el proceso de coordinación de personal, herramientas y máquinas para convertir materias primas en productos útiles.

El desarrollo de la manufactura moderna además de estar vinculada con el empleo y desarrollo de máquinas herramientas también está relacionado con el desarrollo y mejora de las propiedades de los materiales. La diversificación de los productos y los altos volúmenes de producción exigen, de modo invariable, la diversificación en los materiales utilizados. Por otra parte, la competitividad del mercado hace que día a día se desarrollen bienes y servicios con los mayores estándares de calidad y funcionamiento, esto nos lleva al perfeccionamiento y creación de nuevos materiales, que exigen procesos de manufactura más complejos.

Al concepto de producción de un bien se asocia inmediatamente el de su mantenimiento. La acción del tiempo y del desgaste provoca en los materiales, un proceso de envejecimiento y una degeneración de su eficacia técnica, así como su obsolescencia tecnológica. Aún la utilización más o menos correcta, produce el desgaste del mismo.

Toda la maquinaria, herramienta y partes de producción de una instalación están, sujetas a averías, rupturas y deterioros debidos al desgaste. En todos los casos, además de los gastos de sustitución o reparación, estas interrupciones producen pérdidas de producción y de servicios o degradan la calidad del producto.

Entre los requisitos que deben satisfacer la mayoría de los productos industriales están el atractivo estético y la resistencia al deterioro. El atractivo estético se relaciona con el acabado superficial y es un factor importante para las ventas. La resistencia al deterioro es la durabilidad de la superficie en el uso a que se destina. Algunos materiales tienen resistencia natural a los elementos; otros necesitan protección con revestimiento en la superficie para hacerlos más durables.

Muchos materiales, en especial los metales, pueden ser alterados en su superficie mediante ataques químicos, electroquímicos, o por contacto con otras superficies. Los daños y gastos producidos por el deterioro de los materiales es muy alto, por lo que en la actualidad se aplican diversos métodos para evitar que esto ocurra, o por lo menos mantenerlo dentro de los límites soportables.

El recubrimiento superficial consiste en colocar al material una película (capa delgada) protectora, que ayude al material a mejorar sus propiedades superficiales, que evite o por lo menos reduzca el deterioro de dicho material.

1.2 PROBLEMÁTICA Y NECESIDADES EXISTENTES

La vida y la seguridad del funcionamiento de piezas, elementos, materiales y maquinaria, dependen frecuentemente del grado en que se pueda evitar algunos de los procesos de corrosión, erosión, abrasión y desgaste, entre otros. En particular la corrosión puede ocasionar que los materiales se desgasten a tal grado que lleguen a fallar al no poder soportar las condiciones de trabajo a las que están sometidos. Por ello es importante dar mantenimiento y mayor protección.

Por todo lo anterior, surge la necesidad de disponer de materiales con características de trabajo especial, que puedan soportar condiciones de trabajo críticas. Según el tipo de exigencias que se deseen satisfacer, las propiedades requeridas deben ser extensivas a todo el volumen del material o a su zona superficial. Para el caso de la corrosión, erosión, abrasión y desgaste lo importante es lo que ocurre en la zona superficial, por ello son las propiedades de la superficie las determinantes para desempeñar un buen trabajo.

1.2.1 TÉCNICAS DE RECUBRIMIENTO

Existen diversas técnicas de recubrimientos que ayudan al material, pieza y/o maquinaria a mejorar sus características superficiales entre los que encontramos:

- Recubrimiento por Conversión (Químico, Anodizado)
- Recubrimiento por Electro deposición (Tambor, Estantes, Tiras)
- Recubrimiento por Deposición Física de Vapor
- Recubrimiento por Deposición Química de Vapor
- Recubrimiento por Plasma

Tabla 1.1 Tabla Comparativa de Recubrimientos

RECUBRIMIENTO	APLICACIONES	VENTAJAS	DESVENTAJAS
CONVERSIÓN: Químicos Anodizado	Resistencia a la corrosión Resistencia al desgaste Aumenta la resistencia eléctrica Acabados decorativos Identificación de partes	Se emplea comúnmente en materiales de Zinc, Aluminio, Acero. Recubrimientos más empleados: óxido, Fosfato y Cromato	El recubrimiento se realiza por inmersión Se provocan reacciones químicas, por lo que se contamina Es un proceso Tóxico
ELECTRO- DEPOSICIÓN:	Resistencia a la corrosión Decorativos Ajuste automotriz Mejora soldabilidad Resistencia al desgaste	Produce uno de los recubrimientos más duros Se utiliza en piezas pequeñas, grandes y complejas.	Se necesita limpieza química al material antes de la deposición Depende de la eficacia del cátodo Proceso Tóxico Se requiere de un estante específico para cada tipo de pieza a recubrir.
DEPOSICIÓN FÍSICA DE VAPOR	Recubrimientos anti-reflejantes Resistencia al desgaste Películas delgadas	Se aplica a casi todos los materiales Costo inicial bajo Mejor descarga de energía Es posible recubrir compuestos	Se trabaja con cámara al vacío Se utiliza en piezas pequeñas La adhesión del recubrimiento no es tan buena. Velocidad de deposición variable
DEPOSICIÓN QUÍMICA DE VAPOR	Resistencia al desgaste Resistencia a la corrosión Resistencia a la erosión	Se controla el tamaño de grano Proceso a presión ambiente Buena unión entre sustrato y recubrimiento	Proceso Tóxico Precisa de descomposiciones químicas Naturaleza corrosiva Alto costo de medidas de seguridad
PLASMA	Antioxidante Resistencia al desgaste , corrosión, abrasión y erosión Mejora características eléctricas y ópticas Ayuda en Bio-compatibilidad de prótesis.	Fácil Automatización No produce desechos No es tóxico Se trabaja a presión atmosférica Equipo portátil Se controla porosidad y espesor del recubrimiento Amplia gama de recubrimientos Aplicable a cualquier geometría, tamaño, peso y material a recubrir	Costo inicial alto Proceso requiere altas temperaturas Consumibles a alto costo La mayor parte de las refacciones y consumibles se deben importar.

El *Cuadro 1.1* nos muestra una tabla comparativa sobre ventajas y desventajas de las técnicas de recubrimiento superficial antes mencionados, así como algunas características que brinda dicha técnica de recubrimiento.

Como podemos observar dentro de la técnica de recubrimiento por plasma, se encuentran diversas ventajas, entre las que se destaca la importancia de la ecología debido a que los desechos que se producen son mínimos y hasta nulos, ya que no se produce ninguna reacción contaminante y no existen desperdicios; otra ventaja muy importante es la seguridad del personal, ya que este método no es tóxico y es un proceso que facilita su automatización.

1.2.2 ASPECTOS GENERALES DE LA TÉCNICA DE RECUBRIMIENTO POR ROCIADO DE PLASMA

Dentro de las técnicas de recubrimientos tenemos el proceso de **Rociado por Plasma** el cual es parte del campo denominado Rociado Térmico (Thermal spraying), siendo el Rociado por Plasma una de las técnicas más innovadoras.

En la tabla 1.2 hago un breve resumen de las diferentes técnicas del proceso de rociado térmico:

Técnica	Descripción
APS (Atmospherical plasma spraying)	Es la más económica y es recomendada cuando la oxidación del material en el proceso no es posible o el grado de oxidación es mínimo.
IPS(Inert plasma Spraying)	Se utiliza cuando los materiales a recubrir tienen un grado de oxidación alto durante el proceso y para evitar esto, el proceso se realiza en una atmósfera que contiene un gas inerte.
VPS(Vacuum plasma Spraying)	Esta es una mejora del método IPS y alguna de las ventajas que presenta es que puede limpiar y /o precalentar la superficie a recubrir.
UPS(underwater plasma Spraying)	Este método ofrece ciertas ventajas a lo que se refiere a la salud, ya que el agua retiene las radiaciones, reduciéndolas al mínimo, también el agua atrapa los restos o las partículas que no se adhirieron pudiendo separarlas después.
IPC (Inductive coupled plasma spraying)	El plasma se forma por campos electromagnéticos, las ventajas son las de trabajar a menores temperaturas.

Tabla 1.2 Tabla descriptiva de los Métodos de Rociado por Plasma

En el capítulo 2 se hablará con mayor detenimiento de las técnicas anteriores. A continuación se presenta una breve descripción sobre la técnica, en que consiste y fases que intervienen dentro del Recubrimiento por Rociado de plasma.

El proceso de Rociado por Plasma se resume en los siguientes pasos: Se tiene el material del recubrimiento deseado en forma de polvo^{1}, dicho polvo para recubrimiento se introduce en el paso del plasma, el cual es creado por un arco eléctrico que se forma entre un cátodo^{2} de tungsteno y una boquilla de cobre que funciona como ánodo^{2} dentro de la pistola de plasma, las partículas de polvo inyectadas al plasma^{3} se funden y son lanzadas a velocidades muy altas a través del chorro o Jet de plasma^{3} para formar una estructura laminar y así recubrir el material deseado (sustrato). Esta técnica comúnmente se utiliza al final del proceso de manufactura (acabado de la pieza o parte) o en el mantenimiento y reparación de equipos y/o maquinaria.

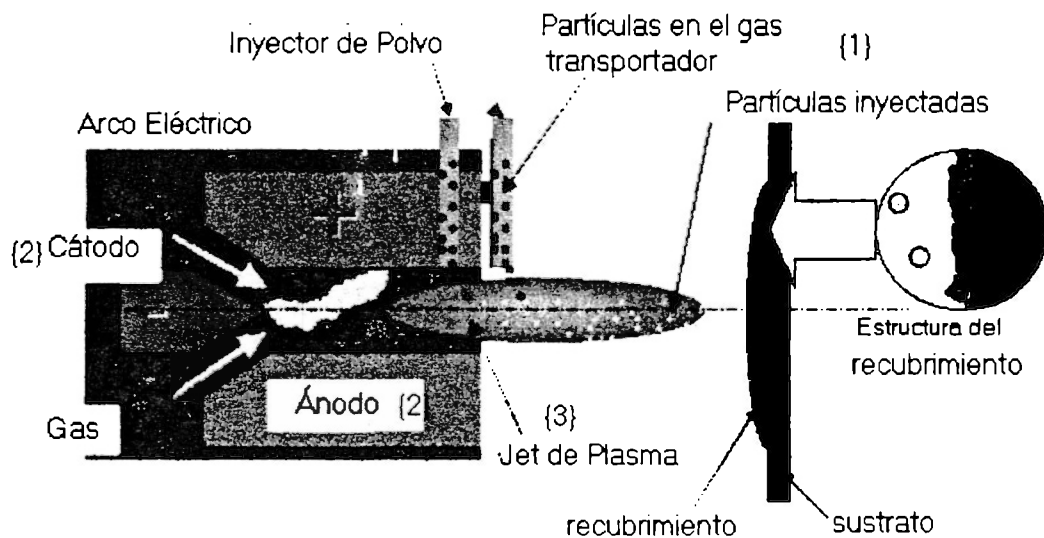


Fig.1.1 Proceso de Recubrimiento por Rociado de Plasma

En el capítulo 2 se explica a detalle cada una de las partes que se muestran en la figura anterior.

1.2.2.1 Campos de Aplicación para el Recubrimiento por Rociado de Plasma.

El recubrimiento por Rociado de Plasma tiene un área de impacto muy grande debido a que se puede aplicar para obtener diversos beneficios como son:

- Evitar que el material recubierto se oxide (Antioxidante)
- Resistencia al desgaste
- Resistencia a la corrosión
- Cambia propiedades eléctricas y ópticas
- Ayuda en el campo de la medicina a la bio-compatibilidad de prótesis.

En la Tabla 1.3 encontramos una descripción sobre la propiedad del material que se mejora, así como algunos ejemplos de las piezas, y la rama industrial a la que se puede emplear dicha mejora.

PROPIEDAD	APLICACIÓN
Resistencia al desgaste	Casquillos y ejes de bombas, ejes de compresor, cierres mecánicos, rodillos, válvulas rotativas, anillos de sincronización, componentes automotrices, segmentos, embragues, bombas de vacío, maquinaria para papel y tabaco.
Aislante Eléctrico y Resistencia a altas temperaturas	Cámaras de combustión, barreras térmicas, pistones de motores, rodillos para hornos, guías, termopares, sensores.
Resistencia a corrosión, abrasión y erosión	Componentes de turbinas, válvulas, industria cementera, rodillos deflectores, ejes.
Recuperación dimensional y mantenimiento de equipos	Industria mecánica, recuperación de medida en ejes desgastados.

Tabla 1.3 Tabla de Propiedades y Aplicaciones

1.2.3 SITUACIÓN NACIONAL SOBRE EL RECUBRIMIENTO POR PLASMA

En México se emplean Recubrimientos Superficiales por diferentes técnicas, el recubrimiento por Rociado de Plasma, no es muy aplicado debido a su alto costo de inversión,[1] pero existen industrias como IIE (Instituto de Investigaciones Eléctricas) que rompiendo con el paradigma del costo a cambio de grandes beneficios tanto tecnológicos, ecológicos como económicos ya aplican este método de recubrimiento en nuestro País.

El mercado de aplicación para este método es bastante amplio, se puede emplear en las Industrias de la rama manufacturera como son:

- Industria Auxiliar y del Papel
- Industria Metal-Mecánica
- Industria Siderúrgica
- Industria petroquímica
- Industria Textil
- Industria Automotriz
- Industria Aeronáutica
- Industria eléctrica y electrónica
- Industria Cementera
- Industria biomédica

El Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE) ha trabajado en recubrimiento por rociado de plasma desde 1988, en la que actualmente es líder en América Latina, a través de la hoy denominada Unidad de Equipos Mecánicos. La reparación, rehabilitación y extensión de vida útil de componentes de turbo maquinaria que llevan a cabo los especialistas del IIE han permitido ahorros significativos a la Comisión Federal de Electricidad (CFE), así como a Petróleos Mexicanos (PEMEX) y otras industrias que utilizan equipos rotatorios. [1]

La tabla 1.4. nos muestra que son cerca de 6,262 empresas en las que se puede aplicar la técnica de recubrimiento por Rociado de Plasma en México, dichas empresas están separadas por la rama manufacturera a la que pertenecen.

División	Número de empresas
Ind. de transformación metales	1194
Ind. de Papel	1247
Ind. Textil	3005
Ind. Producción productos metálicos	791
Ind. Automotriz	25

Tabla 1.4 Empresas Manufactureras en México

Como se muestra en la tabla 1.4 el área de aplicación en México es muy amplia. Con esta tecnología se pueden recuperar piezas a un costo inferior en un 75 a 90% al que representa comprar refacciones nuevas; además, la recuperación normalmente se hace en un tiempo menor al que implicaría la sustitución del componente por parte del fabricante, lo que aumenta la disponibilidad del equipo. [1] Esto obviamente disminuye considerablemente los costos de inversión, mantenimiento (correctivo y preventivo), incrementando la productividad y las utilidades de las empresas que lo apliquen.

1.3 JUSTIFICACIÓN

Los recubrimientos, han sido utilizados industrialmente para aumentar la vida útil de muchos productos, por ejemplo, herramientas de corte, piñones, rodamientos y componentes de maquinaria. Las aplicaciones de estos materiales incluyen recubrimientos anticorrosivos, barreras térmicas, recubrimientos ópticos, recubrimientos biomédicos, y aún recubrimientos decorativos.

Muchas industrias han notado que se pueden realizar grandes ahorros utilizando recubrimientos para mejorar las propiedades superficiales de los materiales para producir mejores herramientas y productos. Estos ahorros provienen de la productividad incrementada, reducción del tiempo de manufactura, mejoramiento de la calidad, eliminación de costos de garantía y eliminación de desechos.[2]

Por ejemplo: Las turbinas y sus componentes están sometidas continuamente a grandes esfuerzos, a la erosión y corrosión producidas por el trabajo. Tarde o temprano, piezas como álabes móviles, diafragmas, carcazas y rotores presentan desgaste o daños por el uso - y en ocasiones como consecuencia de un diseño, montaje o manufactura deficiente- lo que provoca pérdidas sustanciales en la eficiencia de la turbina.

En general, los fabricantes no suelen reparar piezas dañadas y lo que ofrecen es sustituirlas, lo que representa una fuerte erogación para el cliente. De ahí que en las últimas décadas en varios países se hayan desarrollado tecnologías de reparación y rehabilitación de componentes. [1]

Por todo lo anterior el recubrimiento por plasma es la técnica con mayor ventajas competitivas tanto económicas (mediano plazo), ecológicas, como de aplicación. Una vez justificada la importancia del recubrimiento por rociado de plasma, doy lugar a la importancia del chorro de plasma tema central de la presente tesis.

1.3.1 IMPORTANCIA DEL ESTUDIO DE CHORROS DE PLASMA

El creciente interés de la industria en utilizar nuevos métodos de recubrimiento que ofrezcan mayores y mejores resultados ha llevado a realizar diversos estudios en recubrimientos por rociado de plasma. En dichos estudios se ha concluido que existen más de 50 parámetros interrelacionados lo que hace difícil encontrar condiciones óptimas para el recubrimiento. [3]

Calidad del recubrimiento por Rociado de Plasma

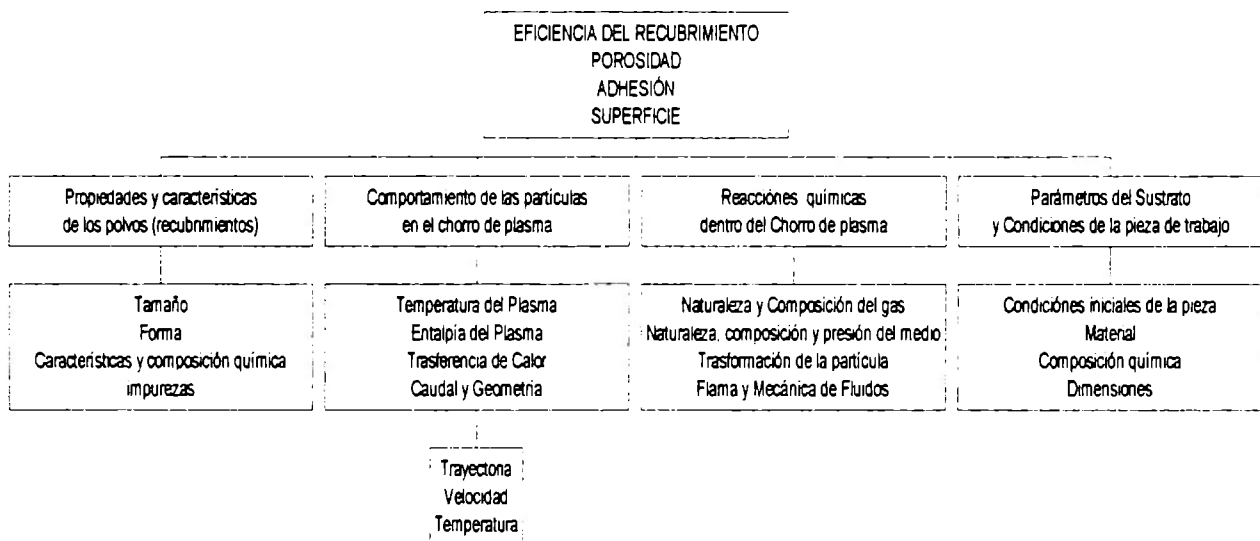


Fig. 1.2 Factores de los que depende la calidad del recubrimiento.

La figura 1.2 es un esquema de los parámetros más importantes y que influyen de manera directa en la calidad del recubrimiento por rociado de plasma. Además dentro de la misma figura se muestra la dependencia con otros parámetros y la fase dentro de la que se involucran.

El factor más relevante en el recubrimiento de materiales por la técnica de rociado de plasma es el Chorro o Jet de plasma ya que éste es el que influye directamente en la calidad y eficiencia del recubrimiento generado.

Como nos muestra la figura anterior controlar el jet o chorro de plasma para lograr un recubrimiento ideal depende de diversos parámetros, como son: temperatura, velocidad, tipo de gas, caudal másico, voltaje, presión, corriente, diámetro de la boquilla, tipo de boquilla, etc.

El chorro de plasma puede ser alterado dependiendo del tipo de gas utilizado para producir el plasma, de la cantidad de gas utilizado (caudal másico), y de la temperatura que alcance el chorro, siendo este último determinante en la calidad del recubrimiento. Si el chorro alcanza temperaturas mayores a la temperatura de fusión del polvo inyectado, este último se funde dentro del chorro y se proyecta contra el sustrato logrando con esto un mejor recubrimiento. Si por el contrario el polvo inyectado no lograra fundirse dentro del chorro, estos chocarían contra el sustrato y caerían, logrando con ello desperdicio de consumibles y un mal recubrimiento.

Si el chorro tiene el flujo suficiente de partículas, lograríamos un chorro estable, si por el contrario no se cuenta con el flujo másico suficiente el chorro encendería en algún momento pero no garantizaría estar encendida durante el proceso de recubrimiento.

En México como se mencionó con anterioridad, esta técnica no es muy utilizada, por lo que el realizar estudios de esta índole nos beneficia, en aspectos ecológicos, económicos y tecnológicos.

Existe evidencia de que la homogeneización y la calidad del Recubrimiento por Rociado de Plasma, depende en gran medida de la capacidad de reproducir el chorro de plasma. Pero aún no se ha logrado reproducir fielmente un chorro de plasma, esto debido a información (física del fenómeno) incompleta, o a la ineficiencia de la industria del plasma en la actualidad. Por ejemplo; la industria aeroespacial rechaza aspas de turbinas ya recubiertas, debido a un inadecuado control de los parámetros, y esto en otras palabras se reduce a grandes pérdidas económicas [8]. En general, casos como éste no se deben única y exclusivamente al comportamiento del chorro de plasma, pero sí dependen en gran medida del comportamiento de éste.

Por todo lo anterior surge la necesidad de realizar estudios en México sobre esta técnica de Recubrimiento, y en especial sobre el análisis del chorro de plasma, para lograr con ello que los costos de inversión, capacitación y por consiguiente de servicio disminuyan, y las empresas sean más rentables y más productivas.

1.4 OBJETIVO DE LA TESIS

Aclarada la importancia de realizar estudios sobre los recubrimientos superficiales en México, en específico sobre el recubrimiento por rociado de plasma y particularmente el análisis del chorro de plasma se propone el siguiente objetivo:

DESARROLLAR UN MODELO TEÓRICO Y SIMULACIÓN CFD DE LOS CHORROS DE PLASMA EN EL PROCESO DE RECUBRIMIENTO METÁLICO.

1.5 ORGANIZACIÓN DE LA TESIS

La presente tesis está orientada hacia el modelo teórico y simulación de los chorros de plasma, por lo que durante el presente capítulo me he permitido desarrollar la problemática existente y justificar la importancia del tema, así como dar un preámbulo general sobre el campo de los recubrimientos. El desarrollo del capítulo dos es la base del marco teórico, parto de principios básicos de mecánica de fluidos, termodinámica y combustión, para continuar en el capítulo Tres el desarrollo del **Modelo Teórico del Chorro de Plasma**.

Dentro del capítulo cuatro que he titulado simulación de fluidos dinámicos en computadora, me enfoco a realizar la simulación CFD del chorro de plasma apoyándome en el programa computacional FLUENT. Utilizando el modelo teórico desarrollado durante el capítulo tres, y los parámetros que influyen en el comportamiento del chorro de plasma, seleccionados y justificados durante este capítulo. Las conclusiones, análisis y comparación de resultados teóricos y de simulación son parte del quinto y último capítulo de la presente tesis.

2 CAPÍTULO DOS: MARCO TEÓRICO

El análisis ingenieril de un flujo, los conceptos de termodinámica y los de mecánica de fluidos son igualmente importantes, propiedades como la temperatura, la presión, la velocidad, el volumen, la masa, la entalpía o la entropía, son propiedades que definen e influyen directamente en el comportamiento del flujo. El conocimiento y la comprensión de los principios y conceptos básicos de los fluidos son esenciales para analizar el Chorro de Plasma, o cualquier sistema en el cual un fluido sea el medio de trabajo.

Durante este capítulo de la Tesis se tomará la parte teórica de la Termodinámica, la Mecánica de Fluidos y Combustión, que como se ha hecho referencia son la base para el desarrollo integral de la presente Tesis. Desde luego, no pretendo abarcar a detalle estas tres grandes áreas, mi propósito es presentar propiedades, leyes básicas y conceptos relacionados, que puedan proporcionar las bases o el punto de partida en el análisis de los Chorros de Plasma en el Recubrimientos de Rociado por Plasma.

2.1 CONCEPTOS GENERALES SOBRE FLUIDOS.

Desde el punto de vista de la Mecánica de Fluidos, la materia sólo puede presentarse en dos estados: sólido y fluido. La distinción radica en la reacción de ambos a un esfuerzo tangencial o cortante. Un sólido puede resistir un esfuerzo cortante con una deformación estática; un fluido no. Cualquier esfuerzo cortante aplicado a un fluido, no importa cuán pequeño sea provocará el movimiento del fluido. Éste se mueve y se deforma continuamente mientras se siga aplicando el esfuerzo cortante.

Para la realización de la presente tesis, la materia en forma de fluido capta mayor atención debido a que el gas \rightarrow plasma, son considerados fluidos.

En cualquier masa finita de fluido, existe una infinidad de partículas. Cada partícula se puede caracterizar por su densidad, volumen, presión, temperatura y otras propiedades.

Existen dos tipos de fluidos: Líquidos y Gases. La distinción entre estos concierne al efecto de las fuerzas cohesivas entre sus moléculas, y para fines de la presente tesis los gases y sus propiedades son de mayor atención.

Un gas ideal es aquel gas cuyas partículas se encuentran separadas de tal forma que el comportamiento de una molécula no se vea afectado por la presencia de otra molécula. Además de ser una sustancia simple compresible, por lo que su ecuación de estado se define como: [5]

$$p v = RT \quad (2.1)$$

La relación entre la presión (p), el volumen (v) y la temperatura es conocida como la ley de Boyle Mariot, que enuncia que si se varia la presión y el volumen de un gas mientras se mantiene la temperatura constante de un gas, el producto (pv) permanece constante. La constante (R) es definida como una constante específica del gas y se puede obtener de la siguiente ecuación:

$$c_p - c_v = R \quad (2.2)$$

donde c_p y c_v son los calores específicos a presión y volumen constante respectivamente. Ver ecuaciones (2.10) y (2.11).

Para el caso de un gas real, se sabe que existen fuerzas intermoleculares, pero a baja presión o altas temperaturas (respecto a su punto crítico) se aproximan al comportamiento del gas ideal. Por lo que su ecuación de estado se define como:

$$p v = ZRT \quad (2.3)$$

donde Z es el factor de compresibilidad, y su valor depende del gas que se trate.

2.1.1 PROPIEDADES TERMODINÁMICAS DE FLUIDOS

A continuación defino propiedades termodinámicas importantes de los fluidos, que se determinan por el estado del fluido o por la condición termodinámica

Densidad (ρ): La densidad de un fluido es su masa por unidad de volumen. La densidad tiene un valor en cada punto dentro de un continuo y puede variar de un punto a otro.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (2.4)$$

Las unidades de la densidad son el resultado del cociente de unidad de masa entre unidad de volumen ejemplo g/cm^3 o Kg/m^3 .

Presión (P): La presión es la fuerza compresiva normal por unidad de área, que actúa sobre una superficie real o imaginaria de un fluido. Las unidades son N/m^2 o Pa .

$$P = \frac{F}{A} \quad (2.5)$$

Temperatura (T): El calor frecuentemente se define como el flujo de energía debido a una diferencia de temperaturas, pero para nuestros propósitos se define a la temperatura de un fluido como una medida de la energía contenida en los movimientos moleculares del fluido. Se mide en grados centígrados (C°), grados kelvin (K) y grados fahrenheit (F°).

Energía interna (\hat{u}): La única energía asociada a una sustancia es la almacenada en el sistema por actividad molecular y las fuerzas debidas a enlaces químicos. A ésta se le denomina energía interna. En los flujos, a esta energía se le debe añadir la energía cinética y la energía potencial. Por ello la energía interna por unidad de masa (e) se describe en la siguiente ecuación:

$$e = \hat{u} + \frac{1}{2}V^2 + (-g \cdot r) \quad (2.6)$$

Energía interna específica (\tilde{u}): Indica la energía contenida en los movimientos moleculares al azar y las fuerzas intermoleculares, por unidad de masa. Sus unidades son $\left[\frac{kJ}{kgK} \right]$.

Entalpía: La entalpía es una propiedad muy importante en el análisis de los fluidos compresibles, debido al acoplamiento entre las formas mecánica y térmica de energía. La relación entre energía interna o entalpía de un fluido y la temperatura del mismo se expresa en función del calor específico.

$$h \equiv \hat{u} + \frac{P}{\rho} \quad (2.7)$$

sus unidades están dadas en $\left[\frac{kJ}{kgK} \right]$.

Entropía (S): La segunda ley de la Termodinámica implica la existencia de una propiedad conocida como entropía, que se refiere a que la integral de $\delta Q/T$ tiene el mismo valor para cualquier proceso interno reversible entre dos estados. La ecuación que mejor lo define es:

$$dS = \left(\frac{\delta Q}{T} \right) \quad (2.8)$$

sus unidades están expresadas en $\left[\frac{kJ}{K}\right]$.

Calor Específico: El calor específico es la cantidad de calor necesaria para elevar un grado la temperatura por unidad de masa. Los calores específicos importantes son: Calor específico a volumen constante (c_v) y el calor específico a presión constante (c_p) los cuales se definen a continuación:

$$c = \frac{Q}{m\Delta T} \quad (2.9)$$

donde (Q) es calor, (m) es masa y (T) temperatura.

$$c_v = \left. \frac{\partial \bar{u}}{\partial T} \right|_v \quad (2.10)$$

$$c_p \equiv \left. \frac{\partial \tilde{h}}{\partial T} \right|_p \quad (2.11)$$

las unidades para el calor específico son $\left[\frac{kJ}{K}\right]$.

Las magnitudes tales como la temperatura, presión, densidad son variables termodinámicas primarias características de todo sistema. Existen además otras magnitudes secundarias que caracterizan el comportamiento específico de cada fluido. La más importante de éstas es la viscosidad, que relaciona el esfuerzo o tensión local en un fluido en movimiento con la velocidad de deformación de las partículas fluidas.

Viscosidad (μ): Cuando un fluido es sometido a esfuerzos cortantes comienza a moverse con una velocidad de deformación inversamente proporcional a una propiedad denominada coeficiente de viscosidad μ .

La temperatura tiene un efecto considerable sobre la viscosidad, en los gases aumenta con la temperatura. Existen dos aproximaciones para describir esta variación:

$$\frac{\mu}{\mu_0} \approx \begin{cases} \left(\frac{T}{T_0}\right)^n \\ \frac{(T/T_0)^{3/2}(T_0 + S)}{T + S} \end{cases} \quad (2.12)$$

donde μ_0 es la viscosidad conocida a una temperatura absoluta de referencia T_0 , n y S son constantes.

Conductividad Térmica (k): Relaciona el vector flujo de calor por unidad de área “ q ” con el vector gradiente de temperatura ∇T . Esta proporcionalidad, observada experimentalmente para fluidos, es conocida como la Ley de Fourier de la conducción de calor.

$$q = -k\nabla T \quad (2.13)$$

Es posible realizar una clasificación de los tipos de flujos, aunque no exista un acuerdo general, la mayor parte de las clasificaciones se hacen con base en las siguientes características: estacionario, no estacionario, viscoso, no viscoso, compresible, no compresible. También se diferencia entre un flujo líquido o uno gaseoso, pero como se mencionó anteriormente los gases son de mayor interés para el desarrollo de la tesis.

1. **Flujo estacionario y no estacionario**, se asocia estrechamente con la dimensionalidad, ya que trata una de las variables independientes (tiempo). Un *flujo es estacionario* si la velocidad y otras propiedades en todos los puntos del campo no varían con el tiempo. Un *flujo es no estacionario* si en cualquier punto la velocidad u otras propiedades varían con el tiempo.

Flujo laminar. En el flujo laminar, el gradiente de velocidad no es cero, el perfil de velocidad es una curva de forma suave y el fluido se mueve a lo largo de líneas de corriente de aspecto alisado. El flujo se denomina laminar porque parece como una serie de capas delgadas de fluido (láminas) que se deslizan una sobre otra.

Flujo turbulento. El flujo laminar contrasta fuertemente con el movimiento desordenado de un fluido en lo que se denomina flujo turbulento. El flujo turbulento se caracteriza por fluctuaciones al azar en la velocidad del fluido y por un mezclado intenso. (Ver apartado 2.3.2)

2. **Flujo compresible** En muchas aplicaciones interesantes de la ingeniería los gases se mueven a velocidades altas y se produce cambios de densidad apreciables. Estos flujos se conocen como flujos compresibles.

La relación de la velocidad de una corriente de fluido C , en un estado cualquiera respecto a la velocidad del sonido c , es denominada Número de Mach (Ma):

$$Ma = \frac{C}{c} \quad (2.14)$$

- a. *Flujo supersónico*, cuando $(Ma) > 1$,
- b. *Flujo subsónico*, cuando $(Ma) < 1$,
- c. *Flujo sónico*, cuando $(Ma) = 1$,

- d. *Flujo hipersónico* se utiliza para flujos con $Ma \ll 1$ y
 e. *Flujo transónico* cuando $Ma \approx 1$.

3. **Flujo Viscoso** (μ) Para muchos fluidos comunes el esfuerzo cortante es proporcional a la velocidad de deformación. La constante de proporcionalidad, denominada viscosidad es una propiedad de los fluidos. Para encontrar la ecuación que defina a la viscosidad, primero se debe obtener la velocidad de deformación. Esto se hace considerando un flujo en el cual la velocidad en la dirección x del fluido varía con y , tal como se muestra en la figura 2.2.

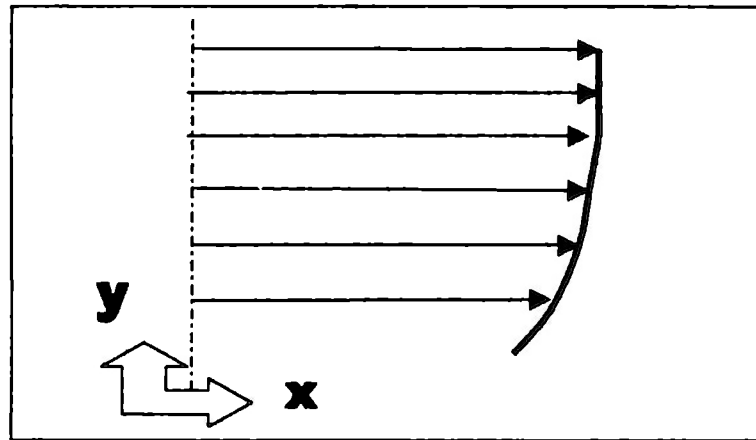


Fig. 2.1 Variación típica de la velocidad de un fluido

Si el esfuerzo cortante (τ) en el fluido es proporcional a la velocidad de deformación, se puede decir que:

$$\tau = \mu \frac{\partial u}{\partial y} \quad (2.15)$$

La ecuación de continuidad que describe la variación de la densidad para un punto fijo, como consecuencia de las variaciones del vector de velocidad másica, establece que la velocidad con que aumenta la densidad en el interior de un pequeño elemento de volumen fijo en el espacio, es igual a la velocidad neta de entrada de densidad de flujo de materia en el elemento dividida por su volumen.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = - \left(\frac{\partial}{\partial x} \rho v_x + \frac{\partial}{\partial y} \rho v_y + \frac{\partial}{\partial z} \rho v_z \right) \quad (2.16)$$

Los fluidos que siguen la ley de la ecuación (2.15), se denominan flujos Newtonianos. La ecuación general de movimiento para un flujo newtoniano que presenta variación de la densidad y la viscosidad es:

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho v = -[\nabla \cdot \rho v v] - \nabla p - [\nabla \cdot \tau] + \rho g \quad (2.17)$$

donde (τ) es el tensor de esfuerzos, (g) la constante de aceleración gravitacional.

Cuando la densidad y la viscosidad son constantes la ecuación anterior se simplifica obteniendo la ecuación de Navier-Stokes:

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = -\nabla p + \mu \nabla^2 v + \rho g \quad (2.18)$$

$$\text{donde: } \rho \frac{Dv}{Dt} = \frac{\partial \rho}{\partial t} + v_x \frac{\partial \rho}{\partial x} + v_y \frac{\partial \rho}{\partial y} + v_z \frac{\partial \rho}{\partial z},$$

Cuando los efectos viscosos son poco importantes, la ecuación 2.17 se convierte en la ecuación de Euler:

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = -\nabla p + \rho g \quad (2.19)$$

2.2 COMBUSTIÓN Y REACCIONES QUÍMICAS

Cuando tiene lugar una reacción química, los enlaces de las moléculas de los reactivos se rompen, y los átomos y electrones se reagrupan para formar los productos. En las reacciones de combustión, la oxidación rápida de los elementos reactivos del combustible trae como consecuencia la liberación de energía al formarse los productos de la combustión.

Al considerar reacciones químicas hay que recordar que la masa se conserva, de manera que la masa de los productos es igual a la de los reactivos. La masa total de cada elemento químico debe ser igual en ambos lados de la ecuación, aunque los elementos existan en compuestos químicos diferentes en reactivos y productos. Sin embargo, el número de moles de los productos puede ser distinto del de los reactivos.

La combustión por su parte es el resultado de una serie de reacciones químicas muy complicadas y rápidas, y los productos que se forman depende de muchos factores. En cualquier equipo de combustión, el grado de mezcla de aire y combustible es una forma de control de las reacciones que tienen lugar una vez encendida la mezcla de aire y combustible.

2.2.1 CONCEPTOS GENERALES DE LA COMBUSTIÓN

Con el nombre de combustibles se designan las sustancias utilizadas para obtener calor. Según sea el estado de estas sustancias, los combustibles se clasifican en sólidos, líquidos y gaseosos. (Centraré mi atención a los combustibles gaseosos dentro del apartado 2.2.1.1.)

En ocasiones es muy útil estudiar la combustión de un combustible con la suposición de que la combustión es completa. Un proceso de combustión es completo si todo el carbono en el combustible se transforma en CO_2 , todo el hidrógeno se transforma en H_2O , y todo el azufre (si lo hay) se transforma en SO_2 . Todos los componentes combustibles del combustible se queman por completo durante un proceso de combustión completa. En sentido inverso, un proceso de combustión es incompleto si los productos de combustión contienen cualquier combustible o componente no quemado, como C, H_2 , CO u OH.

La cantidad mínima de aire necesaria para la combustión completa de un combustible recibe el nombre de aire estequiométrico o aire teórico. De manera que cuando un combustible se quema por completo con aire teórico, no estará presente oxígeno no combinado en el producto de gases. El aire teórico, también se conoce como cantidad de aire químicamente correcta, o aire 100 por ciento teórico. Un proceso de combustión con menos cantidad de aire teórico está condenado a ser incompleto.

Entre los aparatos para la determinación experimental de la composición de los productos de la combustión están el analizador Orsat, el cromatógrafo de gases, el analizador por infrarrojos y el detector de ionización de llama.

Durante una reacción química se rompen algunos de los enlaces químicos que unen a los átomos en las moléculas, y se forma nuevos compuestos. En general, la energía química asociada a estos enlaces, es diferente para los reactivos y los productos. Por tanto, un proceso que implica reacciones químicas implicará cambios en las energías químicas, los cuales deben tomarse en cuenta en un balance de energía.

Si se supone que los átomos de cada reactivo permanecen intactos y se ignora cualquier cambio en las energías cinética y potencial, el cambio de energía de un sistema durante una reacción química se deberá a un cambio en el estado y a un cambio en la composición química. Es decir:

$$\Delta E_{sis} = \Delta E_{estado} + \Delta E_{quim} \quad (2.20)$$

Por consiguiente, cuando los productos formados durante una reacción química salen de la cámara de reacción en el estado de entrada de los reactivos, se tiene $\Delta E_{estado} = 0$ y, en este caso, el cambio de energía del sistema se debe sólo a los cambios en su composición química.

2.2.1.1 Combustibles Gaseosos

Los combustibles gaseosos se clasifican, según normas internacionales en familias de acuerdo con la propiedad característica denominada índice de Wobbe, que se define por:

$$W_s = \frac{H_s}{\sqrt{d}} \quad (2.21)$$

Siendo H_s , el poder calorífico superior y d la densidad relativa del aire. Alternativamente, puede definirse a W_i , tomando el poder calorífico inferior, H_i en lugar de H_s .

En la tabla 2.1 se muestra la clasificación internacional de los gases combustibles, la tercer familia comprende los gases licuados del petróleo (GLP) como propano, butano, etc.

FAMILIA	DENOMINACIÓN	VALOR DE W
Primera	Gases manufacturados	23.8 - 31.4
Grupo (a)	Gas ciudad	23.8 - 28.1
Grupo (b)	Gas de coquería	25.9 - 31.4
Grupo (c)	Hidrocarburos-aire	23.8 - 27.2
Segunda	Gases Naturales	41.2 - 58.0
Grupo H	De alto índice de Wobbe	48.1 - 58.0
Grupo L	De bajo índice de Wobbe	41.2 - 47.3
Tercera	Gases Licuados de petróleo	77.4 - 92.4

Tabla 2.1 Clasificación de Gases Combustibles

La determinación de las propiedades características de un gas combustible se realiza fácilmente a partir de su composición molar. En las aplicaciones técnicas se obtiene suficiente precisión suponiendo que los gases se comportan como gases ideales. Según esto, el poder calorífico de una mezcla de gases se calcula por la siguiente fórmula, donde x_j la fracción molar (volumétrica) del componente j y H_j su poder calorífico en MJ/m^3 (n).

$$H_m = \sum H_j \cdot x_j \quad (2.22)$$

En algunas aplicaciones, se requiere mayor precisión, y entonces puede recurrirse a métodos como el de la Norma ISO-6976-19. Para ello, el poder calorífico de la mezcla de gases (H_m), se divide por el factor de compresibilidad de la mezcla (z_m) y se calcula con la siguiente fórmula :

$$z_m = 1 - \left(\sum x_j \cdot \bar{b}_j \right)^2 + 0.0005(2x_H - x_H^2) \quad (2.23)$$

En la tabla 2.2 se muestra los valores de la densidad relativa, poder calorífico superior e inferior, factor de compresibilidad y factor de corrección \sqrt{b} para gases usuales.

COMPONENTE		d -	H _s Mj/m ³	H _i Mj/m ³	Z -	\sqrt{b} -
FORMULA	NOMBRE					
H ₂	Hidrógeno	0.0696	12.789	10.779	1.0006	-
N ₂	Nitrógeno	0.9672			0.9995	0.0224
O ₂	Oxígeno	1.1048			0.9990	0.0316
--	Aire	1.00			0.99941	--

Tabla 2.2 Valores de Gases según ISO-6976-19

2.2.2 TERMODINÁMICA DE LA COMBUSTIÓN

La termodinámica se interesa en los cambios en la energía de un sistema durante un proceso, y no en los valores de energía en los estados particulares. Por tanto, se puede elegir cualquier estado como el estado de referencia y asignar un valor de cero a la energía interna o entalpía de una sustancia en ese estado. Cuando un proceso no implica cambios en la composición química, el estado de referencia elegido no tiene efecto en los resultados. Sin embargo, cuando los procesos implican reacciones químicas, la composición del sistema al final de un proceso ya no es el mismo que al principio del proceso. En este caso es necesario tener un estado de referencia común para todas las sustancias, el cual se conoce como estado de referencia estándar. Los valores de las propiedades en el estado de referencia estándar se indica mediante un superíndice "0", (como h^0 y u^0).

Si tanto los reactivos como los productos están en el mismo estado, el cambio de entalpía durante este proceso se debe sólo a los cambios en la composición química del sistema. Este cambio de entalpía será distinta para diferentes reacciones, y sería deseable tener una propiedad que representara los cambios en la energía química durante una reacción. Esta propiedad es la entalpía de reacción (h_R), la cual se define como la diferencia entre la entalpía de los productos en un estado especificado y la entalpía de los reactivos en el mismo estado para una reacción completa.

En los procesos de combustión la entalpía de reacción suele conocerse como la entalpía de combustión (h_c), la cual representa la cantidad de calor liberada durante un proceso de combustión de flujo permanente cuando 1 Kmol de combustible se quema por completo a una temperatura y presión específica. Se expresa como:

$$Q - W = h_{prod} - h_{react} \quad (2.24)$$

194320

BIBLIOTECA

$$h_{prod} = \sum N_p (\bar{h}_f^0 + \bar{h} - \bar{h}^0)$$

$$h_{react} = \sum N_r (\bar{h}_f^0 + \bar{h} - \bar{h}^0)$$

sus unidades son $\left[\frac{kJ}{kmol} \right]$.

donde Q y W son las interacciones de calor y trabajo por mol de combustible.

La entalpía de combustión es una propiedad muy útil en el análisis de los procesos de combustión de combustibles; sin embargo, hay tantos y diferentes combustibles y mezclas de combustibles que no es práctico hacer cálculos para cada uno de ellos. Además, la entalpía de combustión no es muy útil cuando la combustión es incompleta. Así un planteamiento más práctico sería tener una propiedad fundamental para representar la energía química de un elemento o un compuesto en algún estado de referencia. Esta propiedad es la entalpía de formación \bar{h}_f , la cual puede considerarse como la entalpía de una sustancia en un estado especificado debido a su composición química.

Otro término empleado en conjunción con la combustión de combustibles es el valor calorífico del combustible, que se define como la cantidad de energía liberada cuando un combustible se quema por completo en un proceso de flujo permanente y los productos vuelven al estado de reactivos. En otras palabras, el valor calorífico de un combustible es igual al valor absoluto de la entalpía de combustión de combustible. Es decir:

$$\text{Valor calorífico} = |h_c| \quad (kJ / kg \text{ combustible}) \quad (2.25)$$

Cuando los cambios en las energías cinética y potencial son despreciables la relación de la conservación de la energía para un sistema de flujo permanente químicamente reactivo puede expresarse como:

$$Q - W = \sum N_p (\bar{h}_f^0 + \bar{h} - \bar{h}^0)_p - \sum N_r (\bar{h}_f^0 + \bar{h} - \bar{h}^0)_r \quad (kJ / kmol) \quad (2.26)$$

N_p y N_r , representan el número de moles del producto p y del reactivo r , respectivamente.

En ausencia de cualquier interacción de trabajo y cualesquiera cambios en las energías cinética y potencial, la energía química liberada durante un proceso de combustión se pierde como calor hacia los alrededores o se usa internamente para elevar la temperatura de los productos de combustión. Cuanto más pequeño es la pérdida de calor, tanto mayor resulta el aumento de temperatura. En el caso límite de no pérdida de calor hacia los alrededores ($Q=0$), la temperatura de los productos alcanzará un máximo, conocido como Temperatura de flama adiabática o de combustión adiabática de la reacción.

La temperatura de flama adiabática de un proceso de combustión de flujo permanente se determina de la ecuación (2.11) fijando $Q=0$ y $W=0$. Esto produce

$$\sum N_p (\bar{h}_f^0 + \bar{h} - \bar{h}^0) = \sum N_r (\bar{h}_f^0 + \bar{h} - \bar{h}^0) \quad (2.27)$$

Advierta que la temperatura de flama adiabática de un combustible no es única. Su valor depende del estado de los reactivos, el grado al que se completa la reacción y la cantidad de aire utilizado. Para un combustible especificado a un estado especificado, que se quema con aire a un estado especificado, la temperatura de flama adiabática alcanza su valor máximo cuando sucede la combustión completa con la cantidad de aire teórica.

2.2.3 PROPIEDADES DE LOS CHORROS

La flama es la zona o región en la que tiene lugar la reacción de combustión entre el gas combustible y el gas comburente.

Como esta reacción va acompañada de desarrollo de calor, los gases producidos adquieren temperaturas elevadas, con los que emiten radiación en parte luminosa. De ahí que una de las acepciones de la flama es precisamente la masa de gases incandescentes producidos por la combustión.

En el caso de los jet o chorros el gas adquiere temperaturas muy elevadas (arriba de 12 000 K), con lo que se emite de igual forma que en las flamas radiación luminosa y calor.

Existe una diferencia clave entre un chorro y una flama, al referirnos a la flama existe combustión en el proceso de ignición, mientras que en el chorro o jet no hay combustión. Para el estudio del chorro de plasma tomaré en cuenta el panorama general de las flamas y sus características sin perder de vista las características que esencialmente los diferencian.

Existen dos tipos de flamas: de Premezcla y flamas de Difusión (No premezclados), y dependen del grado de mezclado en los reactivos, en las flamas de Premezcla como su nombre lo indica, el combustible se aporta mezclado con mayor o menor cantidad de aire, que se designa como aire primario. La característica específica de la flama de difusión es que la velocidad de combustión está determinada por la velocidad de la mezcla.

A diferencia de las flamas de premezcla, en las que el combustible y el oxidante se mezclan antes de llegar a la zona de la flama, existen sistemas en los que la fase de mezcla es lenta comparada con la velocidad de la reacción con lo que el proceso es la etapa controlante. Se desarrollan así las llamadas flamas difusas, en las que el combustible puede ser gas o una fase condensada y el oxidante puede ser un gas fluyente o una atmósfera en reposo. La característica específica de las flamas de difusión es que la velocidad de combustión está determinada por la velocidad de la mezcla.

2.2.3.1 Temperatura de Auto inflamación, energía mínima de inflamación y distancia de extinción.

La energía mínima de inflamación es la que hay que aportar a una mezcla inflamable para que tenga lugar el fenómeno. Depende de la porción de mezcla gas aire y del contenido de oxígeno. La energía mínima corresponde, naturalmente, a las porciones estequiométricas.

En las proximidades de grandes masas sólidas, no pueden tener lugar las reacciones de combustión, porque aquellas absorben y conducen el calor de las llamas, con lo que se interrumpen las reacciones en cadena. La distancia desde la pared a la que se deja sentir ese efecto se conoce como distancia de extinción y su valor para todos los gases combustibles es del orden de 0.5 mm.

2.2.3.2 Velocidad de Propagación

La velocidad de la flama ha sido objeto de estudio experimental durante los últimos años, en donde se han utilizado métodos como: Llamas cónicas estacionarias en tubos cilíndricos, Flamas dentro de tubos, Método de la burbuja de jabón, Explosión a volumen constante en recipiente esférico y método de flama plana. [4]

Para estudiar teóricamente la velocidad de la flama se puede utilizar el modelo de Mallard Le Chatelier (ver fig. 2.2). En él se establece que el calor necesario para alcanzar la temperatura de ignición T_i , en la frontera de I y II viene aportado por la zona II:

$$m c_p (T_i - T_0) = k \frac{T_f - T_i}{\delta} A \quad (2.28)$$

como $m = \rho \cdot A \cdot u_L$, siendo u_L la velocidad de la flama. Se deduce que: $\delta \approx \frac{\alpha}{u_L}$; siendo α la difusión térmica $\frac{k}{\rho c_p}$.

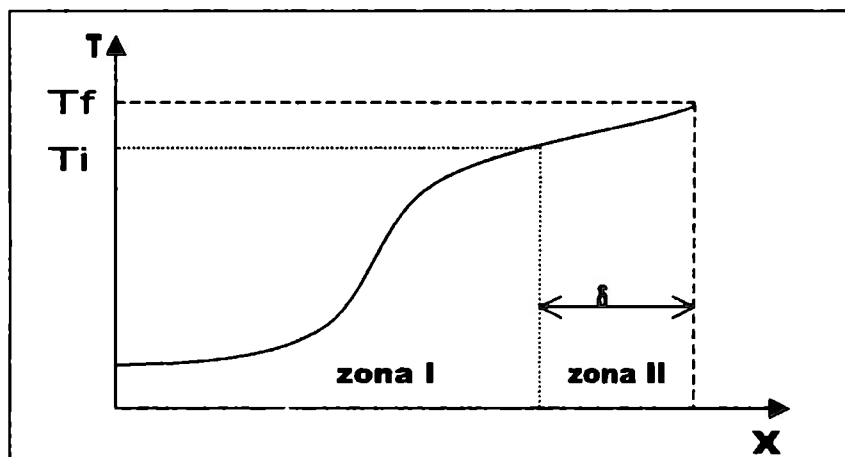


Fig. 2.2 Modelo de Mallard y Le Chatelier.

El efecto de la temperatura es doble, ya que tiene influencia en la velocidad de reacción (energía de activación) y en la difusión, la cual altera proporcionalmente a T .

El efecto de presión sobre la velocidad de propagación es $u_L \approx p^{n-2}$, siendo n el orden global de reacción.

Para las flamas abiertas, la variación de u_T , con la composición es muy similar a la de u_L y tiene un máximo próximo al estequiométrico. Por ejemplo:

$$\frac{u_T}{u_L} = 0.18d^{0.26} \text{Re}^{0.24} \quad (2.29)$$

siendo d el diámetro de la boca de salida (la boquilla).

2.2.3.3 Límites de Inflamabilidad

No todas las porciones de aire-combustible son adecuadas para la combustión. Para cada combustible existen unos límites de inflamabilidad, el inferior y el superior, fuera de los cuales la combustión no es posible.

Los límites para mezclas o algunos gases se puede calcular mediante la regla de Le Chatelier:

$$L_m = \frac{1}{\sum \frac{x_j}{L_j}} \quad (2.30)$$

donde L_m es el límite (inferior o superior) de la mezcla, L_j el límite (superior o inferior) de inflamabilidad, y x_j la fracción molar del componente j .

2.2.3.4 Forma y Longitud de la Flama y los Chorros

En las flamas de premezcla se observa un cono interno, cuya superficie constituye el frente de la flama, en el que tiene lugar la reacción del aire primario con la parte de combustible correspondiente; si la premezcla es total, la reacción acaba ahí, pero en caso contrario, el resto de combustible sigue quemando en el llamado cono externo, tomando aire del exterior por difusión.

En general el cono interno tiene color azul, de ahí su nombre de cono azul, debido a la presencia de radicales OH. Pero en mezclas con poco aire la tonalidad es verde.

La longitud de la flama se calcula utilizando el cono interior. Si se tiene en cuenta que el ángulo del cono es pequeño, la condición de estabilidad esta dada por la ecuación (2.28) donde L es la altura del cono, r el radio de la boca de la salida y \bar{u} la velocidad media.

$$\frac{\bar{u}}{u_L} = \frac{L}{r} \quad (2.31)$$

con lo que:

$$L = r \frac{\bar{u}}{u_L} \quad (2.31a)$$

Otros modelos que tienen en cuenta el perfil de velocidades llegan al resultado de:

$$L = \frac{4}{3} r \frac{\bar{u}}{u_L} \quad (2.32b)$$

en la práctica se encuentran valores comprendidos entre ambos.

En cuanto a las chorros difusos, su color no será violeta o azul-verdoso, como el de las de premezcla, sino se tornará de un color amarillo brillante a rojo (anaranjado). La figura 2.3 nos ilustra un chorro difuso dentro del recubrimiento por plasma.

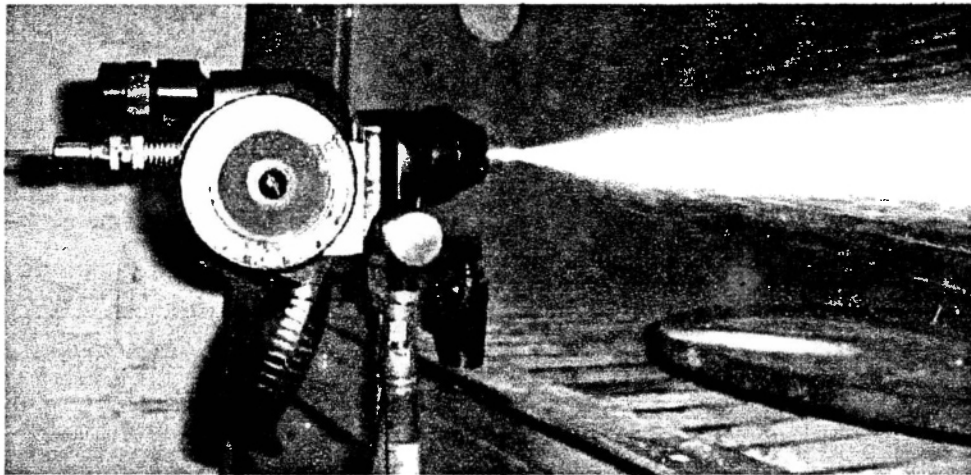


Fig. 2.3 Chorro Difuso Laminar

La forma del chorro de gas laminar depende sólo de la cantidad de aire suministrado. Si éste fluye en una corona concéntrica al chorro de gas central en exceso a la tasa estequiométrica, el jet adquiere la forma cerrada y alargada. Lo mismo sucede si el chorro descarga en una atmósfera tranquila.

En cuanto a la longitud de un chorro de difusión, ésta depende del régimen laminar o turbulento de la misma. Para el caso del régimen laminar, la longitud de llama viene dada por:

$$L_L \approx \frac{q_v}{4\pi D} \left(1 + \frac{A_{min}}{d} \right) \quad (2.32)$$

siendo A_{min} el volumen de aire mínimo, d el diámetro de la boquilla.

2.2.3.5 Estabilidad

Aunque la proporción de mezcla de gas-aire se halle dentro de los límites de inflamabilidad, no siempre se consiguen chorros estables. Si se aumenta la velocidad de la mezcla de gases, el chorro se separa de la boca de salida y puede incluso desprenderse y extinguirse. Por el contrario, disminuyéndola puede retroceder y llegar incluso a prender en el inyector.

En cuanto a los chorros turbulentos los problemas de estabilización son más complejos, ya que si bien la velocidad de propagación del chorro alcanza valores del orden de los metros por segundo, en algunos quemadores (turbo jet), las velocidades de la mezcla son del orden de 50 m/s. En esos casos la estabilidad se asegura mediante la recirculación de los productos de combustión o intercalando obstáculos.

El flujo turbulento se caracteriza por fluctuaciones al azar en la velocidad del fluido, el análisis de flujo turbulento se basa en la idea de una distribución de velocidad promedio sobre la cual se superpone las fluctuaciones turbulentas. Se considera al perfil de velocidad promedio como determinístico; esto es, reproducible para las mismas condiciones iniciales y de frontera; sin embargo, las fluctuaciones o turbulencia se tratan de manera estadística. La figura 2.4 nos ilustra un chorro supersónico turbulento, mostrándonos las fluctuaciones al azar antes mencionadas.

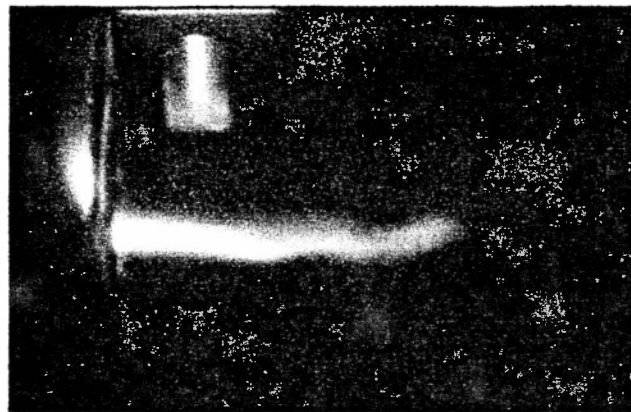


Fig. 2.4 Chorros turbulentos

2.3 COMPORTAMIENTO DE CHORROS SUPERSÓNICOS

En el estudio teórico de flamas, se distinguen diferentes mecanismos, dichos mecanismos se diferencian dependiendo de la existencia de las ondas de combustión y de la velocidad de propagación de dichas ondas, a través del reactivo. Los mecanismos posibles son 3: *la explosión, la deflagración y la detonación.*

En la explosión la generación de calor es extremadamente rápido, y no se requiere del paso de ondas de combustión a través del medio explosivo. La deflagración y la detonación pueden

definirse como procesos en los que la reacción química está soportada por ondas subsónicas en el primer caso, y supersónicas en el segundo caso. [6]

La tabla 2.3 muestra una comparación entre la detonación y la deflagración en gases.

Parámetro	DETONACIÓN	DEFLAGRACIÓN
u_1 / c_1	5 – 10	0.0001 – 0.03
u_2 / u_1	0.4 – 0.7 desaceleración	4 – 6 aceleración
p_2 / p_1	13 – 55 compresión	≈ 0.98 expansión
T_2 / T_1	8 – 21 adición de calor	4 – 16 adición de calor
ρ_2 / ρ_1	1.7 – 2.6	0.06 – 0.25

Tala 2.3 Tabla comparativo detonación, deflagración.

En este apartado estudiaremos lo referente a la detonación y las flamas Supersónicas. Que serán de ayuda para guiarnos en el comportamiento de chorros supersónicos

2.3.1 CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES

Existe dos maneras de estudiar los fenómenos de las flamas supersónicas o la detonación, el primero, el método clásico, donde se supone que el flujo es unidimensional y la onda de detonación consiste en una onda de choque que viaja a la velocidad de detonación, donde tras la onda ocurren las reacciones químicas.

La onda de choque incrementa la temperatura de los reactivos, para que estos reaccionen a rangos mayores que en la deflagración, y se propaguen a una velocidad mayor o igual a la de la onda de choque. [6]

El segundo, el método multidimensional dice que la estructura de la detonación se caracteriza por una de onda de choque principal no planar. Es decir, en cada instante de tiempo la podemos dividir en varias secciones, las cuales son curvas convexas dirigidas hacia el flujo. Las líneas de intersección de esta curva se propagan en varias direcciones con gran velocidad. Lo que nos da como resultado la detonación.

Como ya se ha mencionado, la velocidad de reacción es parte importante para diferenciar entre detonación y deflagración. La figura 2.5 nos representa la curva de Hugoniot, donde muestra varias secciones de la curva correspondientes a diversas condiciones de combustión.

La curva de Hugoniot, es una gráfica de los posibles valores de $\left(\frac{1}{\rho_2}, p_2\right)$ para los valores dados de $\left(\frac{1}{\rho_1}, p_1\right)$ y q . El punto $\left(\frac{1}{\rho_1}, p_1\right)$, es normalmente llamado Origen de la gráfica de Hugoniot y se le designa la letra *A*.

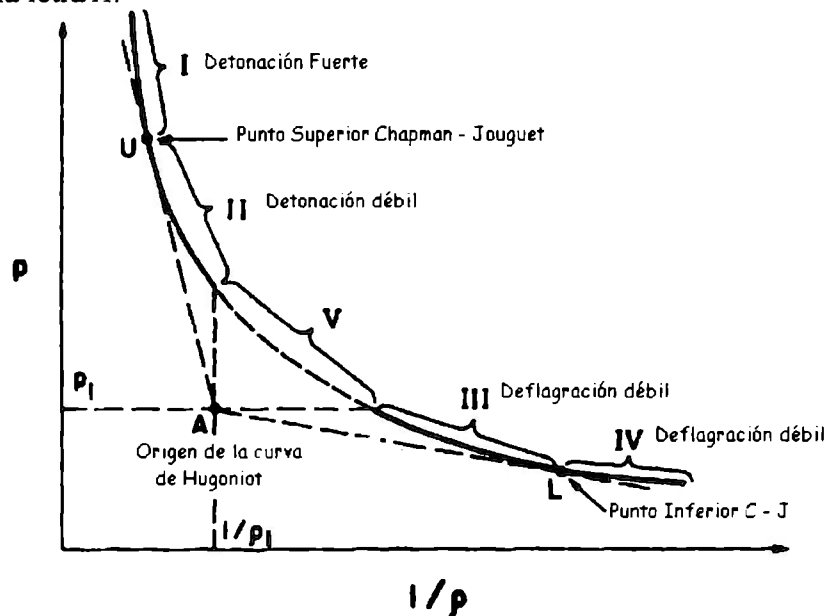


Fig. 2.5 Gráfica de Hugoniot

Debido al incremento de la velocidad (subsónica \rightarrow supersónica), los flujos tienden a presentar variaciones, o fluctuaciones por lo que es importante estudiar el comportamiento de flujos turbulentos.

2.3.2 FLUJOS SUPERSÓNICOS TURBULENTOS.

Se denomina turbulencia al fenómeno en donde existen fluctuaciones impredecibles creadas por la presencia de remolinos de diversos tamaños y que dan como resultado irregularidades en el espacio y tiempo de los flujos.

El flujo turbulento se caracteriza por fluctuaciones al azar en la velocidad del fluido, el patrón desordenado de burbujas cercanas a la parte derecha de la figura 2.6 es el resultado de la acción de mezclado de flujo turbulento, en esa zona.

Debido a las fluctuaciones de velocidad se generan pequeños aunque macroscópicos trozos de fluidos denominados "remolinos". Como estos remolinos transportan masa, cantidad de movimiento y energía, la velocidad de mezclado de diferentes fluidos, esto es, los esfuerzos cortantes aparentes y la transferencia de calor aparente, son considerablemente mayor es que en el caso del flujo laminar.

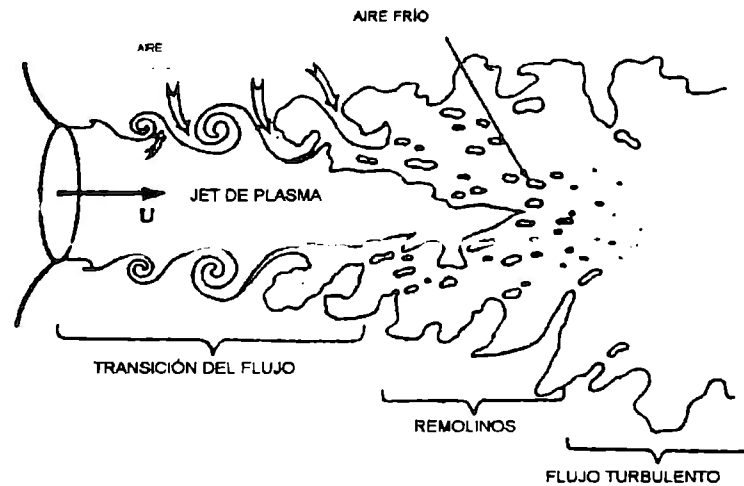


Fig. 2.6 Jet de Plasma y Flujo Turbulento

El flujo laminar se transforma en flujo turbulento en un proceso conocido como transición (ver figuras 2.6 y 2.7), por mecanismos que no se comprenden totalmente, estas inestabilidades crecen y el flujo se convierte en turbulento.

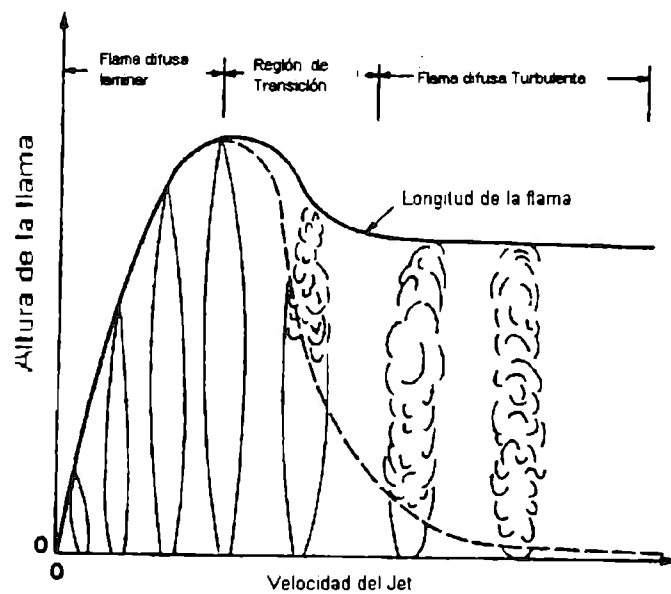


Fig. 2.7 Transición de chorro Laminar-Turbulento

Los enfoques ingenieriles del flujo turbulento se fundan en una combinación teórica y experimental. La teoría sugiere cómo se comportan los flujos turbulentos de manera cualitativa y las formas posibles para su descripción matemática, para el análisis de flujos turbulentos nos basaremos en el Modelo $k-\varepsilon$.

2.3.3 MODELO K-ε. PARA FLUJOS TURBULENTOS

El "modelo completo" más simple de turbulencia sōn dos ecuaciones en donde la solución, de ambas permite determinar la longitud y la velocidad turbulenta para separado.

La robustez del modelo, la economía, y la exactitud razonable para una amplia gama de flujos turbulentos explican su popularidad en el campo industrial y en la aplicación de simulaciones de transferencia de calor. Es un modelo semi-empírico, y la derivación de las ecuaciones del modelo son consideraciones lógicas del fenómeno y de la práctica.

El modelo k - ϵ se basa en las ecuaciones de transporte de la energía cinética turbulenta (k) y de la disipación de energía (ϵ). La ecuación de transporte para (k) se deriva de la ecuación exacta, mientras la ecuación de transporte para (ϵ) se obtiene utilizando razonamientos físicos.

Las ecuaciones son:

$$\rho \frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M \quad (2.33)$$

$$\rho \frac{D\epsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon\rho} \frac{\epsilon^2}{k} \quad (2.34)$$

En las ecuaciones 2.33 y 2.34 G_k representan la generación de energía cinética turbulenta debida a las medias de los gradientes de velocidad. Y_M representa la contribución de las fluctuaciones de la dilatación y compresión a lo largo de la disipación. $C_{1\epsilon}$, $C_{2\epsilon}$, C_μ , σ_k y σ_ϵ son constantes con los siguientes valores.

$$C_{1\epsilon} = 1.44 \quad C_{2\epsilon} = 1.92 \quad C_\mu = 0.09 \quad \sigma_k = 1.0 \quad \text{y} \quad \sigma_\epsilon = 1.3$$

Estos valores se determinaron mediante experimentos.

La ecuación de la viscosidad turbulenta es:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (2.35)$$

2.4 PLASMA Y SUS PROPIEDADES

El plasma es considerado como el cuarto estado de la materia, ya que si le añadimos más energía al gas, notamos modificaciones en el gas tanto en su temperatura como en sus características eléctricas. A este proceso se le conoce como ionización. Este gas ionizado y eléctricamente conductivo se le llama Plasma. [5]

Un plasma entonces, consiste en una mezcla de electrones, iones y especies neutras, las cuales son producidas por descargas eléctricas. Los plasmas pueden ser clasificados en dos grandes grupos:

Plasmas Térmicos (*PT*) o Plasmas en Equilibrio (*PE*): se caracterizan por su alta densidad o gran volumen de energía y la igualdad entre las temperaturas de la partícula y los electrones (T_h y T_e respectivamente).

Plasma Fríos o no equilibrados (*PF*): Se producen por varios tipos de descargas de luz o descargas a baja presión y se caracterizan por su baja densidad de energía comparados con los *PT* y por la gran diferencia entre las temperaturas de los electrones y las partículas ($T_e \gg T_h$).

Estos dos grupos tienen propiedades específicas diferentes, que dan lugar a condiciones diferentes de proceso. Para fines de este estudio, los *PT* son los de mi mayor atención por lo que únicamente enumeraré características de estos.

2.4.1 PROPIEDADES DE LOS PLASMA TÉRMICOS

El proceso de los plasma térmicos se caracteriza por su densidad n o número de partículas por m^3 , la relación es la siguiente:

$$n = \int_{-\infty}^{\infty} f(u) du \quad (2.36)$$

y a su vez se relacionan con la energía cinética mediante la relación:

$$A = n \left(\frac{m}{2\pi kT} \right)^{1/2} \quad (2.37)$$

La distribución de las partículas dentro del plasma está caracterizada por la temperatura, que se calcula mediante la energía cinética de las partículas, suponiendo que la distribución de las partículas es de forma normal y su velocidad se comporta según la Distribución de velocidad Maxwelliana;

$$E_{av} = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{2} mu^2 f(u) du}{\int_{-\infty}^{\infty} f(u) du} \quad (2.38)$$

Utilizando algunas sustituciones de variables como $v_{th} = \sqrt{\frac{2kT}{m}}$ y $x = \frac{u}{v_{th}}$, se obtiene la ecuación (2.38a)

$$E_{av} = \frac{\frac{1}{4} m A v_{th}^3}{A v_{th}} = \frac{1}{4} m v_{th}^2 = \frac{1}{2} kT \quad (2.38a)$$

Donde se concluye que la media de la energía cinética es $\frac{1}{2} kT$. Si se realiza el mismo procedimiento para 3 dimensiones se encuentra que: $\frac{3}{2} kT$ por consiguiente para n grados de libertad se tiene que:

$$E_{av} = \frac{\alpha}{2} kT \quad (3.39)$$

donde α es el grado de libertad. Si $kT = 1eV = 1.6 \times 10^{-19} J$, tenemos que la temperatura queda en función de:

$1 eV = 11,600 K$, por lo que para el caso más general de α grados de libertad se tiene:

$$E_{av} = \alpha eV \quad (3.40)$$

Es importante resaltar que un plasma puede tener diferentes temperaturas al mismo tiempo, lo que microscópicamente ocurre es que los iones y los electrones tienen distribución Maxwelliana separadas con temperaturas diferentes (T_i , T_e). [15]

2.5 DEFINICIONES Y CONCEPTOS BÁSICOS DEL PROCESO DE RECUBRIMIENTO POR ROCIADO DE PLASMA

En el capítulo uno se explicó a grandes rasgos los pasos que intervienen dentro del recubrimiento por Rociado de Plasma, a continuación explico con mayor detenimiento cada uno de estos pasos.

{1} *Partículas para recubrimiento*: Las partículas de polvo inyectadas pueden ser de: metal, aleaciones de metales, materiales duros metálicos y no metálicos, aleaciones resistentes, superaleaciones y cerámicos. Ver figura 1.1

Según estudios realizados por E. Lugscheider y T. Weber las Partículas muy grandes (Tamaño de grano arriba de $150 \mu m$) no se derriten; mientras que partículas muy pequeñas (Tamaño de grano menor de $5 \mu m$) se evaporan en el Jet de Plasma. Por lo que en la mayoría de los casos el

rango del tamaño de las partículas es muy estrecho. Sin embargo para ciertas aplicaciones las partículas con tamaño de grano grande ofrecen ventajas. [3] Ver figura 1.1

{2} *Ánodo, Cátodo:* Dos metales sólidos que están conectados por un circuito externo se llaman electrodos. Por definición el electrodo en el cual ocurre la oxidación es el Ánodo, el electrodo en el cual ocurre la reducción recibe el nombre de cátodo. Para el caso del recubrimiento por plasma utilizamos el material de la boquilla (generalmente cobre) como el ánodo y el cátodo estará hecho de tungsteno. Ver figura 1.1

{3} *Arco Eléctrico:* Se produce entre los electrodos mediante la inyección de corriente eléctrica. Se utiliza un gas el cual pasa por la boquilla de la pistola de plasma, y al elevar la temperatura del gas mediante el arco se consigue transformar al gas en plasma, el cual es lanzado por la boquilla obteniendo el Chorro o Jet de Plasma. Ver figura 1.1

{4} *Jet de Plasma:* Se produce mediante las reacciones que ocurren al producir el plasma, dado que es una reacción exotérmica, se libera energía en forma de luz y calor produciendo el chorro, en la cuál serán inyectados los polvos (consumibles), para ser fundidos y proyectados contra el sustrato. Ver figura 1.1

{5} *Sustrato:* El sustrato es la pieza, material, herramienta o parte metálica que se desea recubrir. Ver figura 1.1

{6} *Plasma:* El plasma es considerado como el cuarto estado de la materia (figura 2.8). Si le añadimos más energía al gas, notamos modificaciones en el gas tanto en su temperatura como en sus características eléctricas. A este proceso se le conoce como ionización. Este gas ionizado y eléctricamente conductivo se le llama Plasma. [11] Ver figura 1.1

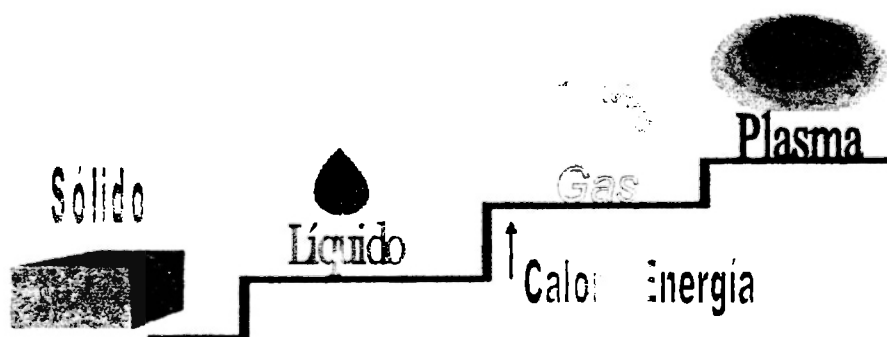


Fig. 2.8 Plasma el cuarto estado de la Materia

Los gases comúnmente utilizados para crear plasma son: Argón, Helio, Nitrógeno, Hidrógeno y Mezclas entre los anteriores. El Argón tiene la ventaja de que es muy sencillo ionizarlo y forma un arco estable que opera a bajo voltaje, pero la entalpía del plasma de gases diatómicos como hidrógeno y nitrógeno son mayores que la del argón y el helio. [3]

Dentro del recubrimiento por rociado de plasma existen características y partes del proceso, como las ya descritas; pero algunas otras que no explicaré por lo obvio del proceso, además de no ser parte importante para el desarrollo de la presente Tesis. Entre estas encontramos: las propiedades del sustrato, las características de la boquilla, y las características generales de la pistola de plasma. En el siguiente capítulo se abordará con mayor detenimiento el proceso del chorro de plasma, sus características y propiedades así como la interacción del plasma con la partícula inyectada.

3 CAPÍTULO TRES: MODELAJE TEÓRICO DEL CHORRO DE PLASMA

En la actualidad se han realizado diversos estudios con el fin de entender la estructura del flujo y las propiedades térmicas de los chorros de plasma.

Se han utilizado técnicas de diagnóstico como espectroscopios de emisión, pruebas de entalpía, modelación numérica y análisis espectrales con el fin de entender y lograr reproducir chorros de plasma idénticos. Por separado todas las técnicas anteriores no ayudaron a un mayor entendimiento del fenómeno, y no fue sino hasta la conjunción de todas estas técnicas, cuando se lograron avances significativos dentro del análisis de los chorros de plasma y su interacción con el medio ambiente.

Además, en la Universidad de Minnesota, se han realizado estudios espectrales, para analizar frecuencias dominantes en las fluctuaciones de voltaje en la pistola de plasma y determinar temperatura y presión en el chorro de plasma.

Antes de describir a fondo las posibles mediciones que se pueden realizar al chorro de plasma es importante describir cómo es formado el chorro de plasma. En el capítulo 2 se mencionó cómo se forma el plasma a partir de un gas, pero a lo largo de este capítulo estudiaremos con mayor detenimiento este proceso y la formación del chorro de plasma. La figura 3.1 nos muestra una pistola de plasma, donde se aprecia la formación del chorro de plasma cuando pasa el gas a través del arco eléctrico.

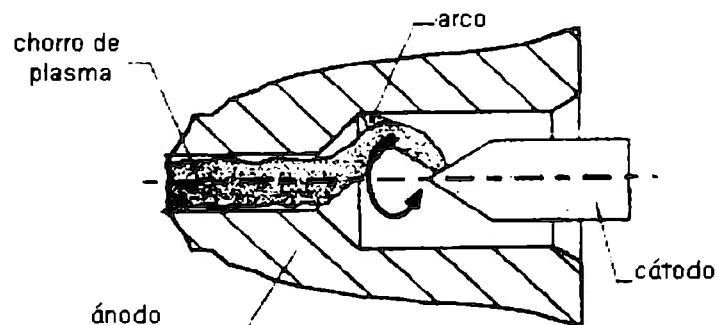


Fig. 3.1 Chorro y Pistola de Plasma

3.1 ESTADO ACTUAL DE CHORROS O JETS DE PLASMA

En la investigación de chorros de plasma y sus propiedades se han tenido grandes avances en los últimos años. Esto debido al creciente interés en el campo de plasmas industriales, que ha conducido a diversos estudios para entender las condiciones de los recubrimientos, con el fin de controlar y optimizar los numerosos parámetros que influyen en la calidad de estos. [9]

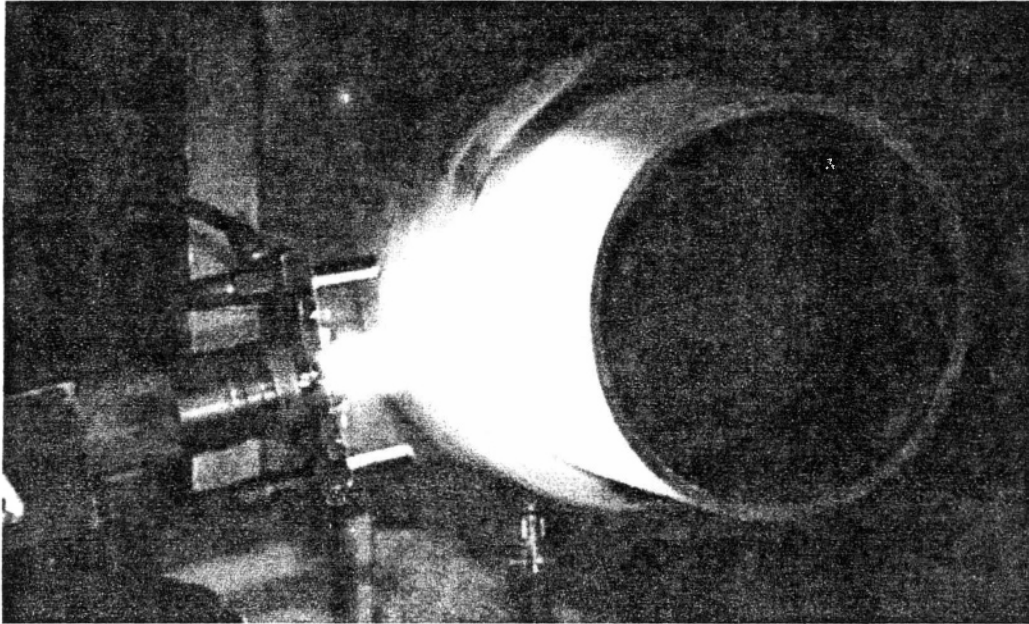


Fig. 3.2 Rociado por plasma – Jet de plasma

Desde los años 60's, se han realizado estudios para el análisis de los chorros de plasma. En la actualidad, se apoyan en paquetes computacionales, para modelar el comportamiento de los chorros de plasma.

Las pistolas de plasma comerciales se basan en un mismo principio, en donde las variaciones comunes son la geometría del ánodo (boquilla) y del cátodo dependiendo de la aplicación. La *figura 3.2* nos muestra una pistola de plasma comercial, montada en el brazo de un robot durante el proceso de recubrimiento por rociado de plasma.

La formación del chorro de plasma también se basa en el mismo principio para las diferentes aplicaciones: el gas inyectado pasa a través del arco eléctrico, producido entre el ánodo y el cátodo (aún cuando alguno de estos dos esté fuera de la pistola de plasma, como es el caso del corte), el gas ionizado se transforma en plasma, éste a su vez se transforma en jet de plasma debido a la energía recibida, que se expulsa de la boquilla de la pistola con mayor o menor velocidad y presión, dependiendo de la aplicación a la que nos referimos. Ver *figura 3.2*.

3.1.1 CHORRO DE PLASMA EN CAMPOS ESPECÍFICOS COMO: VIAJES ESPACIALES, CORTE, SOLDADURA Y OTROS.

No sólo en el campo de recubrimientos se han realizado importantes estudios, también en el campo de corte, soldadura y hasta viajes espaciales han llegado a la necesidad de emprender nuevos estudios para mejorar las técnicas ya existentes.

A continuación daré un breve panorama del estado actual de los chorros de plasma en otros campos de aplicación.

Soldadura con plasma: En 1941, en Estados Unidos, se buscaba nuevos y mejores métodos para soldar metales ligeros, para fines de guerra y en especial para la producción de aviones, sus esfuerzos se vieron gratificados con el nacimiento de un nuevo método de soldadura, el TIG Welding (Tungsten Inert Gas).

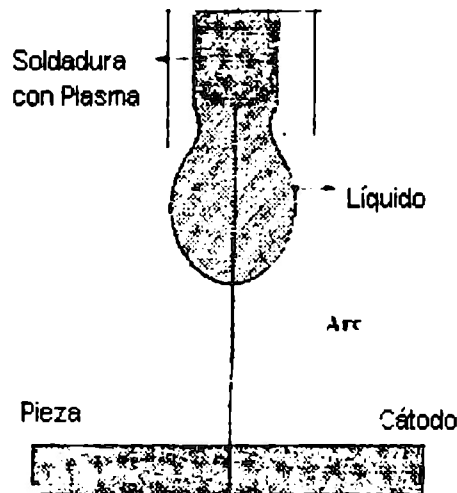


Fig. 3.3 Soldadura

Una vez desarrollado el TIG (Fig 2.5), surgió la necesidad de utilizar nuevos gases para el proceso de soldadura, se utilizaron gases como Argón, Helio, etc. Con el principio del TIG estos nuevos procesos se denominaron "Argonarc" o "Helioarc" que en nuestros días son mejor conocidos como GTAW (Gas Tungsten Arc Welding).

Además del TIG y GTAW, también la soldadura VPPA (Variable Polarity Plasma Arc) utiliza chorros de plasma. Esta última ha sido desarrollada por la NASA, ya que aún cuando el TIG y el GTAW son de alta calidad en la soldadura, el VPPA produce mejores y más ligeras soldaduras, lo necesario para los cohetes, satélites, aeronaves y naves espaciales. [10] La figura 3.3 nos muestra un esquema del proceso de soldadura con plasma.

Corte con plasma: Fue para el año 1950 cuando realizando pruebas para mejorar las características del TIG, científicos de la Union Carbide's descubrieron que cuando se reduce el

tamaño de la boquilla (diámetro) las propiedades del TIG se modifican notablemente, la velocidad se incrementa al igual que su resistencia al calor en el jet producido, en lugar de soldar la pieza de metal, ésta es cortada. [5]

La *figura 3.4* nos muestra un esquema del funcionamiento de la pistola de plasma para corte de piezas metálicas. El principio es similar al recubrimiento por rociado de plasma, a diferencia de que la pieza metálica es el ánodo para cerrar el circuito y crear el arco eléctrico.

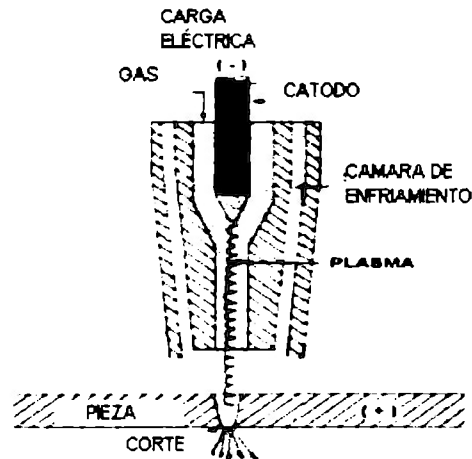


Fig. 3.4 Corte con plasma.

La *figura 3.5* compara los arcos de TIG (Tungsten Inert Gas) y el Jet de Plasma, ambos trabajando con gas argón a 200 amps. El Chorro de plasma opera al doble de voltaje y produce un arco de plasma más caliente que el arco correspondiente al TIG. [5] Sólo el chorro de plasma es controlado con una boquilla de 4.8 mm de diámetro.

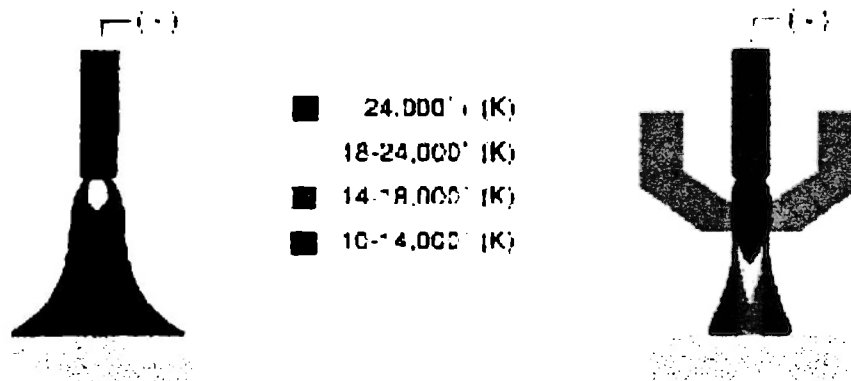


Fig. 3.5 TIG vs Chorro de Plasma.

Las características del jet de plasma pueden ser alteradas cambiando el tipo de gas utilizado, el flujo del gas, la corriente producida en el arco eléctrico, el voltaje y el tamaño de la boquilla. Por ejemplo, si el flujo del gas utilizado es bajo, el jet de plasma comienza a concentrar calor, característica ideal para la soldadura, por el contrario si el flujo del gas se incrementa lo suficiente, la velocidad del jet de plasma es tan alta que atraviesa la pieza. [5]

3.2 CHORRO DE PLASMA EN EL RECUBRIMIENTO POR ROCIADO DE PLASMA

Las partículas que se inyectan en el chorro de plasma se someten a una gran aceleración y a un calor intenso, antes de tener contacto con el sustrato. Este calor y esta aceleración dependen de las características del chorro de plasma. Es decir, la micro estructura de los recubrimientos por rociado y sus propiedades dependen fuertemente de los fenómenos que ocurren durante el vuelo de las partículas, dentro del chorro de plasma.

El plasma se logra a través de una descarga de voltaje que causa una ionización local en el gas inyectado (argón, nitrógeno, hidrógeno, helio), y a través de un arco de corriente directa formado entre el cátodo y el ánodo. La resistencia calorífica del arco logra que el gas llegue a temperaturas extremas, ionizando y disociando en forma de plasma.

El plasma existente en el ánodo (boquilla) es conocido como flama libre o neutra, es decir el plasma no contiene corriente eléctrica. Cuando el plasma se estabiliza, el arco eléctrico se extiende a la boquilla, en lugar de acortarse cerca de algún pico en el ánodo (boquilla).

La caracterización del chorro de plasma se refieren a sus propiedades tales como: velocidad, temperatura, densidad, conductividad térmica y viscosidad. Esta información es esencial para entender y modelar el comportamiento del chorro de plasma y la interacción con los polvos inyectados.

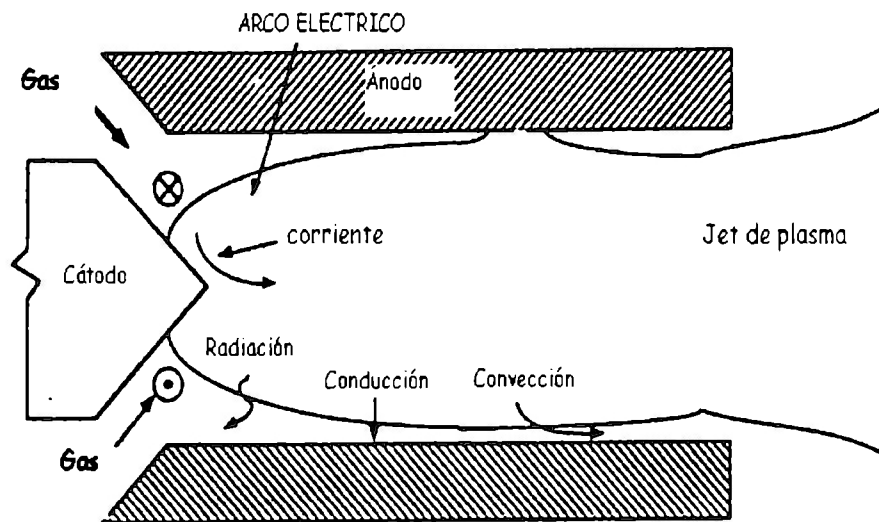


Fig. 3.6 Procesos en la pistola de plasma – Jet de plasma

La figura 3.6 nos muestra el comportamiento del arco eléctrico dentro de la boquilla, además nos esquematiza el comportamiento del jet de plasma dentro de la boquilla o ánodo.

3.2.1 BASES TEÓRICAS

A lo largo del capítulo 2 he desarrollado las bases teóricas para el análisis de fluidos en general, ahora el enfoque es sobre las propiedades físicas y químicas del plasma.

La tabla 3.1 se muestra las cuatro etapas más importantes del proceso de recubrimiento por rociado de plasma, además muestra las variables importantes que influyen en el comportamiento del recubrimiento, así como una diferenciación entre parámetros controlables e incontrolables. [11]

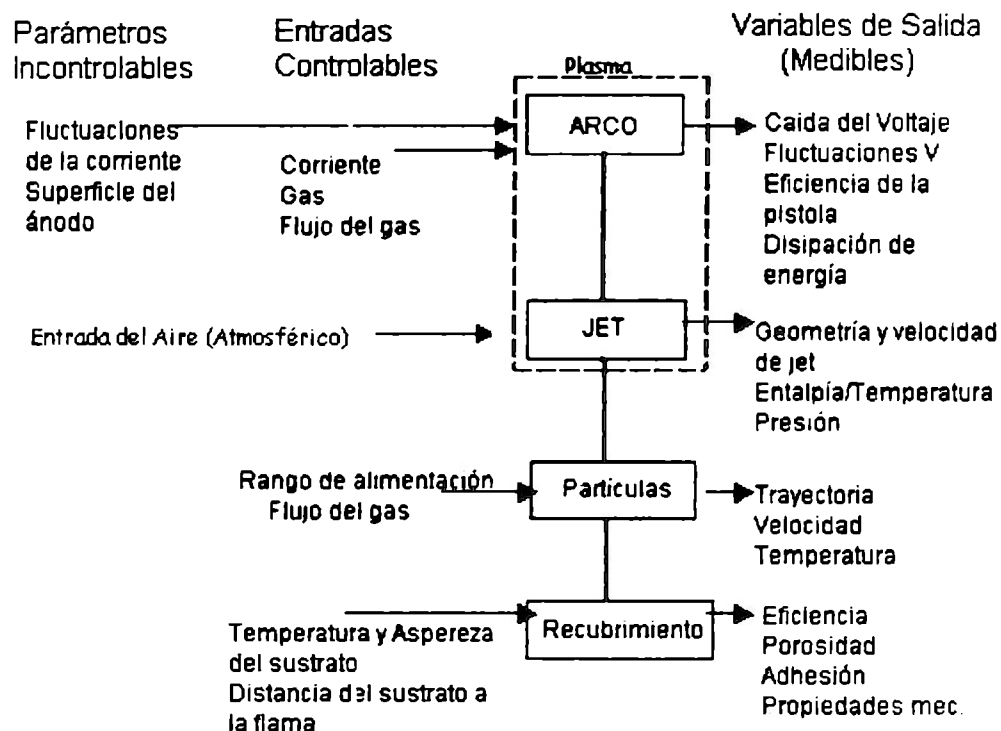


Tabla 3.1 Etapas del Rociado de Plasma

Dado el objetivo de la presente tesis, sólo es de importancia para el desarrollo de ésta las dos primeras etapas, que son: el arco eléctrico y el jet, ambos relacionados con las propiedades del plasma.

En las siguientes secciones se hará un estudio teórico específico de las variables que influyen en estas dos etapas. Tanto de las variables controlables como de las incontrolables y su influencia en el comportamiento del plasma.

Para lograr un punto de partida para la simulación de chorros supersónicos en el recubrimiento de metales, es necesario entender lo que se va a realizar en el capítulo 4 simulación CFD

(Dinámica de Fluidos Computacional), por lo que en las siguientes secciones del capítulo 3 se plantean las ecuaciones para modelar los chorros o jets de plasma.

3.2.2 SUPOSICIONES TEÓRICAS

Para realizar un análisis específico para el chorro de plasma se necesitan hacer diferentes suposiciones tales como:

1. El chorro tiene simetría azimutal; es decir, se puede describir con ecuaciones en dos dimensiones (coordenadas cilíndricas)
2. El chorro es independiente del tiempo, se considera que es un flujo estacionario.
3. Se encuentra en estado de equilibrio termodinámico.
4. El plasma es formado a partir de un gas con comportamiento ideal.
5. Se parte de un diseño de boquilla óptimo. Ver [15]

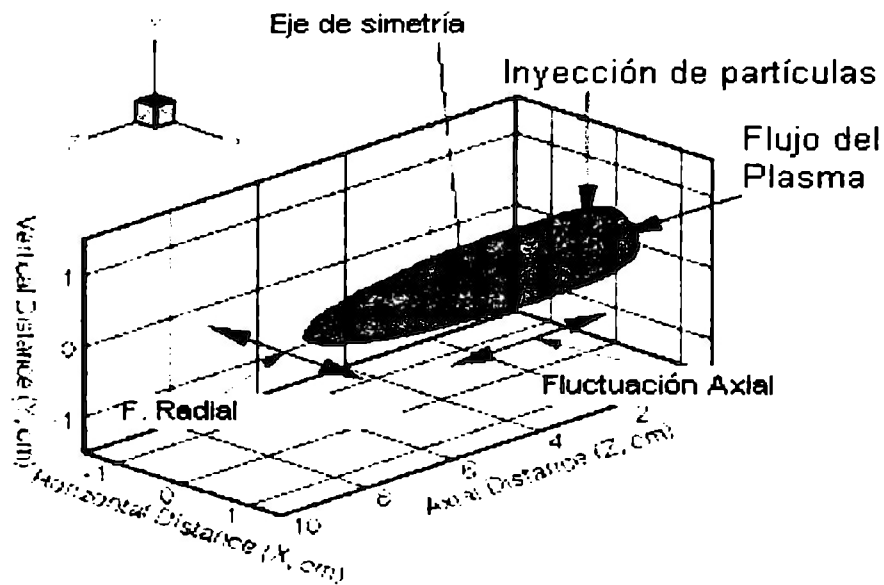


Fig. 3.7 Jet de plasma simétrico

La figura 3.7 nos ilustra una flama con eje de simetría sobre el eje Z, es decir una flama de simetría azimutal. Se considera que la flama es estacionaria ya que para un cierto momento en el tiempo las características de la flama no varían.

Además se considera que el comportamiento del gas es de un gas ideal, ya que las moléculas de éste están tan separadas unas con otras que el comportamiento de una no se ve influenciado por otra molécula del mismo gas.

La única condición que se tendrá es garantizar que la flama no se extinga una vez que el proceso de recubrimiento inicie. Los gases con los que se trabajan serán Argón y Helio, aproximando su comportamiento al comportamiento de gases ideales. Por último, el diseño de la boquilla será de

forma convergente divergente y de dimensiones ideales para garantizar que el chorro o jet sea supersónico.

3.2.3 DINÁMICA DEL CHORRO DE PLASMA Y TRANSFERENCIA DE CALOR

Para determinar la entalpía total del chorro podemos utilizar el método de la norma ASTM E-341-73. Este método establece que la energía que entra en la pistola de plasma (energía eléctrica) menos la energía disipada por el enfriamiento de la pistola, dividida por el flujo del gas nos da como resultado la entalpía total de la flama (h_t). La entalpía estática (h_s) se calcula mediante:

$$h_s = h_t - \frac{1}{2}u^2 \quad (3.1)$$

donde u es la velocidad del chorro (ver ec. 2.30). Conociendo el diámetro de la boquilla (d) y el flujo del gas (q), el promedio de la velocidad de la flama es:

$$u = \frac{4q}{\rho_g \pi d^2} \quad (3.2)$$

donde ρ_g es la densidad del chorro .

Otro método para calcular la temperatura es el método del Calorímetro, en donde sólo se pueden determinar el promedio de la velocidad y de la temperatura del chorro. La temperatura y velocidad real cambia en la dirección axial y radial, por lo que usualmente se divide el chorro en dos zonas comenzando en la salida de la boquilla en dirección axial:

- Zona central (core zone): alta temperaturas y alta velocidad.
- Zona desarrollada (developed zone) región de decaimiento de la temperatura y velocidad.

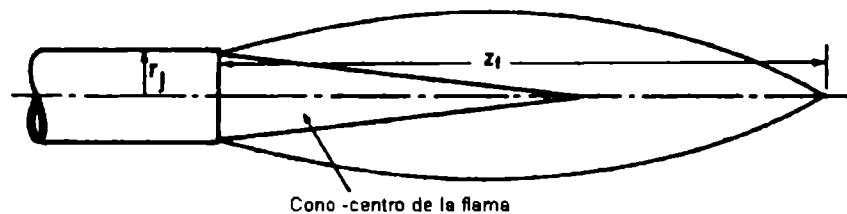


Fig. 3.8 Regiones del chorro

En la práctica existen diversos métodos para determinar la temperatura real de la flama, tanto en la zona central como en la desarrollada, dichos métodos son: Emisión espectroscópica, Láser inducido fluorescente, esparcimiento láser, pruebas de entalpía, y medición directa con termopares de gran resistencia calorífica.

La figura 3.9 nos muestra un esquema del chorro de plasma que es emitido desde la boquilla de una pistola de plasma, donde se puede observar el chorro de plasma y el aire a su alrededor.

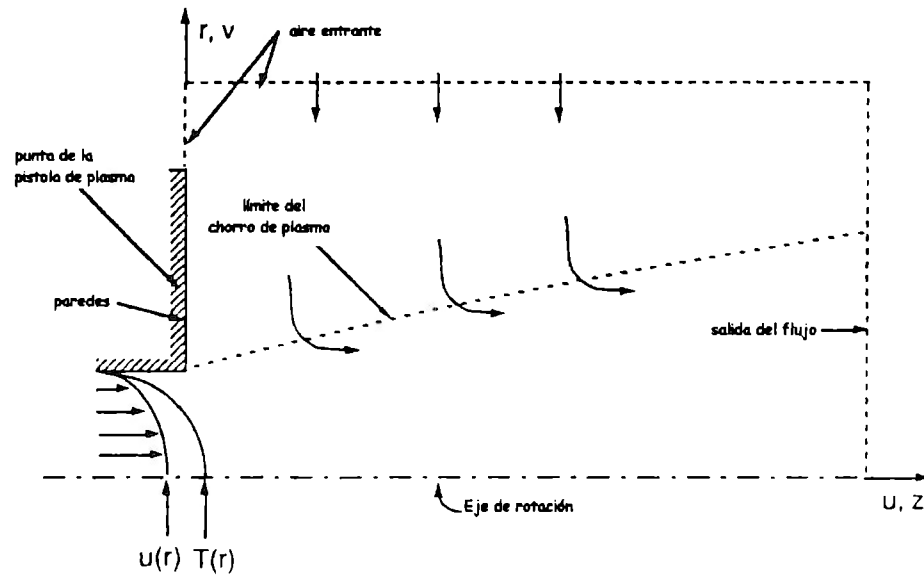


Fig. 3.9 Jet de plasma

El fenómeno de transporte producido en los chorros de plasma, nos ayudan a comprender mejor el comportamiento de transferencia de calor de estos sistemas, en la figura 3.9 se muestra además la relación de la mayor parte de las variables relacionadas con los parámetros que más influyen en el comportamiento de los chorros de plasma. Donde $u(r)$ es la variación radial de la velocidad y $T(r)$ es la variación radial de la temperatura.

Las ecuaciones de conservación gobernantes para este sistema son:

Continuidad:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial(\rho r v)}{\partial r} = 0 \quad (3.3)$$

Momento:

Axial $-u$

$$\frac{\partial(\rho u^2)}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial(\rho r u v)}{\partial r} = -\frac{\partial P}{\partial z} + 2 \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu_{eff} \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right) \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \mu_{eff} \left(\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \right]$$

Radial $-v$

$$\frac{\partial(\rho u v)}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial(\rho r v^2)}{\partial r} = -\frac{\partial P}{\partial z} + \frac{2}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \mu_{eff} \left(\frac{\partial v}{\partial r} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu_{eff} \left(\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \right] - \mu_{eff} \frac{2v}{r^2} \quad (3.4)$$

Energía:

$$\frac{\partial(\rho uh)}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial(\rho rhv)}{\partial r} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{k_{eff}}{c_p} \frac{\partial h}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{rk_{eff}}{c_p} \frac{\partial h}{\partial r} \right) - S_h \quad (3.5)$$

El número de Reynolds para el jet de plasma queda descrito por:

$$Re = \frac{\rho_g d_g u_g}{\eta_g} \quad (3.6)$$

Análisis del flujo turbulento:

Energía cinética de turbulencia

$$\frac{\partial(\rho uk)}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial(\rho rvk)}{\partial r} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\mu_{eff}}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{r\mu_{eff}}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial r} \right) + G - \rho \varepsilon \quad (3.7)$$

Disipación de energía cinética de turbulencia

$$\frac{\partial(\rho u\varepsilon)}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial(\rho rv\varepsilon)}{\partial r} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\mu_{eff}}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{r\mu_{eff}}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial r} \right) + \frac{\varepsilon}{k} (C_1 G - \rho \varepsilon C_2) \quad (3.8)$$

Para las ecuaciones (3.3 a 3.8) u , y v son las velocidades y las direcciones axial, radial respectivamente. Las variables h , k y ε representan la entalpía, la energía cinética y la energía de disipación respectivamente. P es la presión, k_{eff} es la conductividad térmica efectiva.

La viscosidad efectiva μ_{eff} es el resultado de la suma de las viscosidades laminar y turbulenta:

$$\mu_{eff} = \mu_{lam} + \mu_t = \mu_{lam} + \frac{C_D \rho K^2}{\varepsilon} \quad (3.9)$$

3.2.3.1 INTERACCIÓN CHORRO – PARTÍCULAS

Las partículas que se inyectan en el chorro de plasma adquieren gran cantidad de energía cinética y calorífica antes de impactarse contra el sustrato, esta energía es absorbida del chorro, con lo que se logra que la partícula se funda y se impacte contra el sustrato.

$$\frac{1}{2} mv^2 = mc_p \Delta T \quad (3.10)$$

Donde m es la masa de la partícula, v es la velocidad de impacto, ΔT el incremento de la temperatura en el impacto y c_p es el coeficiente específico de calor del material de la partícula.

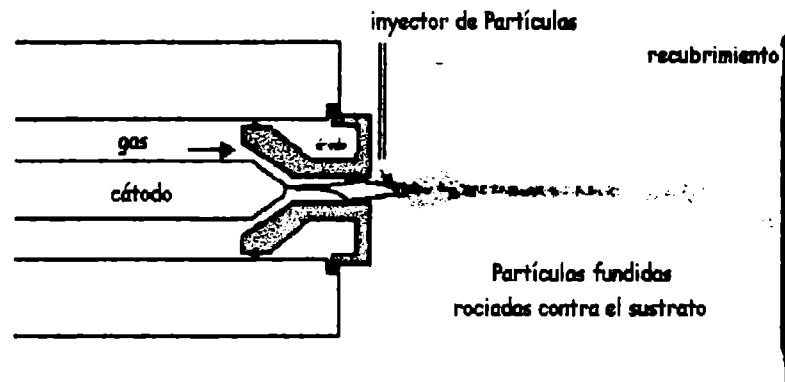


Fig. 3.10 Partículas fundidas rociadas contra el sustrato

La aceleración de la partícula (sólido) que se inyecta en el chorro de plasma es el resultado de las siguientes fuerzas:

- Fuerza de arrastre
- Fuerza debida a los gradientes de la presión
- Fuerzas externas (gravitacional, eléctrica, etc.)

La fuerza que generalmente se toma en cuenta en este tipo de procesos es la de arrastre en donde:

$$C_D = \frac{24}{Re}, \quad Re < 0.2 \quad (3.11)$$

lo que se describe es el movimiento en el régimen de Stokes. El número de Reynolds se define como:

$$Re = \frac{\rho_g d_p (u - v)}{\eta_g} \quad (3.12)$$

donde η_g es la viscosidad dinámica del gas.

Cabe mencionar que la posición en la que se inyecten las partículas influye en la trayectoria que sigan éstas dentro de la flama.

Para el modelo que se pretende realizar, el comportamiento de las partículas dentro del chorro de plasma y todo lo relacionado con las partículas no es de gran importancia, ni influye dentro de nuestro análisis.

3.2.4 PARÁMETROS CRÍTICOS

Los parámetros clave que controlan las propiedades termomecánicas de los recubrimientos por rociado de plasma son la temperatura y la transferencia de momento entre el chorro de plasma y

las partículas inyectadas. [9] En la figura 3.11 se muestra un esquema de los contornos de temperatura alcanzados en el chorro dentro del recubrimiento por rociado de plasma.



Fig. 3.11 Esquema térmico del jet de plasma

Por lo que para fines de la presente tesis únicamente hemos estudiado las propiedades del chorro de plasma, y hemos llegado a conclusiones como: El comportamiento del jet o chorro de plasma puede ser alterado dependiendo del tipo de gas o mezcla de gases que se esté utilizando, del flujo másico del gas, del arco eléctrico producido, del voltaje y corriente utilizada, de la velocidad, y del diámetro de la boquilla.

La manera cómo cada uno de estos factores afecta el comportamiento del chorro de plasma en especial cómo influyen en la temperatura del chorro de plasma, es de mi mayor atención. De los factores mencionados a lo largo de la tesis, los que más afectan la temperatura del chorro de plasma son los que se muestran en la Tabla 3.1.

Quiero dejar en claro que la variable de interés para el futuro desarrollo de la presente tesis únicamente será **la optimización de la temperatura en la flama o chorro de plasma y por consecuencia el análisis de la velocidad del jet de plasma**. Es decir, lograr las mayores temperaturas y velocidades en el chorro de plasma, para lograr la fundición y ganar momentum en las partículas inyectadas.

La tabla 3.2 nos muestra los parámetros que más influyen en el comportamiento del jet de plasma, y que además están directamente relacionados con la temperatura del chorro de plasma.

Para optimizar la temperatura del chorro mediante la simulación CFD, utilizaré los parámetros mencionados en la tabla 3.2.

FACTOR	SÍMBOLO	UNIDADES
Flujo másico del gas	q	Kg/s
Corriente	i	Amp
Voltaje	V	Volts
Potencia	P	kW
Velocidad	u	m/s
Turbulencia	$k\varepsilon$	kJ/kgK
Diámetro Boquilla	d	mm
Entalpía (antes y después reacción)	h	kJ/kgK
Entropía (antes y después reacción)	s	kJ/kgK
Presión	@	atm
Temperatura	T	K

Tabla 3.2 Factores que influyen en el Chorro de Plasma

Dado que en algunos parámetros a controlar los rangos de variación son amplios, se utilizarán únicamente 3 valores diferentes para cada uno de ellos, así por ejemplo para el tamaño de la boquilla se simulará con boquillas de diámetros 3, 5 y 8 mm.

FACTOR	Rangos de variación
Gas	Ar, H ₂ , He, N
Flujo másico del gas	2×10^{-03} Kg/s
Corriente	650 a 1 000 amp
Voltaje	20 a 120 volts
Potencia	($i \cdot V$) kWatts < 100 kW
Velocidad	250 m/s de entrada
Presión	1 atm = 101,325 Pa
Diámetro Boquilla	3.4 mm
Condiciones Atmosféricas	Aire ($1 \cdot 10^5$ Pa)
Angulo de aplicación	90°
Distancia de rociado	400 mm

Tabla 3.3 Rango de variación de parámetros que afectan al jet de plasma.

Los parámetros con los que se va a correr la simulación, no son datos al azar, a continuación enumero las causas por las cuales se han elegido dichos valores.

La geometría de la boquilla es el resultado de una investigación previa a este trabajo [15], donde se obtuvo que el diámetro de 3.4 mm es la boquilla con la que se obtienen condiciones favorables para el chorro de plasma.

La atmósfera donde se va a desarrollar el recubrimiento por rociado de plasma es el medio ambiente (Aire), ya que la técnica de rociado por plasma a la que nos hemos referido a lo largo de la tesis es APS (Atmospheric Plasma Spaying) Rociado de Plasma Atmosférico. Por lo que las condiciones del ambiente son 101325 Pa. equivalentes a 1atm. a temperatura de ambiente 300 K o 25 °C.

Un plasma es un gas eléctricamente conductivo que contiene partículas cargadas. Cuando se excitan átomos de un gas en los niveles de energía altos, los átomos pierden algunos de sus electrones y se ionizan produciendo un plasma que contiene las partículas eléctricamente cargadas (iones y electrones).

El plasma generado en el rociado de plasma incorpora uno o la mezcla de los siguientes gases: argón, helio, nitrógeno, hidrógeno.

La figura 3.13 nos muestra la gráfica de la temperatura contra la energía por unidad de volumen. En donde se relaciona la energía de disociación y la energía de ionización con respecto a la temperatura a la que se encuentre el gas al que se está haciendo referencia. Así por ejemplo para el gas argón si se incrementa la temperatura se requiere casi la misma energía para ionizar el gas que para disociarlo y para el nitrógeno con variación de temperatura mínima la energía necesaria para ionizar el gas es mucho mayor que la energía necesaria para disociarlo.

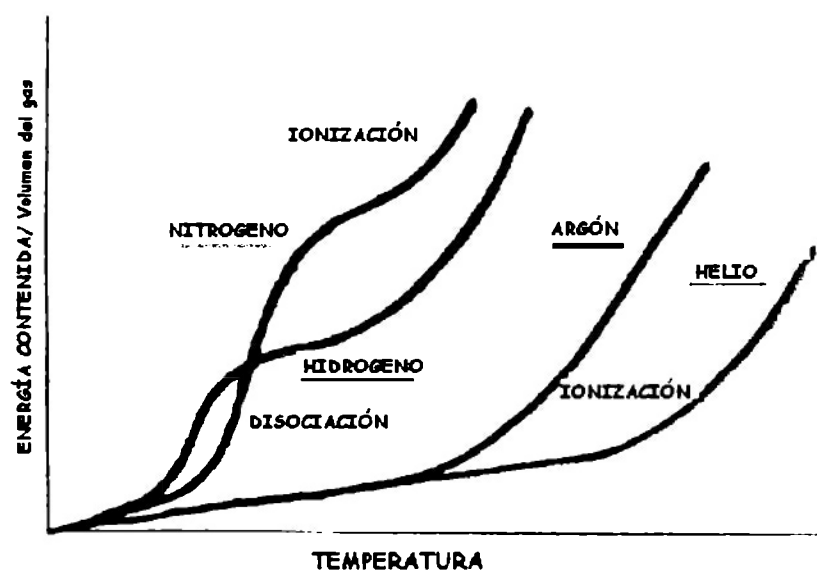


Fig. 3.13 Energía de disociación-ionización vs temperatura

El nitrógeno e hidrógeno son gases diatómicos (dos átomos en cada molécula). Estos plasmas tienen volúmenes de energía altos para una temperatura dada, mayor que los gases atómicos como argón y helio, debido a la energía asociada con la disociación de moléculas.

El argón y helio son gases monoatómicos (los átomos no se combinan para formar otras moléculas). Estos plasmas son relativamente bajos en energía, pero con niveles superiores de temperatura en comparación con los plasmas de gases diatómicos.

El nitrógeno es un gas primario usado solo o combinado con hidrógeno (gas secundario), tiene ventajas económicas ya que es el gas más barato para producir plasma. El nitrógeno tiende a comportarse como gas inerte, es decir no reacciona con los polvos inyectados, excepto con polvos de materiales como el titanio.

El argón es el gas de plasma primario y normalmente se utiliza con un gas secundario (el hidrógeno, helio o nitrógeno) para aumentar su energía. El argón se ioniza con facilidad por lo que cambia rápidamente a plasma y tiende a ser menos agresivo hacia el electrodo y daña menos la boquilla. El argón es un gas noble y se comporta de manera inerte con todos los materiales (polvos).

El hidrógeno es principalmente usado como un gas secundario, se utiliza por sus propiedades de transferencia de calor y porque además es un excelente antioxidante. Las cantidades pequeñas de hidrógeno agregadas a otros gases del plasma alteran las características del plasma, se logra que la energía se nivele y se usa como controlador para el voltaje y energía del plasma.

El helio comúnmente es usado como un gas secundario para el argón, es un gas noble e inerte a todos los materiales con los que trabaja, se usa cuando el hidrógeno o el nitrógeno (gases secundarios) presentan efectos de deterioro. El helio imparte buenas propiedades de transferencia de calor y tiene gran sensibilidad en el control de la energía del plasma. Normalmente se usa para plasmas con grandes velocidades de rocío o para producir capas de carburo de gran calidad donde sus condiciones de trabajo son críticas.

En el recubrimiento por rociado de plasma las características de los equipos existentes para este proceso tiene características definidas por ejemplo, para la potencia eléctrica (Voltaje del arco multiplicado por la corriente del arco producido), generalmente va de los 60 kW, a los 100 kW. Los rangos de variación están definidos por dos perillas que ajustan la corriente y el voltaje deseados.

La distancia de rociado típica es de 60 a 130mm. Elegí la distancia de 400 mm debido a que en esta zona se puede realizar un análisis más completo, además por simplificación del modelo dentro del paquete FLUENT, en donde las condiciones de frontera no afecten el desarrollo del modelo del chorro de plasma.

El ángulo de rociado generalmente es de 90°, aunque en ocasiones éste varía de la normal, debido a la geometría del sustrato, y la trayectoria en la que se desee inyectar las partículas de

recubrimiento. Para la simulación del modelo el ángulo de rociado es de 90° por simplificación del mismo.

Con base en esta información doy lugar a la simulación del modelo teórico del chorro de plasma que está desarrollado durante el capítulo 4.

4 CAPITULO CUATRO: MODELAJE CFD DEL CHORRO DE PLASMA

Antes de presentar el desarrollo de la simulación, doy una breve introducción de cómo se puede emplear las computadoras para ayudar al análisis de flujos.

El empleo de los paquetes computacionales que ayudan a simular fluidos dinámicos, no restan importancia al entendimiento de la física y química del comportamiento del fluido. Por el contrario, hace imperativo el entendimiento de los principios básicos.

Los programas de cómputo proporcionan la capacidad de realizar los cálculos requeridos para apoyar los análisis de flujos. Los programas de cómputo se requieren para hacer trabajar dicha capacidad en un problema particular. En general se dispone de cuatro tipos de programas para apoyar los análisis de mecánica de fluidos.

El primer tipo trata de programas de cómputo para una tarea específica, permitiendo al usuario hacer un análisis de una clase seleccionada de problemas, simplemente alimentando las características físicas.

El segundo tipo, que es el programa disponible de propósito más general para apoyar el análisis de flujo, el ingeniero tiene que formular la secuencia de cálculos que se van a realizar y dar a la computadora las instrucciones mediante una serie de comandos en forma de un programa.

El tercer tipo, se caracteriza por un alto grado de interacción con el usuario. Los programas de este tipo requieren que el usuario introduzca un planteamiento matemático del problema de interés. El programa realiza entonces las operaciones numéricas que se requieren que el usuario introduzca un planteamiento matemático del problema de interés. El programa realiza entonces las operaciones numéricas que se requieren para resolver el problema.

4.1 CFD: DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONALES

La implantación de algoritmos de cómputo basados en los principios fundamentales que gobiernan el movimiento de los fluidos, se conoce como Dinámica de Fluidos Computacional (CFD). La diferencia principal entre la CFD y los métodos descritos anteriormente, es que estos proporcionan una resolución de un problema numérico que se origina después de haber realizado un trabajo analítico sustancial, sobre un problema específico de mecánica de fluidos. En contraste, la CFD se basa en una sola formulación general, capaz de resolver una amplia variedad de problemas de flujo.

Para resolver los problemas la CFD dividen el campo de flujo en pequeñas sub-regiones discretas de tamaño finito formando una malla o rejilla computacional. Los métodos CFD más populares son el de diferencias finitas (DF), el de volúmenes finitos (VF) y el de elementos finitos (EF). La simple tarea de enumerar todos los métodos de CFD sería formidable, pero cualquier lista pronto se vuelve obsoleta ya que continuamente se desarrollan nuevos algoritmos.

4.2 EMPLEO DEL PAQUETE GAMBIT

El paquete CAD utilizado para realizar la geometría de la boquilla y la región de la flama es el paquete Gambit.

Gambit es el preprocesador de FLUENT. Este paquete es una interfase entre el diseño del modelo y el análisis del mismo, ya que una vez realizado el dibujo, que en lo futuro se tratará como *el modelo*, se prosigue a exportar todas las características de la geometría al paquete FLUENT para iniciar las simulaciones.

El modelo consta de la geometría de la boquilla [15] y la región del chorro denominada ambiente como se muestra en la figura 4.1 y 4.2.



Fig. 4.1 Región Ambiente

La figura 4.2 nos muestra a detalle la región de la boquilla, que es el punto rojo que se percibe en la región ambiente en la parte inferior izquierda de la figura 4.1.

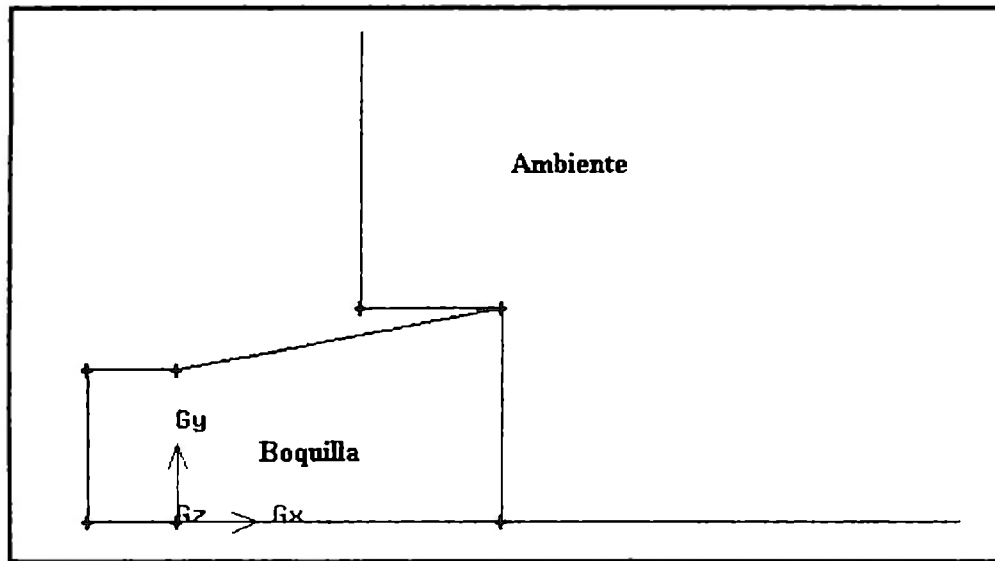


Fig. 4.2 Región de la boquilla

Las dimensiones de la boquilla y el ambiente se muestran en la tabla 4.1:

Boquilla	Ambiente
Diámetro en la garganta: 3.4 mm	Base: 400 mm
Diámetro a la salida de la boquilla: 4.76 mm	Altura: 100 mm
Longitud de la boquilla : 4.55 mm	

Tabla 4.1 Dimensiones Boquilla- Ambiente

El paquete Gambit también fue utilizado para realizar el mallado del modelo y la definición de las condiciones de frontera, que posteriormente ocupa el paquete FLUENT para el análisis del comportamiento del Chorro de Plasma.

4.2.1 MALLADO DE LA REGIÓN DEL CHORRO.

La aplicación del mallado, nos ayudará en el análisis numérico del modelo, esto con el fin de entender y tener una mejor aproximación del comportamiento del chorro de plasma.

El tipo de malla utilizada es cuadrangular, debido a la sencillez de la geometría del modelo, ver figura 4.3a, que muestra reflexión del modelo sobre el eje axisimétrico.

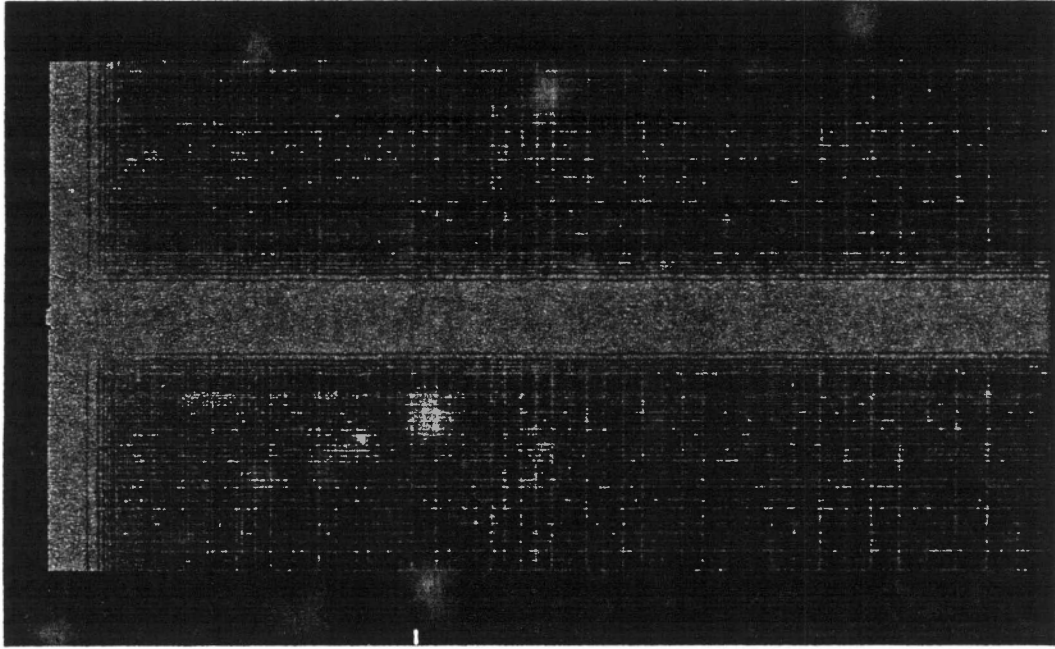


Fig. 4.3a. Mallado del Modelo Axisimétrico para el análisis del Chorro de Plasma.

La malla es fina en la región de la boquilla y en la zona donde se desarrollará el chorro de plasma, ya que es en esta región, es donde ocurren cambios importantes en las variables de interés (velocidad, temperatura, presión, fracción de masa, etc). Se incrementa el tamaño de las celdas conforme se avanza en el eje axial y radial del modelo, debido a que estas regiones no son de gran influencia para el desarrollo del chorro de plasma.

Para la generación de la malla se utilizaron 11500 nodos, donde 1 500 nodos son de la región de la boquilla y 10 000 nodos en la zona del ambiente.

La figura 4.3b nos muestra el mallado en la región de la boquilla para apreciar con mayor claridad el mallado utilizado en esta zona.

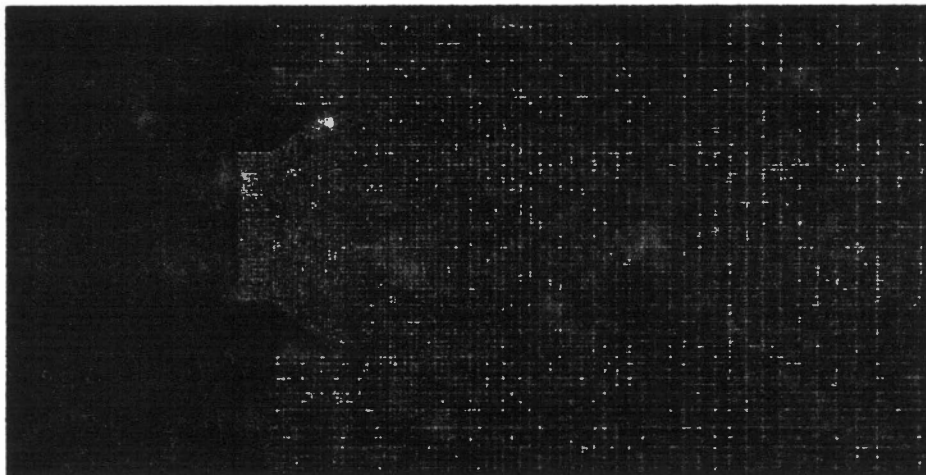


Fig. 4.3b Mallado de la Región de la boquilla.

Con la disposición de esta malla se espera tener una mejor aproximación al comportamiento real, ya que la zona donde se desarrolla el chorro de plasma es la zona de mallado fino.

4.2.2 DEFINICIÓN DE CONDICIONES DE FRONTERA

Las condiciones de fronteras dentro del modelo son:

Zona ambiente: Campo de presiones, presión de salida y eje axisimétrico como se muestra en la figura 4.4a.

Zona boquilla: Velocidad de entrada, paredes de la boquilla y eje axisimétrico como se muestra en la figura 4.4b

Campo de presiones: (Pressure Far Field)

Presión de salida: (Pressure Outlet)

Eje axisimétrico. (Axis)

Velocidad de entrada: (Velocity Inlet)

Paredes de la boquilla: (Wall)

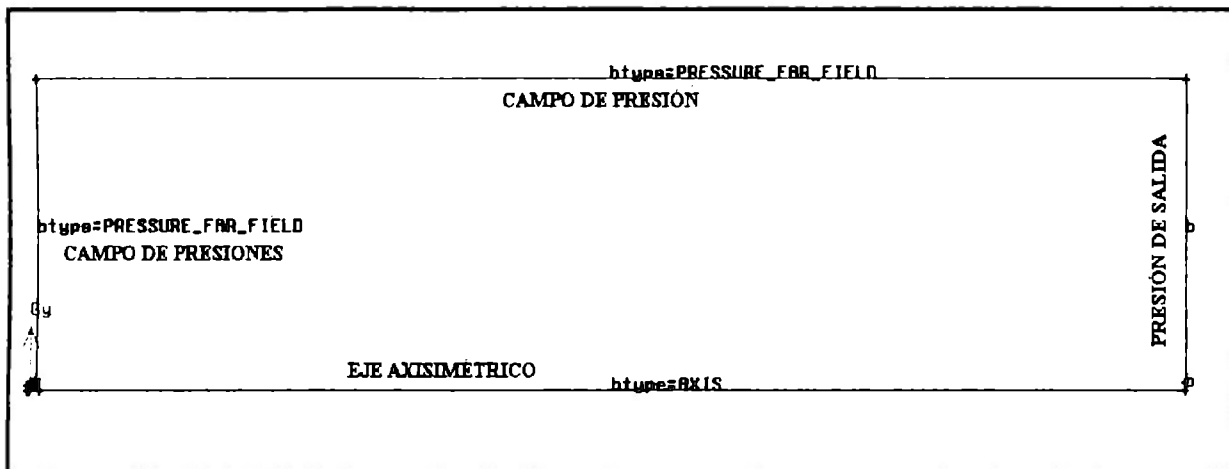


Fig. 4.4a Condiciones de frontera en la zona ambiente.

En la figura 4.4a se muestran las condiciones de frontera de la zona ambiente, en el extremo izquierdo inferior se localiza la zona de la boquilla que en la figura 4.4b se muestra con detalle.

Con la definición de condiciones de frontera, se exporta la malla al paquete FLUENT para dar paso al inicio de las simulaciones del chorro de plasma.

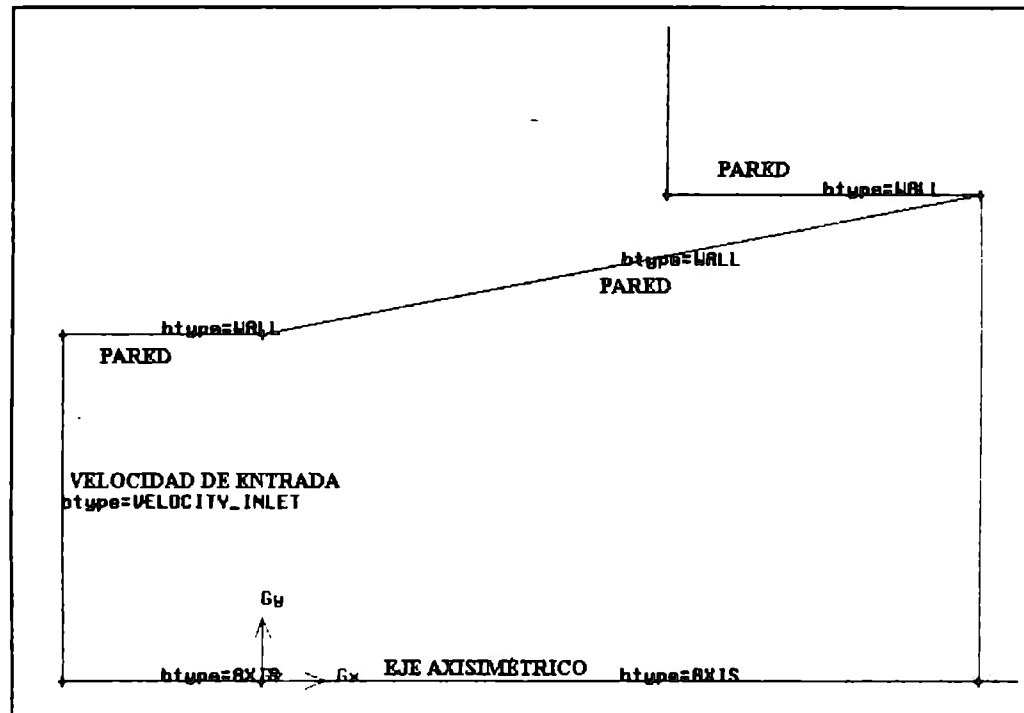


Fig. 4.4b Condiciones de frontera zona Boquilla

4.3 EMPLEO DEL PAQUETE FLUENT .

El paquete CFD que utilicé para el desarrollo de la presente tesis es FLUENT como se mencionó al principio de este capítulo.

Las condiciones de la simulación bajo las que se trabajó este modelo son: modelo axisimétrico, con análisis de flujo turbulento (Modelo k-ε), flujo estacionario y adiabático. Ver sección 3.2.2. Se considera la existencia de energía y el paquete resolverá simultáneamente las ecuaciones de energía, continuidad, velocidad y turbulencia.

Los datos de entrada para las condiciones de frontera son los siguientes (ver sección 3.2.4) y [15]:

Entrada (Velocidad de Entrada):

Velocidad 250 m/s

Temperatura 2500 K

Flujo 0.002 kg/s

Presión $8 \cdot 10^{+4}$ Pa

Gases utilizados Argón y Nitrógeno (por separado)

Izquierda y superior (Campo de Presión)

Presión 101325 Pa

Velocidad en Mach 0.001 Ma

Temperatura 300 K

Salida (Presión de Salida)

Presión 101325 Pa

Temperatura 300 K

Pared boquilla (Wall)

Material Cobre

4.3.1 VARIACIÓN DE PARÁMETROS EN LA SIMULACIÓN

El comportamiento del chorro de plasma, depende de diversos factores como se mostró en la sección 3.2.4, factores como la velocidad, la presión, el flujo de masa y el diámetro de la boquilla, son restringidos por la consideración del modelo de una boquilla ideal, en donde los datos obtenidos a partir del modelo ideal [15] son considerados al definir las condiciones de frontera.

Los parámetros que cambiaron durante en la simulación son la Potencia (corriente * voltaje), y el gas. Ver Tabla 3.2.

La potencia producida por el arco eléctrico y el voltaje suministrado por unidad de volumen, se definen como energía extra al modelo (ver ec. 3.5) Dicha energía extra (S_{ii}), es la energía necesaria para ionizar todo el gas que pasa a través del arco eléctrico y producir reacciones en el plasma para obtener el chorro o jet.

Conociendo el flujo másico de 0.002 kg/s y el peso atómico (para el caso del Argón) 39.948 g/mol utilizando la Ley de Avogadro, (volumen- cantidad), obtengo que 0.05 moles de Argón, pasan a través del arco eléctrico por segundo, la energía de primera ionización para el argón es de 1520 kJ/mol. Por lo que la potencia necesaria para que el arco eléctrico ionice todo el gas es de 76 kW. Dando como resultado que la energía necesaria para ionizar todo el gas es de $4.08 \cdot 10^{11} \text{ W/m}^3$. Esta energía por unidad de volumen se calculó para la región entre el cátodo y el ánodo, a la entrada de la boquilla, donde se tiene un volumen de $1.86 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3$. Ver figura 4.5.

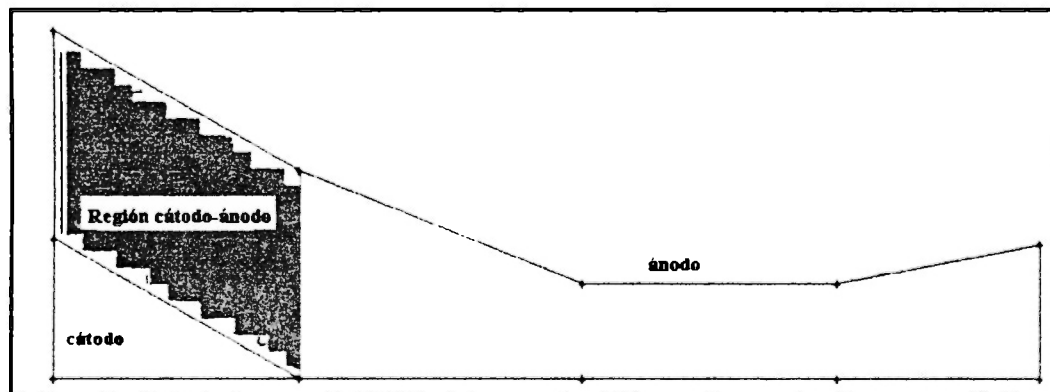


Fig. 4.5 Región cátodo-ánodo

Ahora sabemos que la energía necesaria para ionizar todo el gas es de $4.08 \cdot 10^{11} \text{ W/m}^3$. Energía máxima necesaria para trabajar con gas Argón, ya que de suministrar mayor energía a ésta, se estará desgastando y quemando el cátodo y la boquilla. De suministrar menor cantidad de energía a está será nuestro principal enfoque para el análisis del comportamiento de chorros o jet de plasma.

Para el gas Nitrógeno se realizaron cálculos semejantes a los del Argón, en donde, su masa molar es de 14.1g/mol, (recordando que el nitrógeno es un gas diatómico), la energía de primera ionización es de 1402 kJ/mol, la potencia necesaria será entonces de 200 kW y la energía necesaria para ionizar todo el gas Nitrógeno es de $1.07 \cdot 10^{12} \text{ W/m}^3$. Para el mismo volumen considerado en la fig 4.5.

Dadas las restricciones del paquete computacional, el valor de energía máximo aceptado es de $9.00 \cdot 10^{11}$. Por lo que los cálculos para la ionización completa del gas Nitrógeno no pueden ser realizados. Se tomó la decisión de comparar el comportamiento del gas Nitrógeno con el gas Argón. La tabla 4.2 nos muestra los datos de los diferentes experimentos realizados.

Experimento No.	Gas Utilizado	Potencia Utilizada kW	Potencia (S_k) W/m^3	Datos de Entrada
1	Ar	76	$4.08 \cdot 10^{11}$	Ctes.
2	Ar	60	$3.22 \cdot 10^{11}$	Ctes.
3	Ar	50	$2.68 \cdot 10^{11}$	Ctes.
4	Ar	40	$2.15 \cdot 10^{11}$	Ctes.
5	Ar	30	$1.61 \cdot 10^{11}$	Ctes.
6	Ar	22.5	$1.21 \cdot 10^{11}$	Ctes.
7	Ar	15	$8.10 \cdot 10^{10}$	Ctes.
8	N ₂	170	$9.00 \cdot 10^{11}$	Ctes.
9	N ₂	76	$4.08 \cdot 10^{11}$	Ctes.

Tabla 4.2 Datos Experimentales

Después de definir la tabla de datos para la experimentación del comportamiento del jet de plasma doy paso a la parte de simulación.

4.3.2 SIMULACIÓN DEL JET SUPERSÓNICO.

Una vez establecidos las condiciones iniciales y de frontera, se prosigue con la simulación.

Los factores de convergencia (en los residuales) para el análisis de resultados dentro de la simulación, son de $1 \cdot 10^{-03}$.

Existen algunos modelos que debido a lo complejidad de estos, es difícil lograr la convergencia. El análisis del modelo del chorro de plasma es un modelo complejo, por lo que los factores de convergencia no alcanzan el valor de $1 \cdot 10^{-03}$ en todos los casos, sin embargo se estabilizan en ciertos valores muy cercanos al de la convergencia.

El número de iteraciones para cada experimento rebasa las 1700, ya que es, en este número de iteraciones donde los factores de convergencia para el modelo se estabilizan.

El comportamiento del chorro de plasma se analizará para 4 diferentes parámetros que son: La velocidad del chorro de plasma, la temperatura del chorro de plasma, la longitud del chorro de plasma y el gas utilizado para producir el plasma. Siendo de mayor importancia la temperatura alcanzada en el chorro de plasma.

Los datos obtenidos para dichas simulaciones se muestran en la tabla 4.3.

Experimento	Temperatura Máx Alcanzada (K)	Velocidad Max. (m/s)	Longitud Tmax – Lmax (m)	Gas Utilizado
1	17 664	2 351	0.08 – 0.275	Argón
2	17 560	2 181	0.05 – 0.25	Argón
3	17 414	1 863	0.04 – 0.225	Argón
4	17 281	1 778	0.03 - 0.15	Argón
5	16 519	1 540	0.03 – 0.125	Argón
6	14 600	1 004	0.03 – 0.10	Argón
7	11 543	727	0.025 – 0.075	Argón
8	25 345	3 250	0.075 - 0.4	Nitrógeno
9	4 757	2 175	0.06 - 0.125	Nitrógeno

Tabla 4.3 Resultados de la Simulación.

En la tabla 4.3 se observan los resultados obtenidos dentro de la simulación realizada en FLUENT.

La temperatura máxima alcanzada en el chorro de plasma se localiza en la zona central como se esperaba (ver figura 3.8), y la longitud máxima de esta zona está descrita en el mismo recuadro, expresada como Longitud de la temperatura máxima. (Tmax). La longitud máxima del chorro (Lmax) también está descrita en la tabla 4.3 y por último la velocidad máxima alcanzada en la zona central de la flama y el gas utilizado para cada experimento realizado.

4.4 INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

A continuación presento los contornos de temperatura en el chorro de plasma para cada experimento realizado.

EXPERIMENTO No. 1

Gas utilizado: Argón
Vel. Entrada: 250m/s

$S_h: 4.08 \cdot 10^{11} \text{ W/m}^3$
Potencia: 76 kW

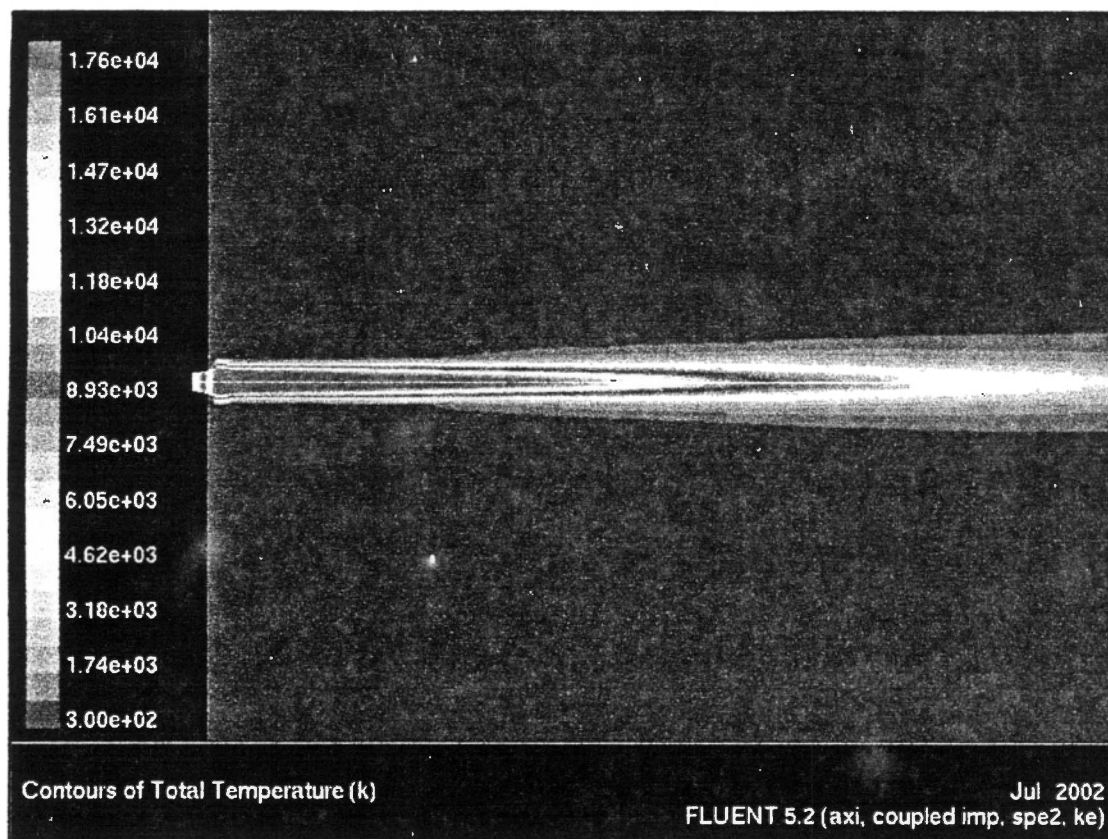


Fig. 4.6 Experimento No.1

La longitud máxima del chorro es de 27.5 cm con una velocidad máxima de 2 351 m/s y una temperatura máxima de 17 664 K.

Se puede observar la distribución de la flama, la formación de la zona central (el cono rojo a la salida de la boquilla) y la zona desarrollada (zona de mezcla entre el ambiente y el argón).

EXPERIMENTO No. 2

Gas utilizado: Argón

Vel. Entrada: 250m/s

$S_h: 3.22 \cdot 10^{11} \text{ W/m}^3$

Potencia: 60 kW

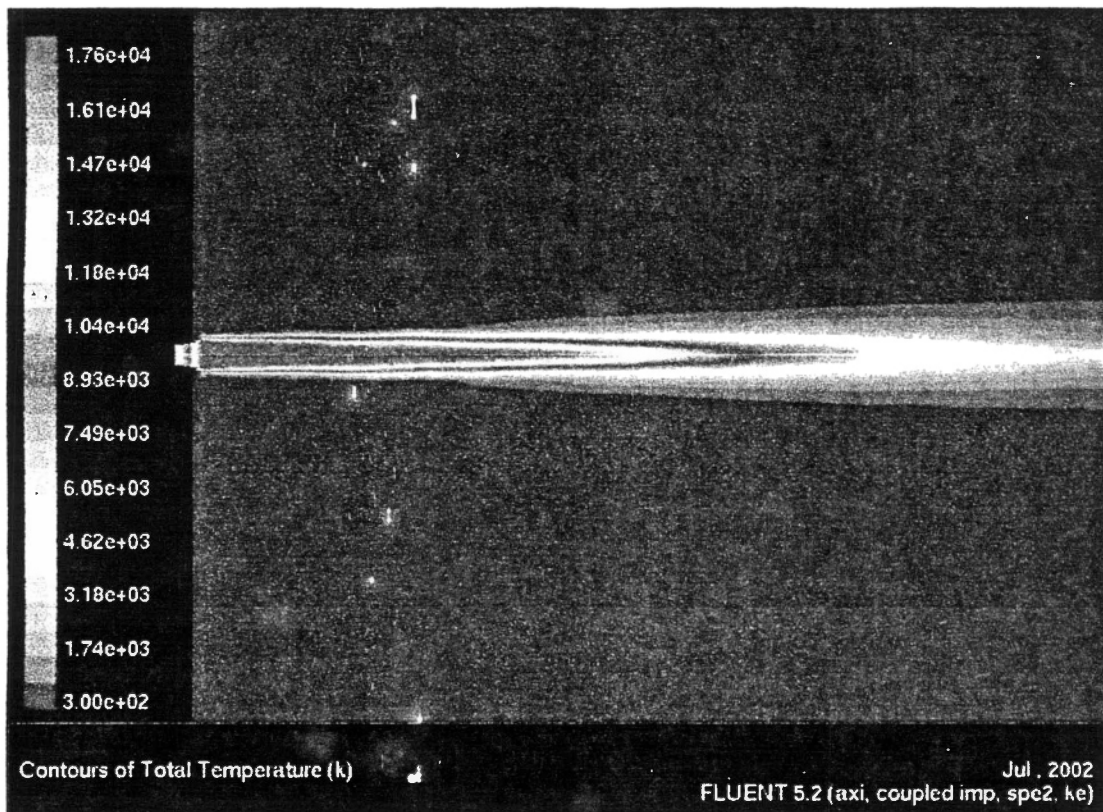


Fig. 4.7 Experimento No.2

La longitud máxima del chorro es de 25 cm con una velocidad máxima de 2 181 m/s y una temperatura máxima de 17 560 K.

EXPERIMENTO No. 3

Gas utilizado: Argón

Vel. Entrada: 250m/s

$S_h: 2.68 \cdot 10^{11} \text{ W/m}^3$

Potencia: 50 kW

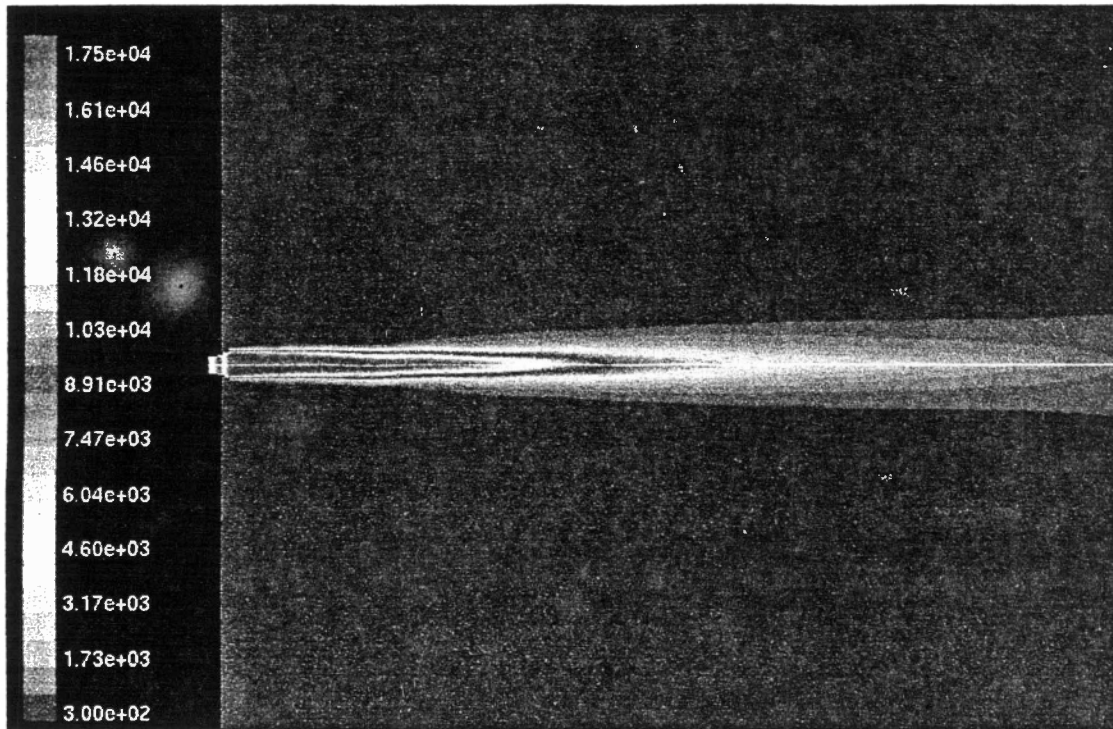


Fig. 4.8 Experimento No.3

La longitud máxima del chorro es de 22.5 cm con una velocidad máxima de 1 863 m/s y una temperatura máxima de 17 414 K.

EXPERIMENTO No. 4
Gas utilizado: Argón
Vel. Entrada: 250m/s
 $S_h: 2.15 \cdot 10^{11} \text{ W/m}^3$
Potencia: 40 kW

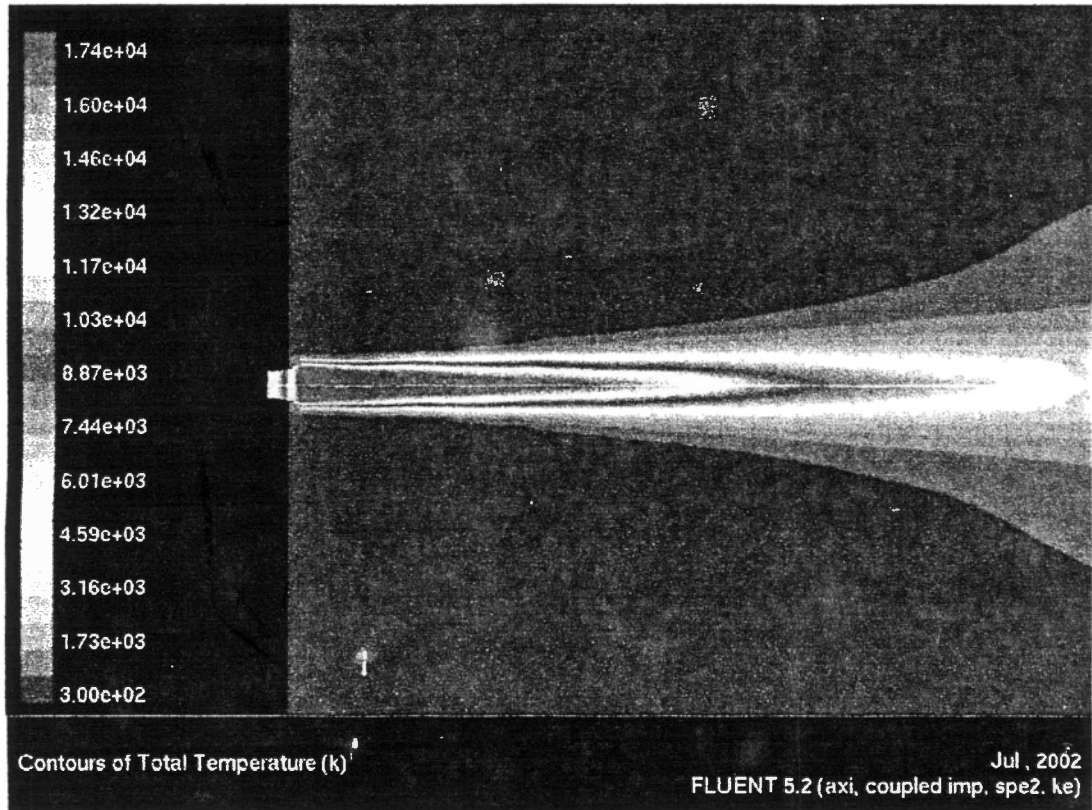


Fig. 4.9 Experimento No.4

La longitud máxima del chorro es de 15 cm con una velocidad máxima de 1 778 m/s y una temperatura máxima de 17 281 K.

EXPERIMENTO No. 5

Gas utilizado: Argón
Vel. Entrada: 250m/s
 $S_h: 1.61 \cdot 10^{11} \text{ W/m}^3$
Potencia: 30 kW

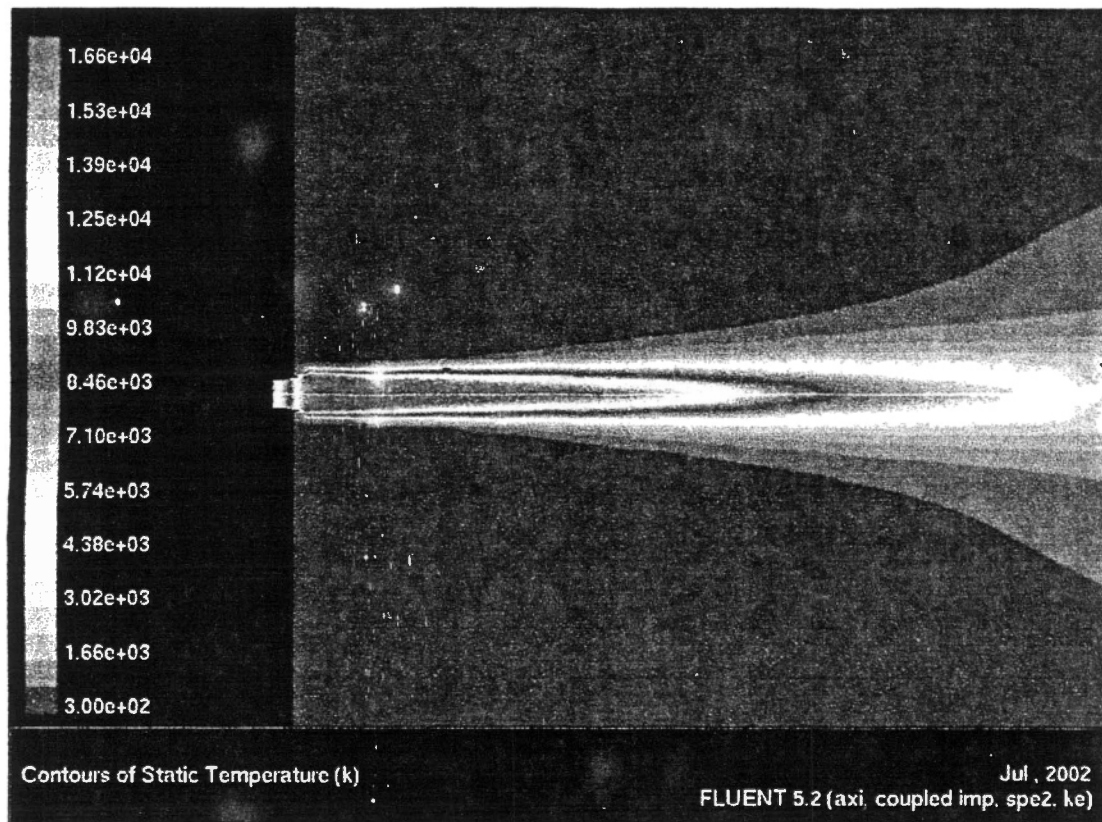


Fig. 4.10 Experimento No.5

La longitud máxima del chorro es de 12.5 cm con una velocidad máxima de 1 540 m/s y una temperatura máxima de 16 519 K.

EXPERIMENTO No. 6

Gas utilizado: Argón
Vel. Entrada: 250m/s
 $S_h: 1.21 \cdot 10^{11} \text{ W/m}^3$
Potencia: 22.5 kW

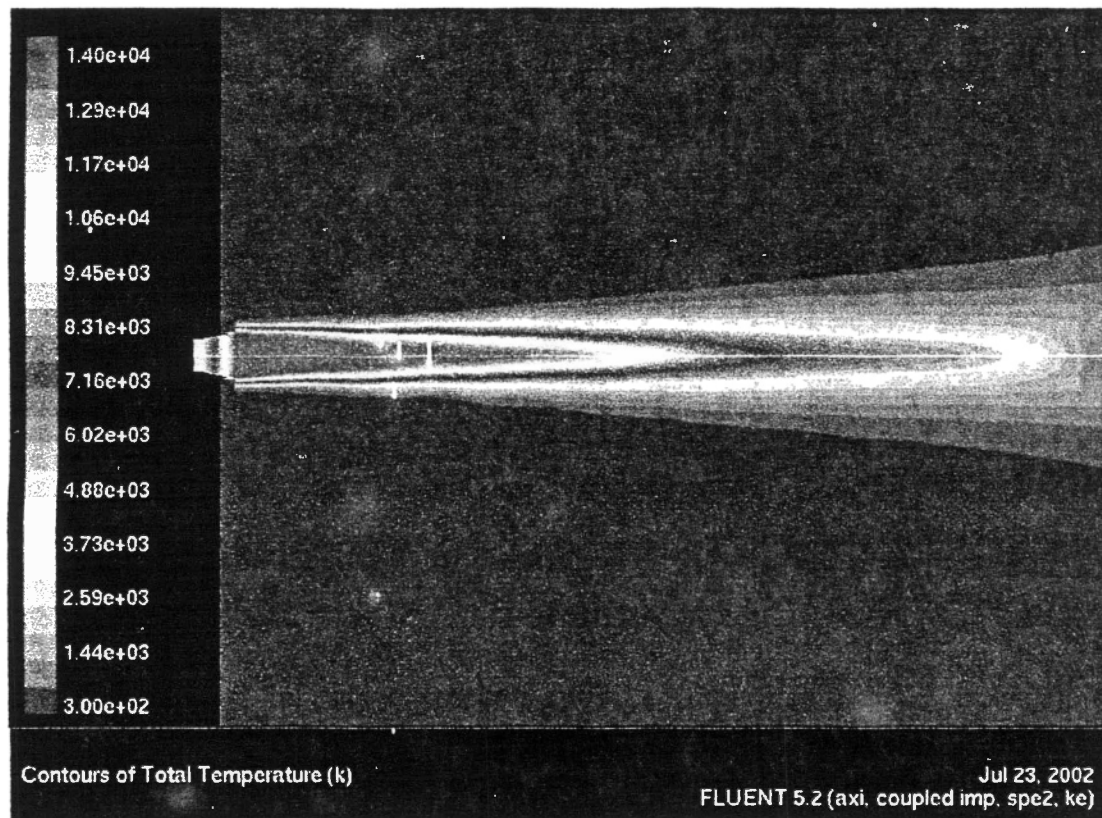


Fig. 4.11 Experimento No.6

La longitud máxima del chorro es de 10 cm con una velocidad máxima de 1 004 m/s y una temperatura máxima de 14 600 K.

EXPERIMENTO No. 7

Gas utilizado: Argón
Vel. Entrada: 250m/s
 S_b : $8.10 \cdot 10^{10}$ W/m³
Potencia: 15 kW

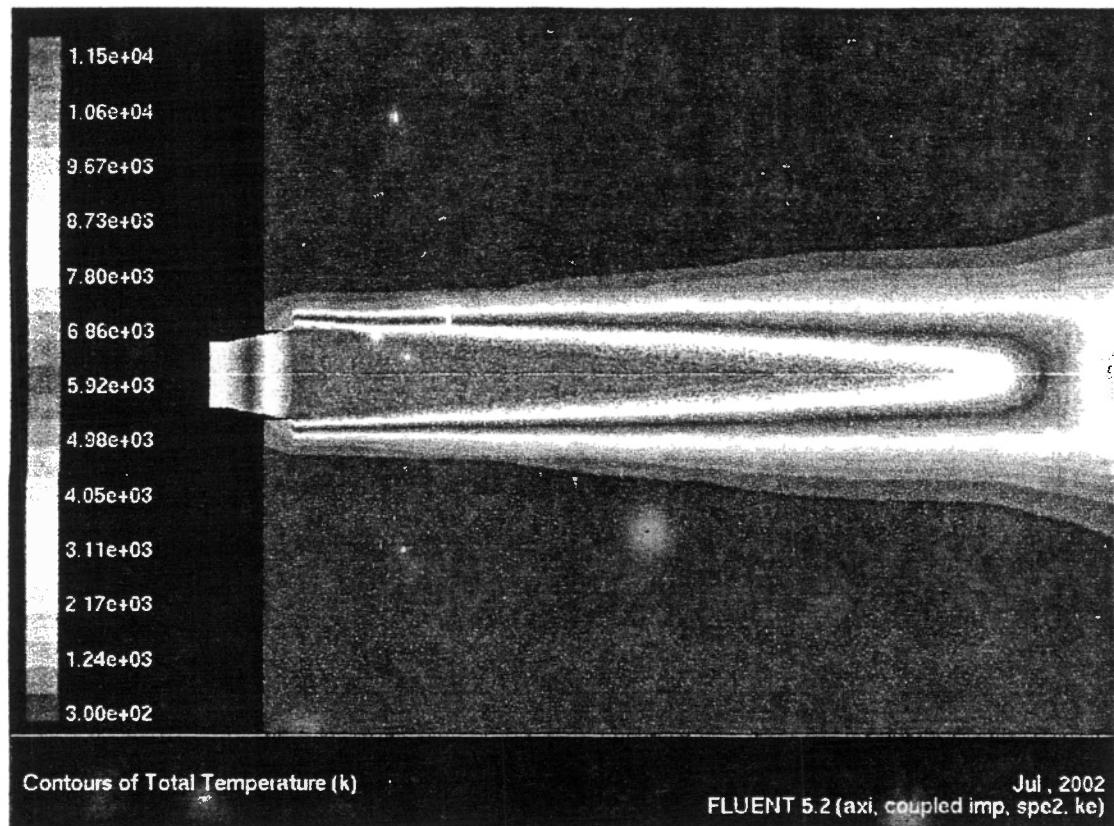


Fig. 4.12 Experimento No.7

La longitud máxima del chorro es de 7.5 cm con una velocidad máxima de 727 m/s y una temperatura máxima de 11 543 K.

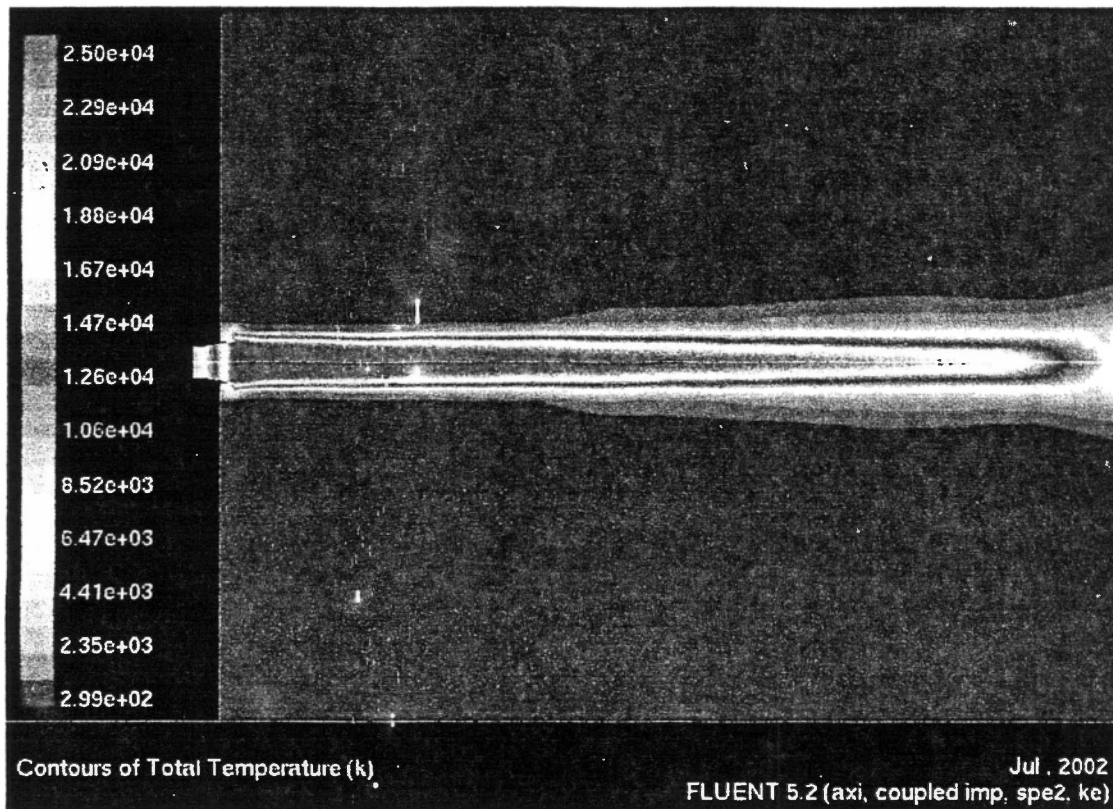
EXPERIMENTO No. 8

Gas utilizado: Nitrógeno

Vel. Entrada: 250m/s

 $S_h: 9.00 \cdot 10^{11} \text{ W/m}^3$

Potencia: 170 kW

*Fig. 4.13 Experimento No.8*

La longitud máxima del chorro es de 40 cm con una velocidad máxima de 3 250 m/s y una temperatura máxima de 25 345 K.

EXPERIMENTO No. 9

Gas utilizado: Nitrógeno

Vel. Entrada: 250m/s

 $S_h: 4.08 \cdot 10^{11} \text{ W/m}^3$

Potencia: 76 kW

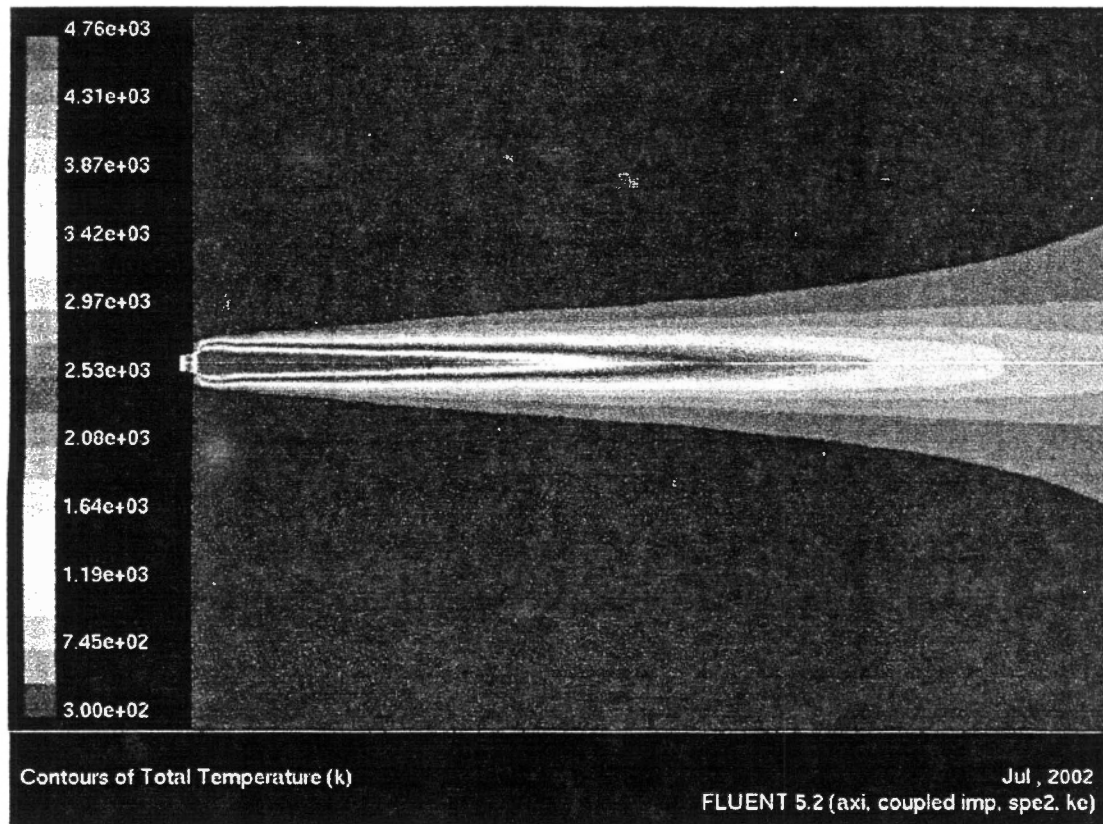


Fig. 4.14 Experimento No.9

La longitud máxima del chorro es de 12.5 cm con una velocidad máxima de 2 175 m/s y una temperatura máxima de 4 757 K.

En el presente capítulo me limité a plantear el proceso de la simulación, en el siguiente capítulo analizaré y haré algunas conclusiones sobre los resultados obtenidos en estas simulaciones.

5 CAPÍTULO CINCO: ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Por más de tres décadas el desarrollo del recubrimiento por rociado de plasma ha sido más empírico que científico. Esto debido principalmente a las dificultades del modelaje y la medición de algunas variables que influyen directamente en el proceso del rociado por plasma.

La interacción entre el gas y la energía suministrada a la pistola de plasma, en específico en la zona del cátodo, es una relación no del todo clara. Es por ello que a lo largo de la simulación y análisis numérico de la presente tesis, el enfoque principal se le da a estos dos factores que influyen en el proceso del rociado por plasma. Además estos factores influyen directamente en el comportamiento de la temperatura y la velocidad del chorro del plasma, como se mostrará en las siguientes secciones.

Durante el capítulo 4 me limité a describir el proceso de simulación y los resultados obtenidos durante el análisis numérico del chorro de plasma. No es sino hasta el desarrollo de este capítulo donde analizó los resultados, hago una serie de comparaciones, concluyo y doy algunas recomendaciones para la generación del chorro de plasma.

5.1 SELECCIÓN Y VALIDACIÓN DE UN JET SUPERSÓNICO DE PLASMA.

Para la selección y validación del jet o chorro de plasma, comparo el comportamiento de los chorros obtenidos en las simulaciones realizadas, donde los factores críticos dentro del comportamiento del chorro, como se mencionó en la sección 4.3.2 son: gas utilizado, temperatura, velocidad, longitud del chorro y la fracción de masa.

La posición está referida al eje de la flama o eje del chorro, es decir el eje axial, tomando como origen la salida de la boquilla.

Los datos obtenidos dentro del análisis numérico del chorro o jet de plasma se ven reflejados en las gráficas¹ siguientes.

¹ Gráficas obtenidas directamente del paquete FLUENT 5.

EXPERIMENTO No. 1

Gas utilizado: Argón
 Vel. Entrada: 250m/s
 $S_h: 4.08 \cdot 10^{11} \text{ W/m}^3$
 Potencia: 76 kW

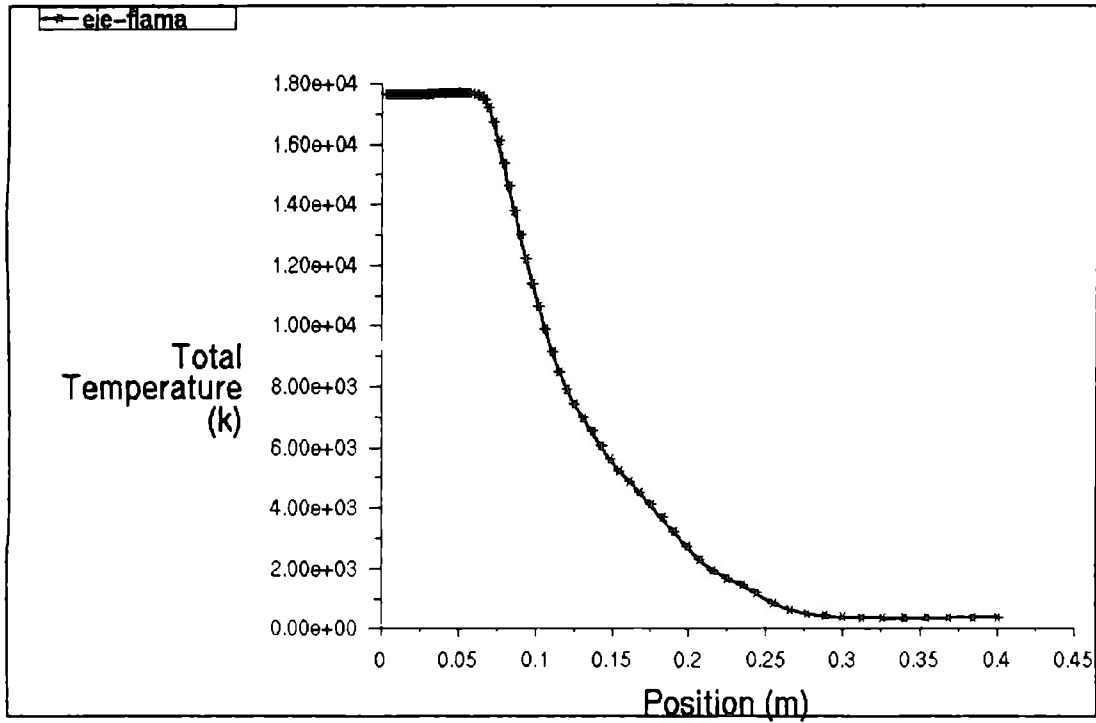


Fig. 5.1a Gráfica Temperatura vs Posición del Experimento No. 1

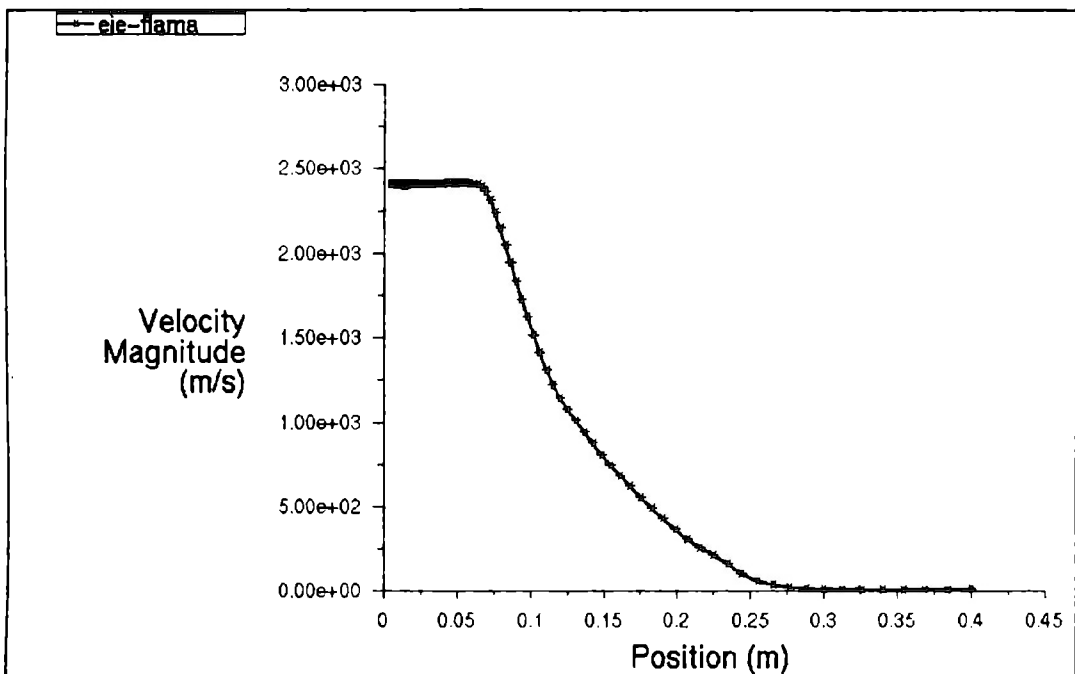


Fig. 5.1b Gráfica Velocidad vs Posición del Experimento No. 1

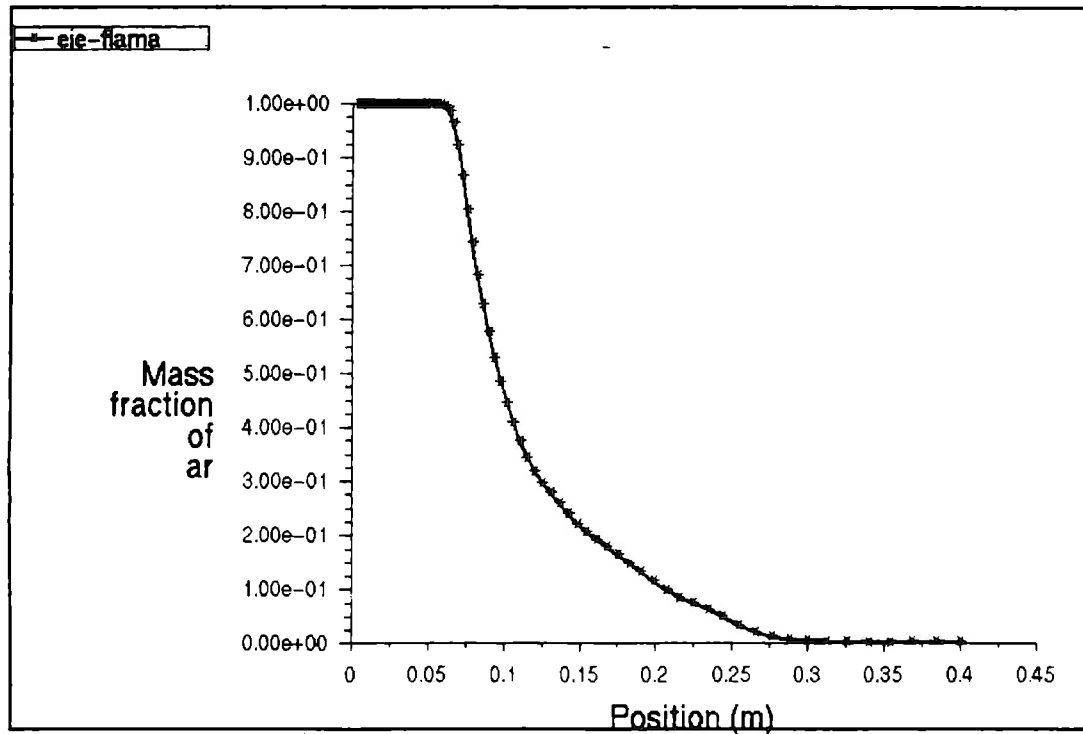


Fig. 5.1c Gráfica Frac. Masa vs Posición del Experimento No. 1

La longitud máxima del chorro es de 27.5 cm, como se puede observar en las figuras anteriores, con una velocidad máxima de 2 351 m/s (fig 5.1b) y una temperatura máxima de 17 664 K (fig 5.1a). La figura 5.1c nos muestra el comportamiento del argón dentro del chorro de plasma. En general el argón se conserva puro en la zona central del chorro.

Cabe señalar que dentro de la figura 5.1a y para el resto de las gráficas temperatura-posición, la temperatura mínima en la escala es de 0 K, con intervalos de 2 000 K, para el modelo la temperatura mínima es de 300 K, por lo que la gráfica se despega ligeramente del eje.

EXPERIMENTO No. 2

Gas utilizado: Argón

Vel. Entrada: 250m/s

 $S_h: 3.22 \cdot 10^{11} \text{ W/m}^3$

Potencia: 60 kW

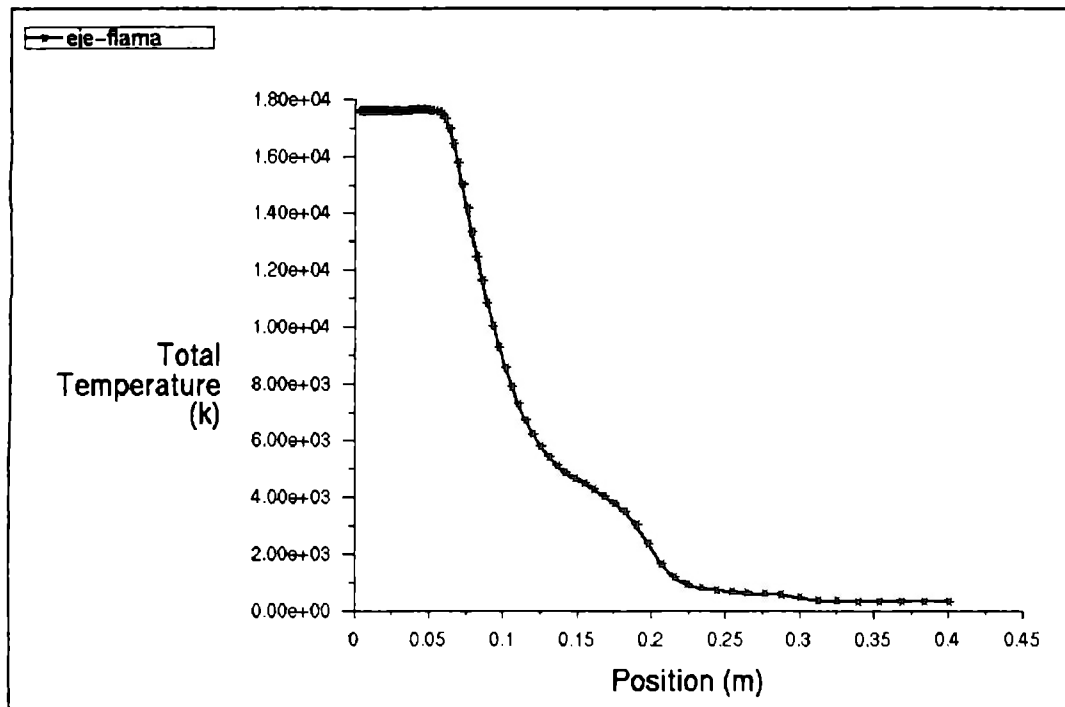


Fig. 5.2a Gráfica Temperatura vs Posición del Experimento No. 2

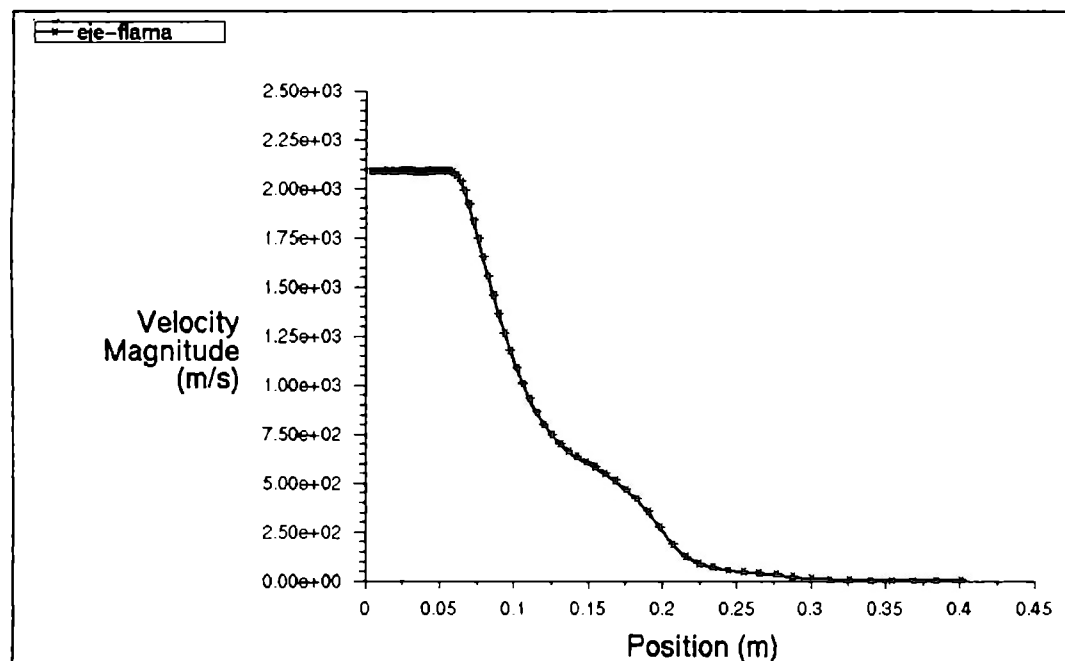


Fig. 5.2b Gráfica Velocidad vs Posición del Experimento No. 2

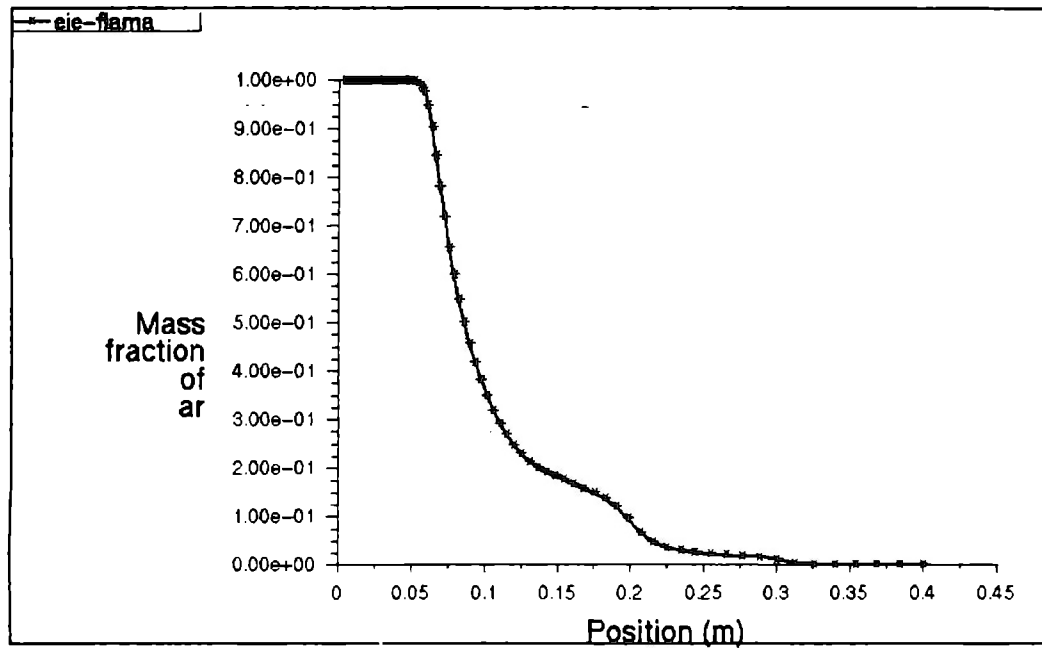


Fig. 5.2c Gráfica Fracc. de masa vs Posición del Experimento No. 2

La longitud máxima del chorro es de 25 cm con una velocidad máxima de 2 181 m/s y una temperatura máxima de 17 560 K. Como se puede observar en las figuras 5.2a, 5.2b, 5.2c.

EXPERIMENTO No. 3

Gas utilizado: Argón

Vel. Entrada: 250m/s

 $S_h: 2.68 \cdot 10^{11} \text{ W/m}^3$

Potencia: 50 kW

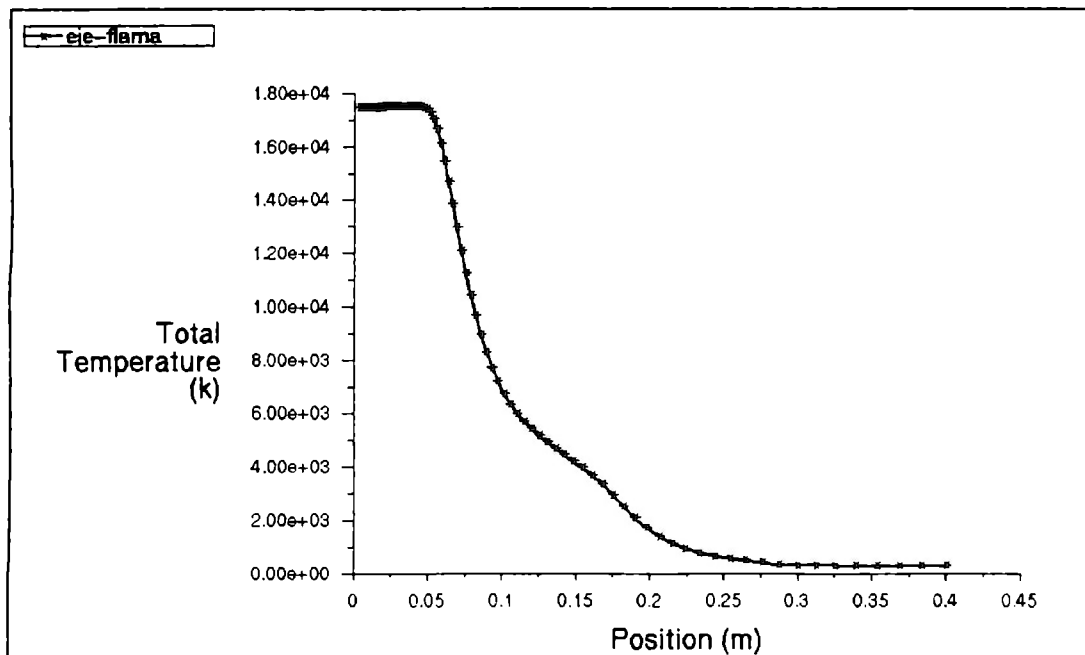


Fig. 5.3a Gráfica Temperatura vs Posición del Experimento No. 3

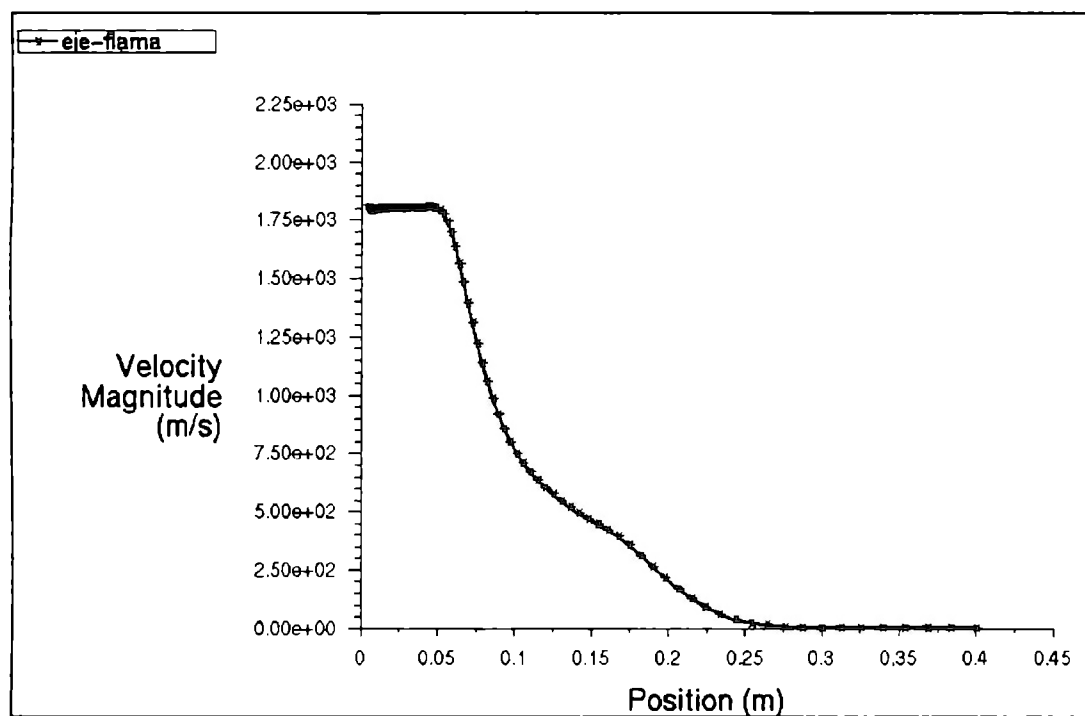


Fig. 5.3b Gráfica Velocidad vs Posición del Experimento No. 3

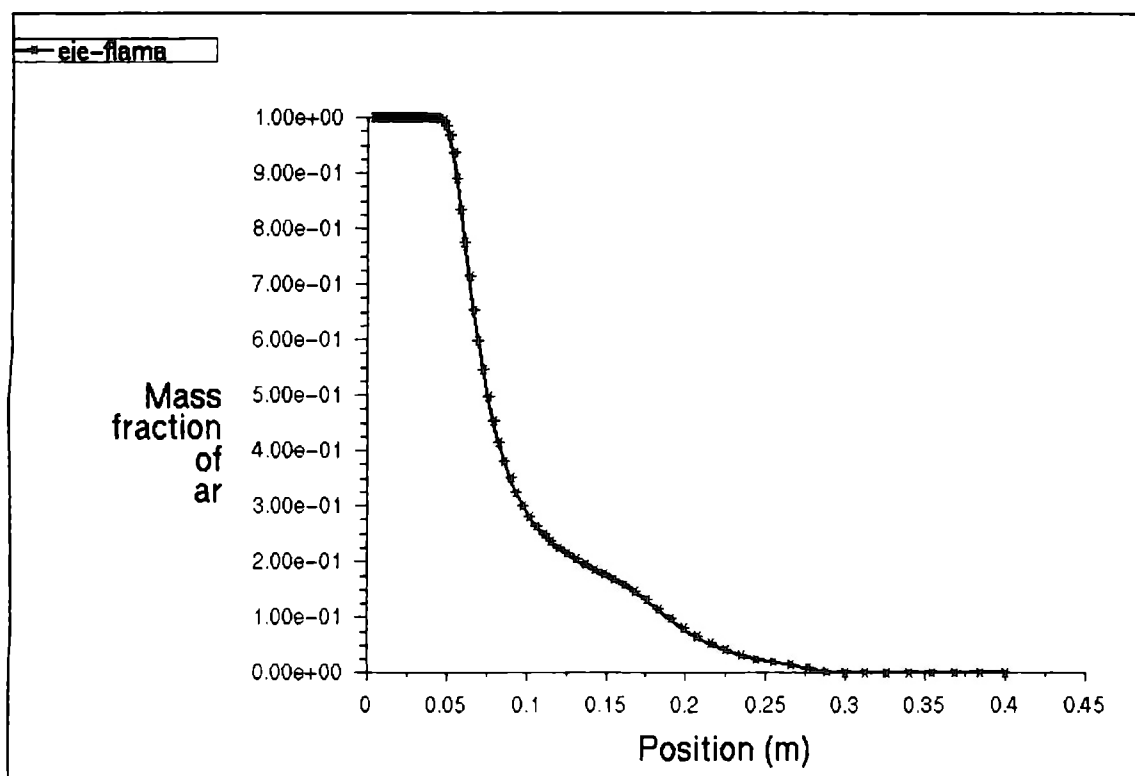


Fig. 5.3c Gráfica Fracc. de masa vs Posición del Experimento No. 3

La longitud máxima del chorro es de 25 cm con una velocidad máxima de 1 863 m/s y una temperatura máxima de 17 414 K. Ver figuras 5.3a, 5.3b, 5.3c.

EXPERIMENTO No. 4

Gas utilizado: Argón

Vel. Entrada: 250m/s

 $S_h: 2.15 \cdot 10^{11} \text{ W/m}^3$

Potencia: 40 kW

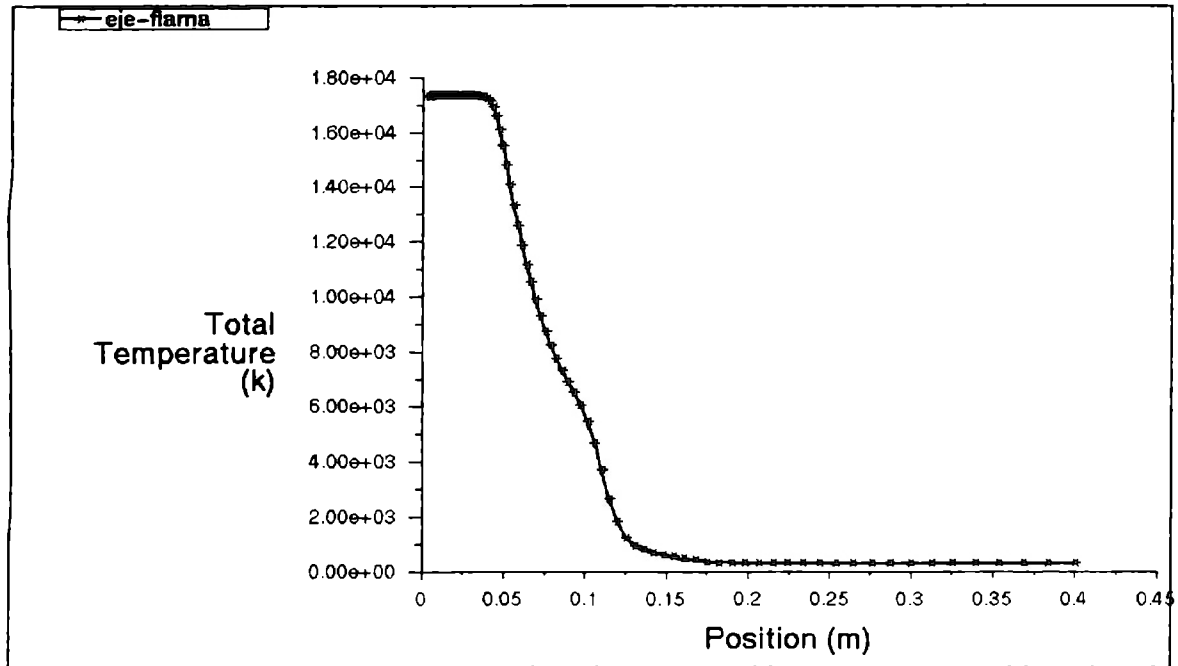


Fig. 5.4a Gráfica Temperatura vs Posición del Experimento No. 4

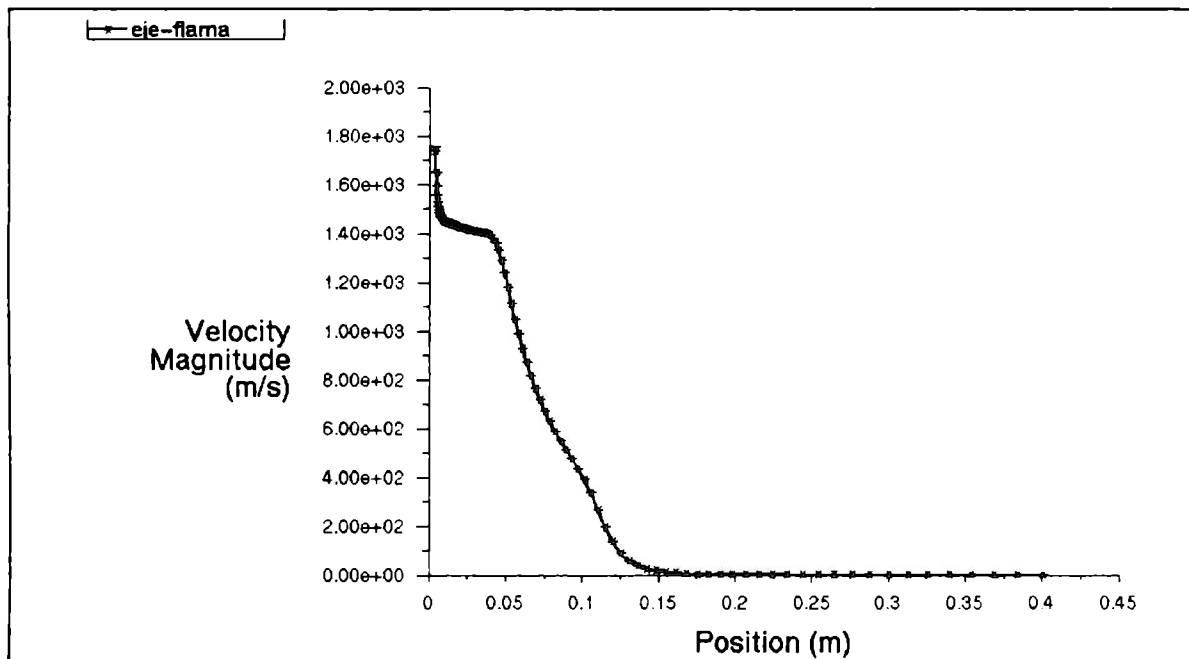


Fig. 5.4b Gráfica Velocidad vs Posición del Experimento No. 4

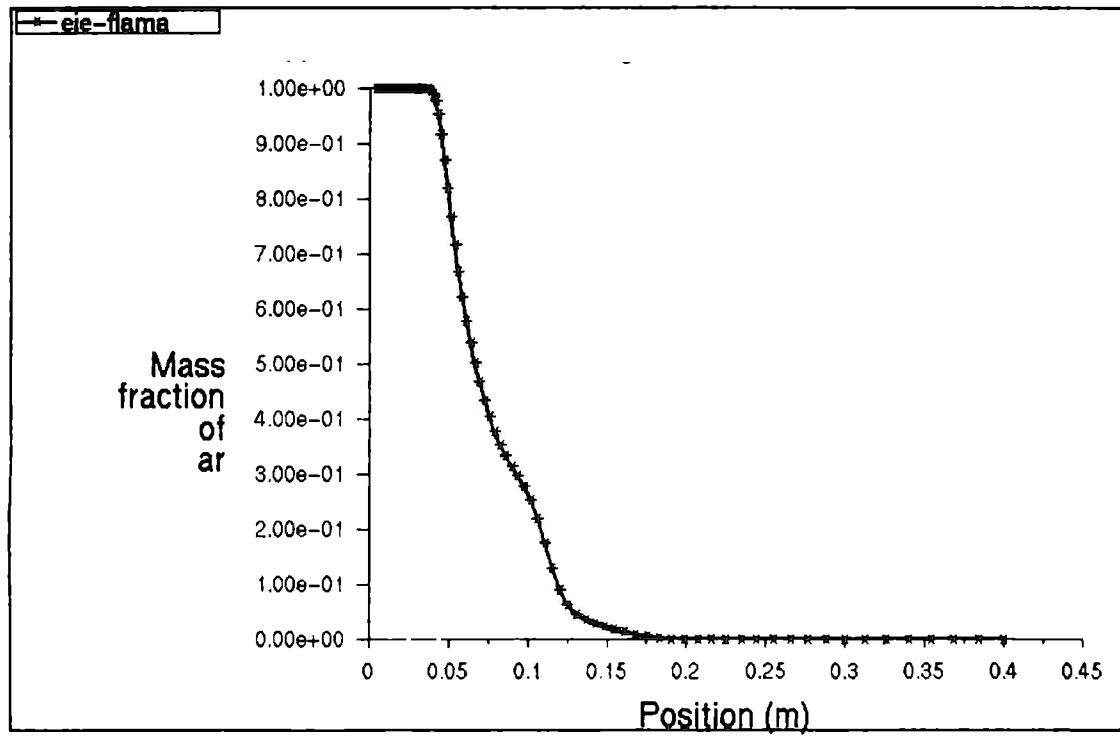


Fig. 5.4c Gráfica Fracc. de masa vs Posición del Experimento No. 4

La longitud máxima del chorro es de 15 cm con una velocidad máxima de 1 778 m/s y una temperatura máxima de 17 281 K.

EXPERIMENTO No. 5

Gas utilizado: Argón

Vel. Entrada: 250m/s

 $S_h: 1.61 \cdot 10^{11} \text{ W/m}^3$

Potencia: 30 kW

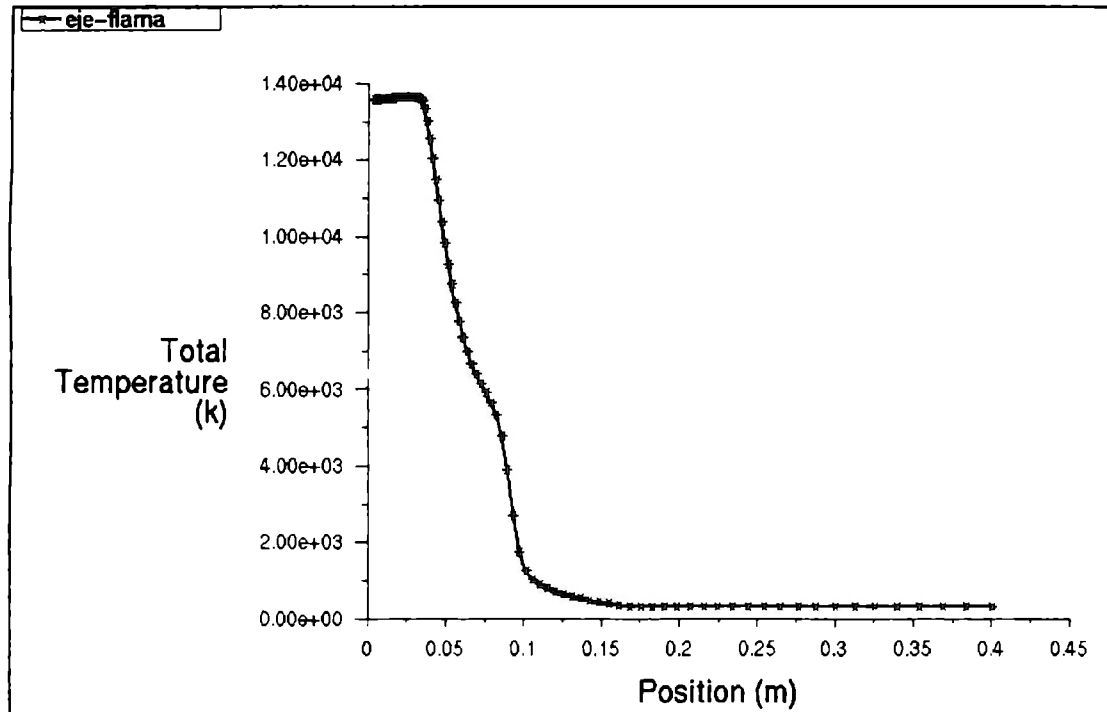


Fig. 5.5a Gráfica Temperatura vs Posición del Experimento No. 5

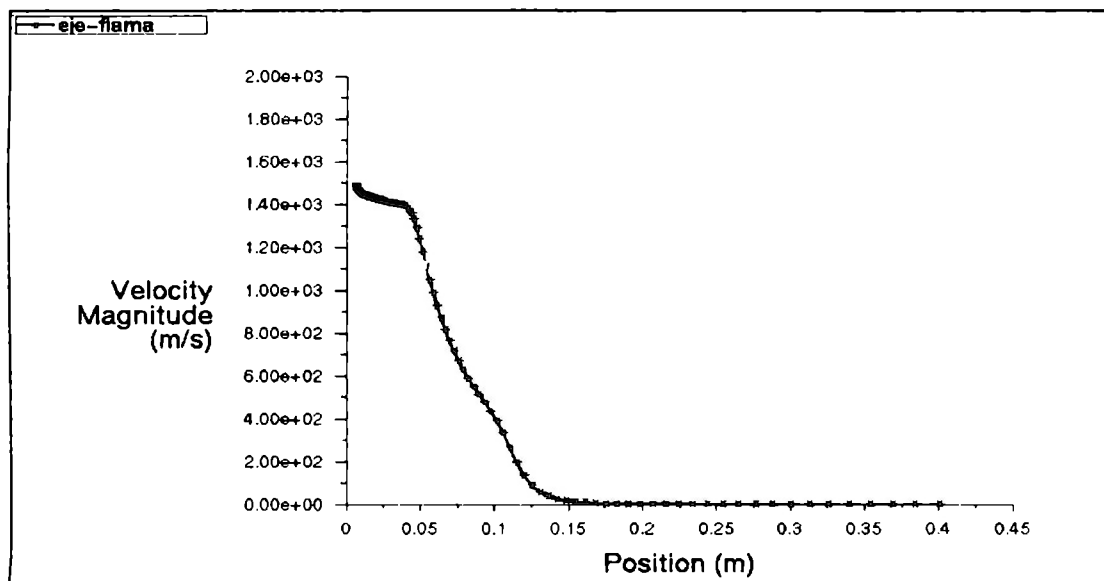


Fig. 5.5b Gráfica Velocidad vs Posición del Experimento No. 5

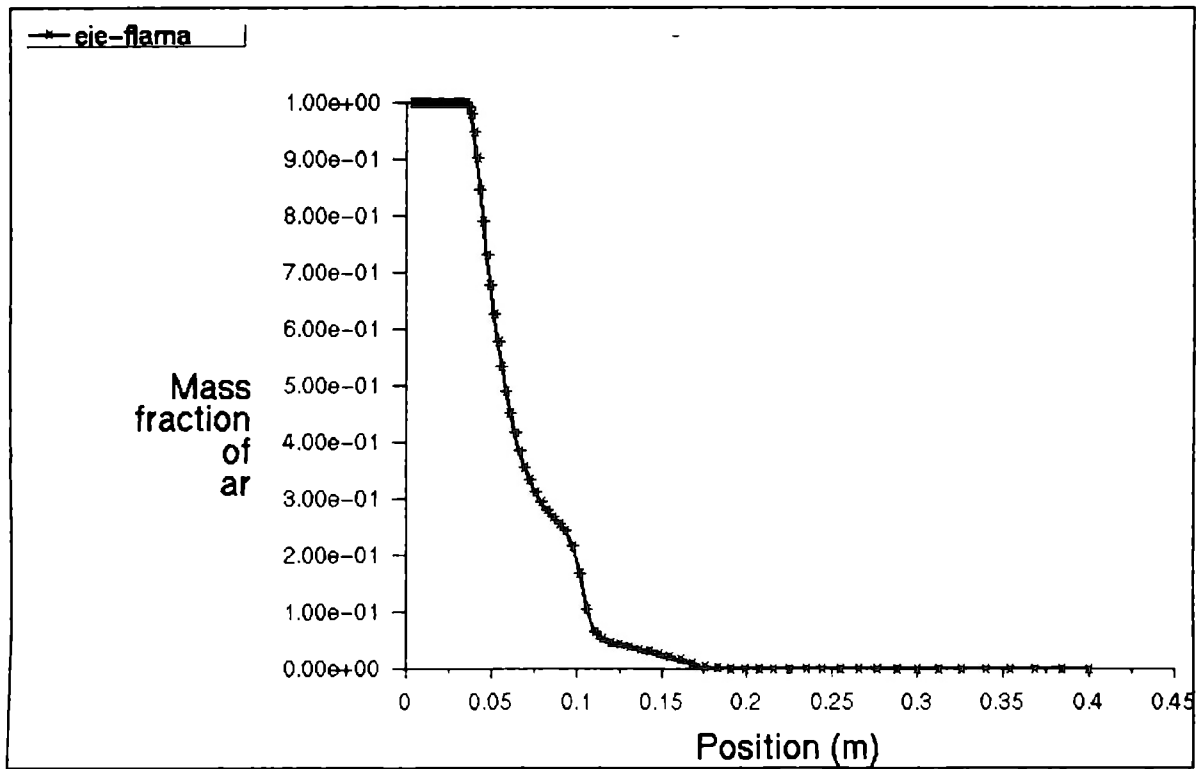


Fig. 5.5c Gráfica Fracc. de masa vs Posición del Experimento No. 5

La longitud máxima del chorro es de 12.5 cm con una velocidad máxima de 1 540 m/s y una temperatura máxima de 16 519 K.

EXPERIMENTO No. 6

Gas utilizado: Argón
 Vel. Entrada: 250m/s
 $S_b: 1.21 \cdot 10^{11} \text{ W/m}^3$
 Potencia: 22.5 kW

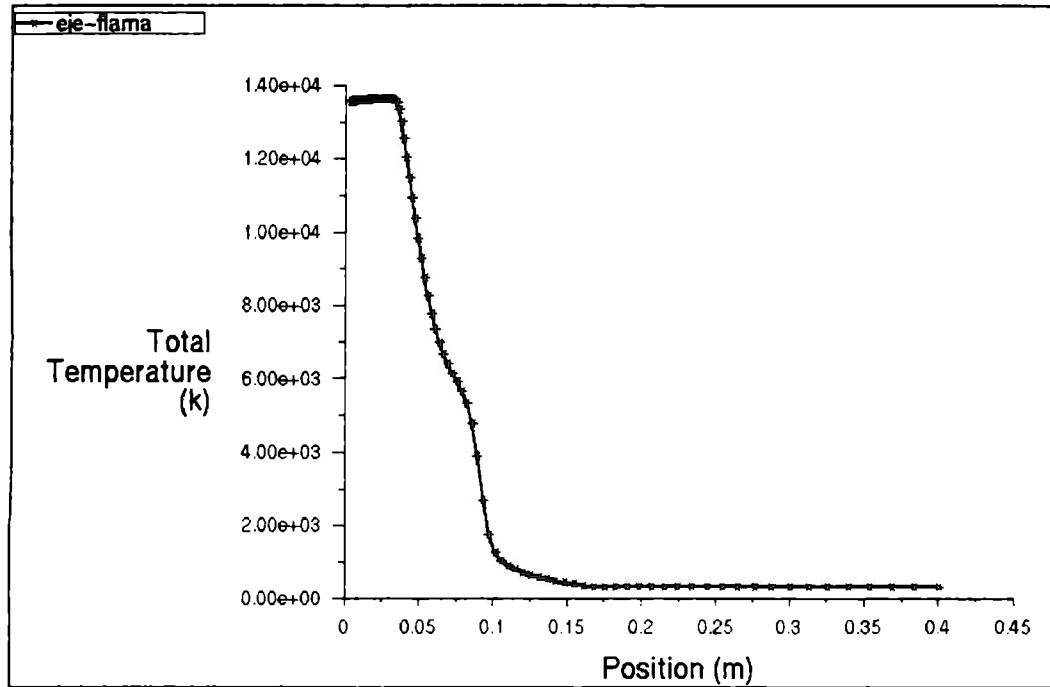


Fig. 5.6a Gráfica Temperatura vs Posición del Experimento No. 6

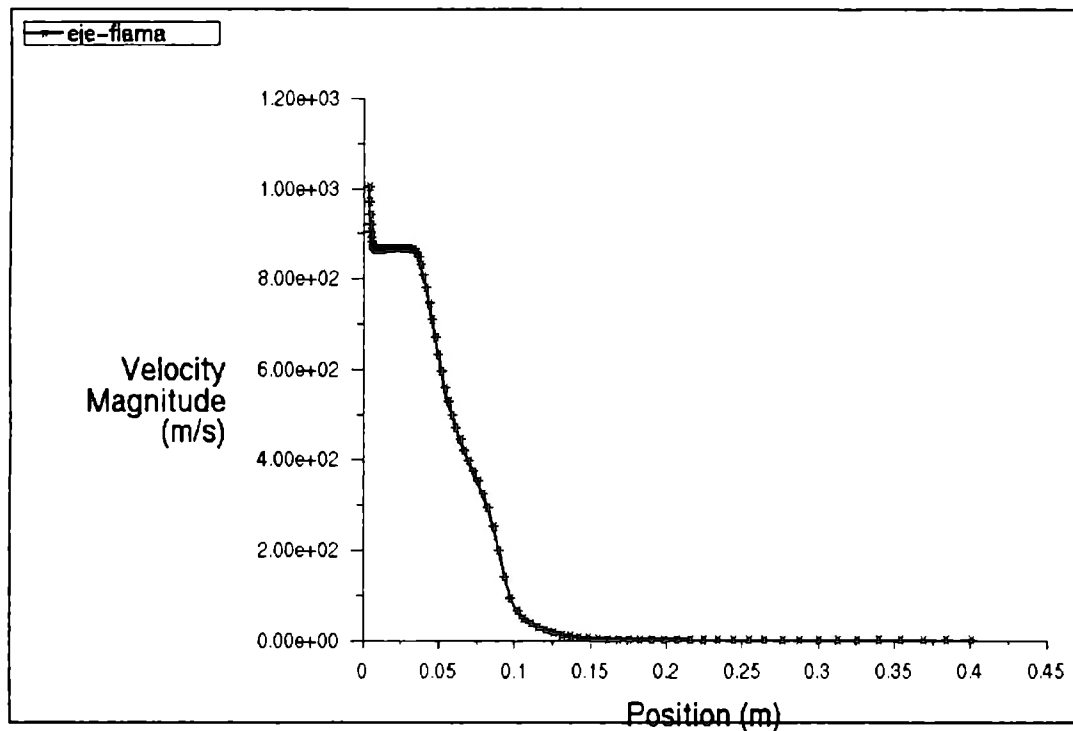


Fig. 5.6b Gráfica Velocidad vs Posición del Experimento No. 6

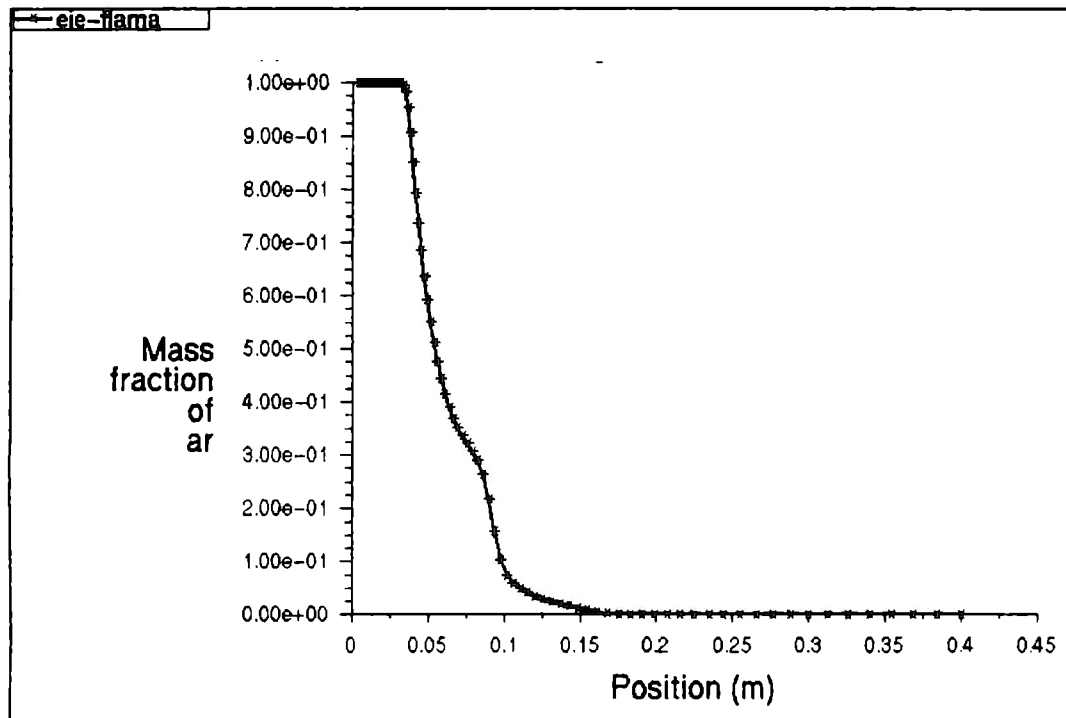


Fig. 5.6c Gráfica Fracc. de Masa vs Posición del Experimento No. 6

La longitud máxima del chorro es de 10 cm con una velocidad máxima de 1 004 m/s y una temperatura máxima de 14 600 K

EXPERIMENTO No. 7

Gas utilizado: Argón

Vel. Entrada: 250m/s

 $S_b: 8.10 \cdot 10^{10} \text{ W/m}^3$

Potencia: 15 kW

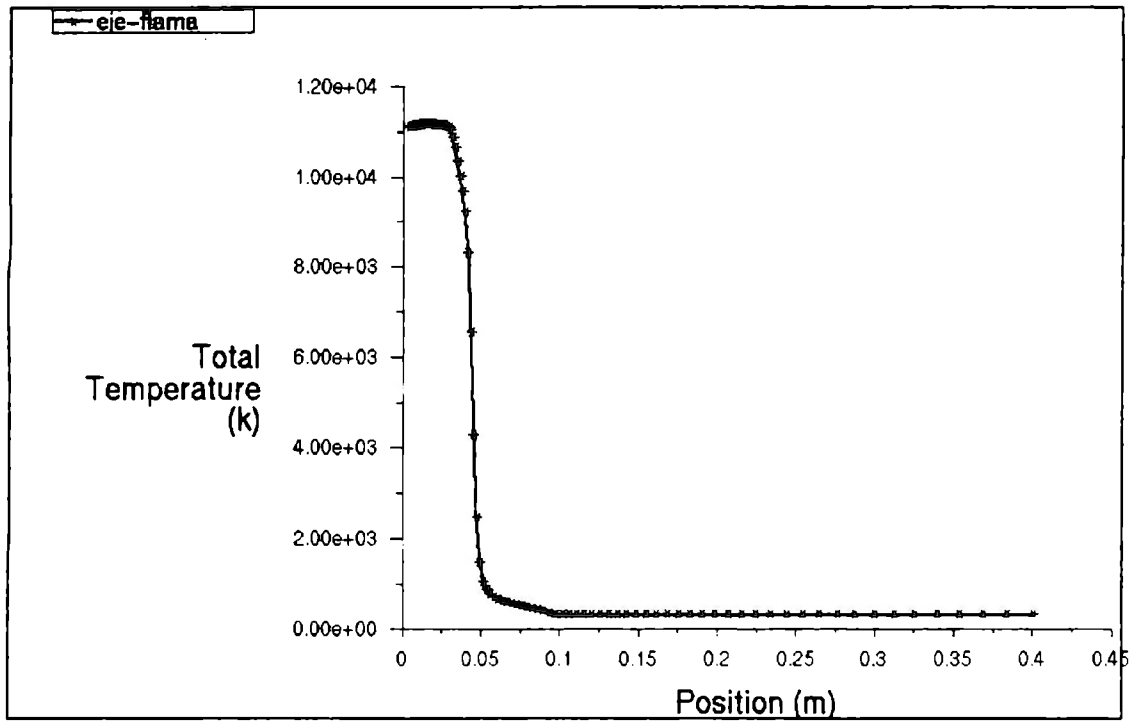


Fig. 5.7a Gráfica Temperatura vs Posición del Experimento No. 7

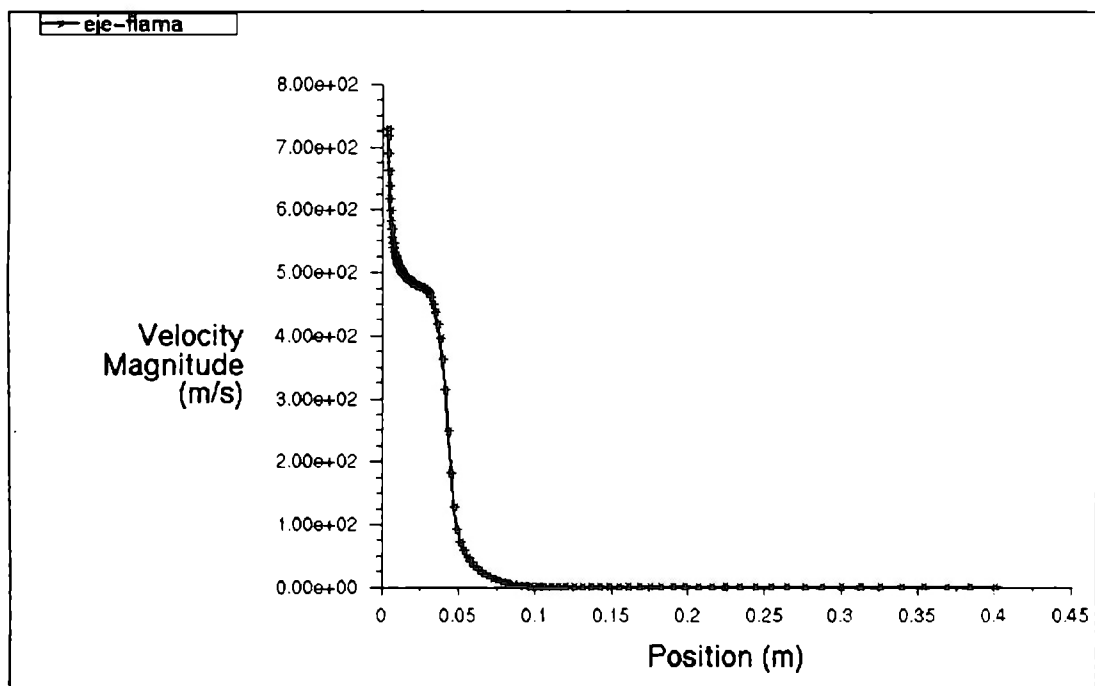


Fig. 5.7b Gráfica Velocidad vs Posición del Experimento No. 7

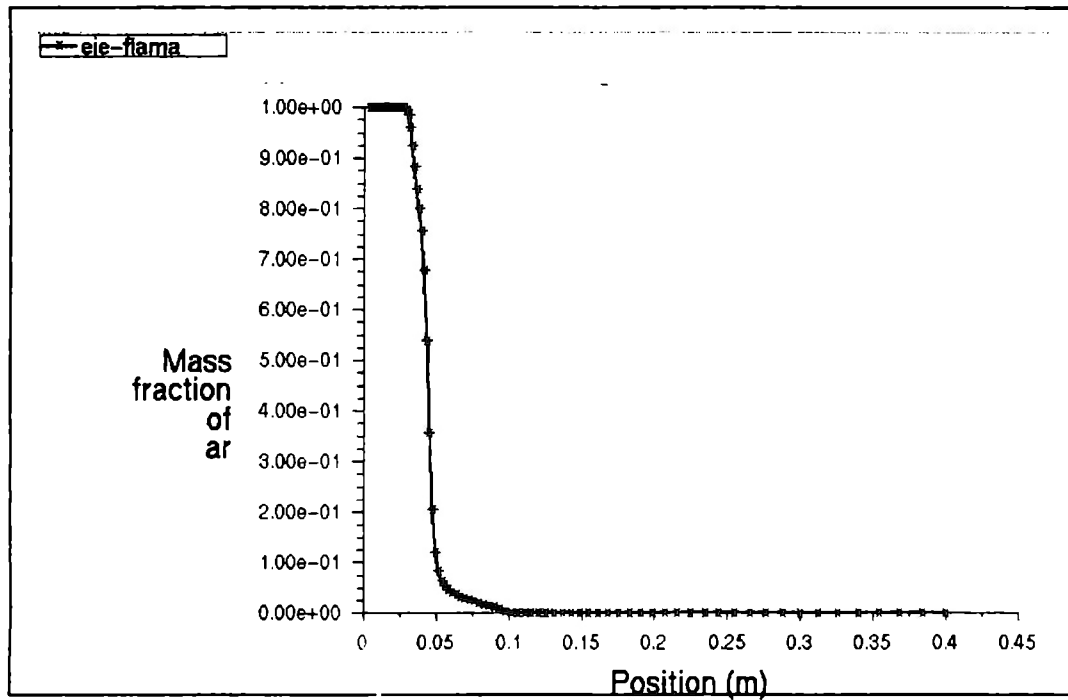


Fig. 5.7c Gráfica Fracc. de Masa vs Posición del Experimento No. 7

La longitud máxima del chorro es de 7.5 cm con una velocidad máxima de 727 m/s y una temperatura máxima de 11 543 K.

EXPERIMENTO No. 8

Gas utilizado: Nitrógeno

Vel. Entrada: 250m/s

 $S_h: 9.00 \cdot 10^{11} \text{ W/m}^3$

Potencia: 170 kW

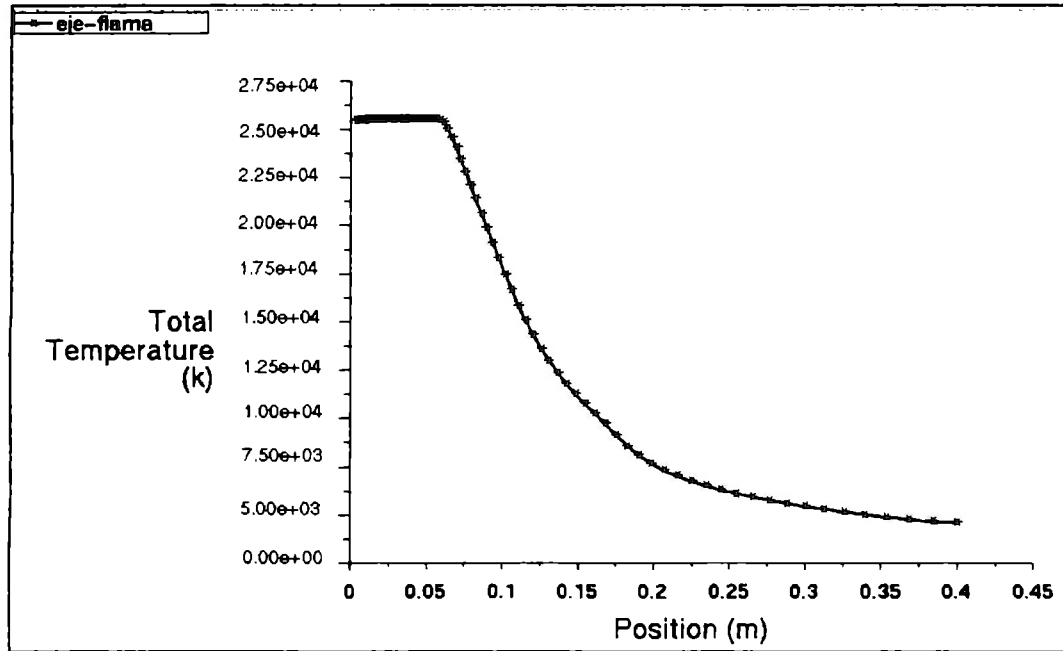


Fig. 5.8a Gráfica Temperatura vs Posición del Experimento No. 8

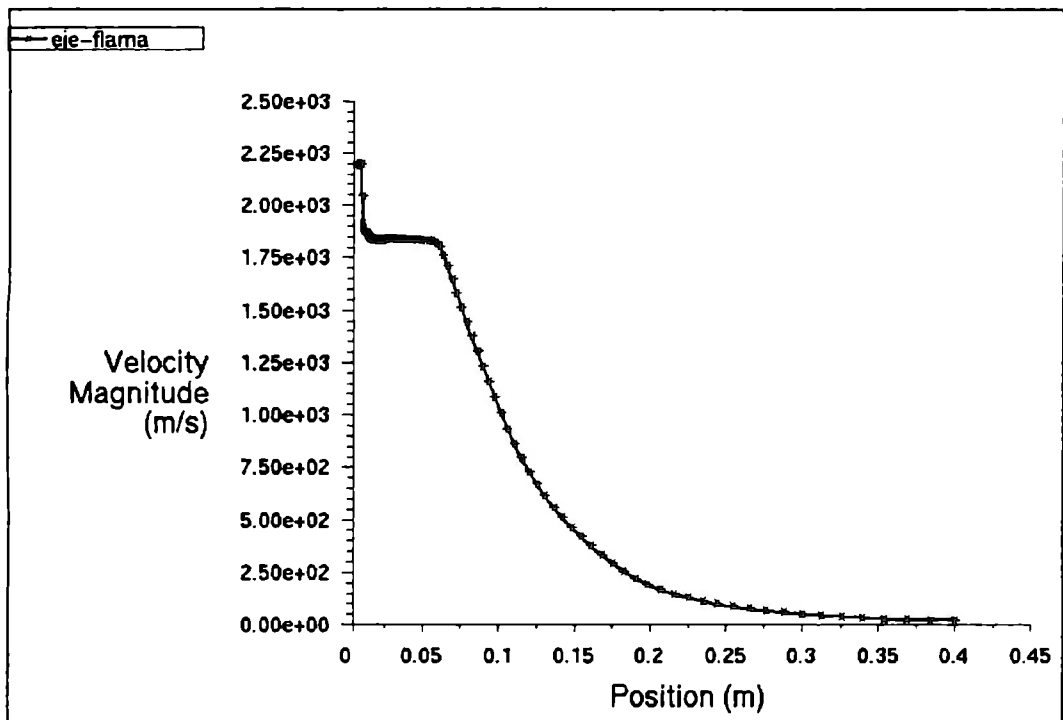


Fig. 5.8b Gráfica Velocidad vs Posición del Experimento No. 8

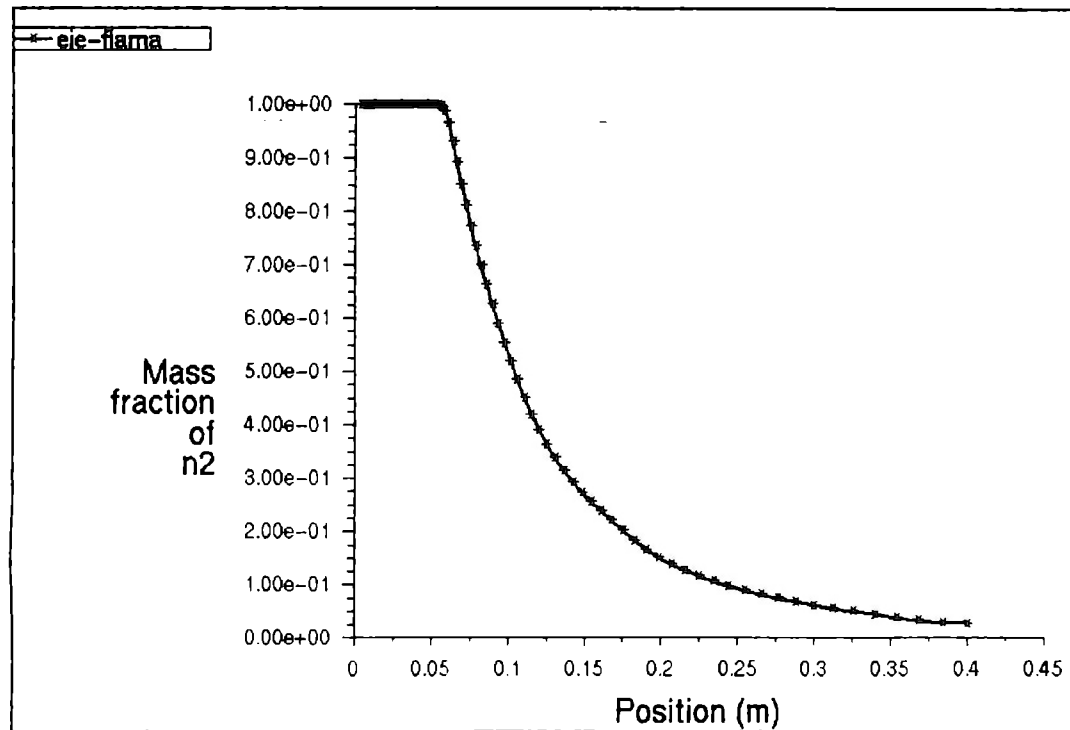


Fig. 5.8c Gráfica Fracc. de masa vs Posición del Experimento No. 8

La longitud máxima del chorro es de 40 cm con una velocidad máxima de 3 250 m/s y una temperatura máxima de 25 345 K.

Como se mencionó en el capítulo cuatro la energía necesaria para ionizar todo el gas Nitrógeno a un flujo de entrada de 0.002 kg/s, es casi de 200 kW, aún cuando las temperaturas obtenidas son muy altas, este experimento no es recomendable debido a que al inyectar los polvos de recubrimiento además de fundirse, se evaporarían antes de llegar al sustrato, por lo que no obtendríamos un buen recubrimiento.

Además, la distancia máxima de rociado es generalmente 20 cm, a esta distancia el chorro tiene una temperatura aproximada de 7 500 K, por lo que además de evaporar el recubrimiento estaremos fundiendo la pieza tratada (sustrato).

Por lo que este experimento queda descartado para futuras comparaciones.

EXPERIMENTO No. 9

Gas utilizado: Nitrógeno

Vel. Entrada: 250m/s

 $S_h: 4.08 \cdot 10^{11} \text{ W/m}^3$

Potencia: 76 kW

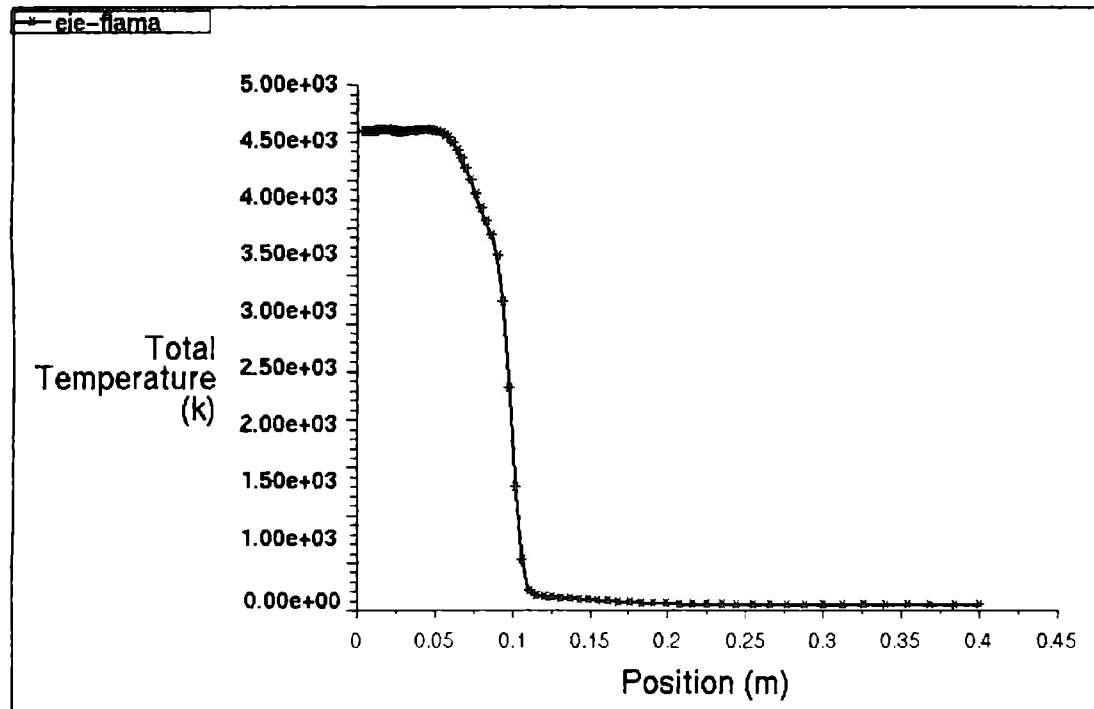


Fig. 5.9a Gráfica Temperatura vs Posición del Experimento No. 9

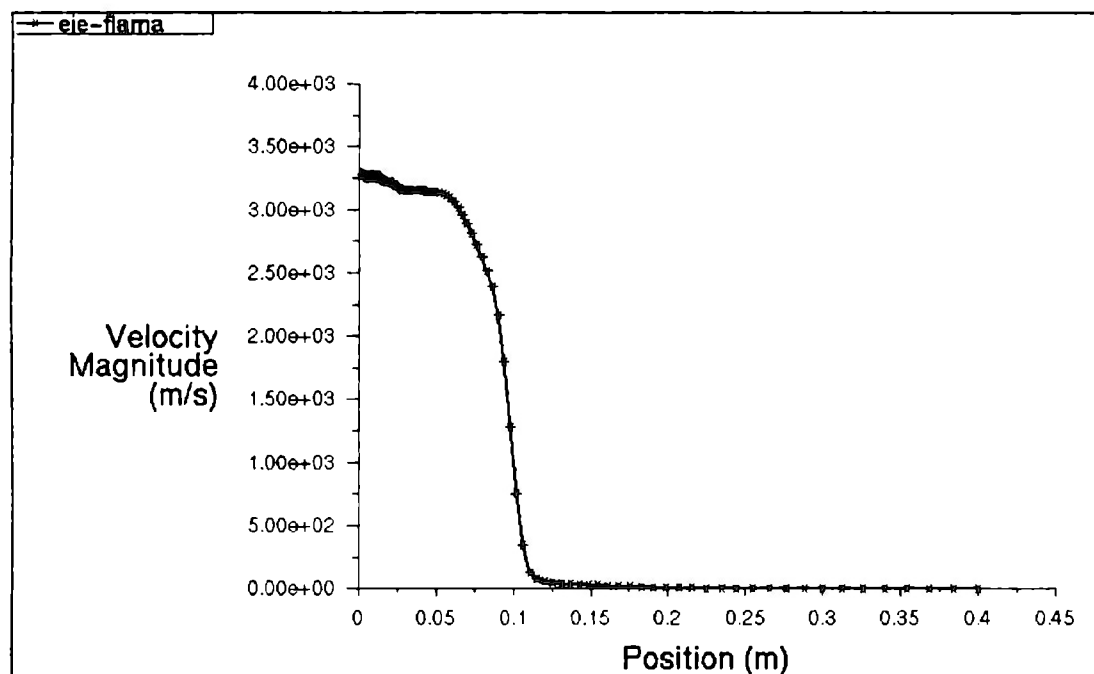


Fig. 5.9b Gráfica Velocidad vs Posición del Experimento No. 9

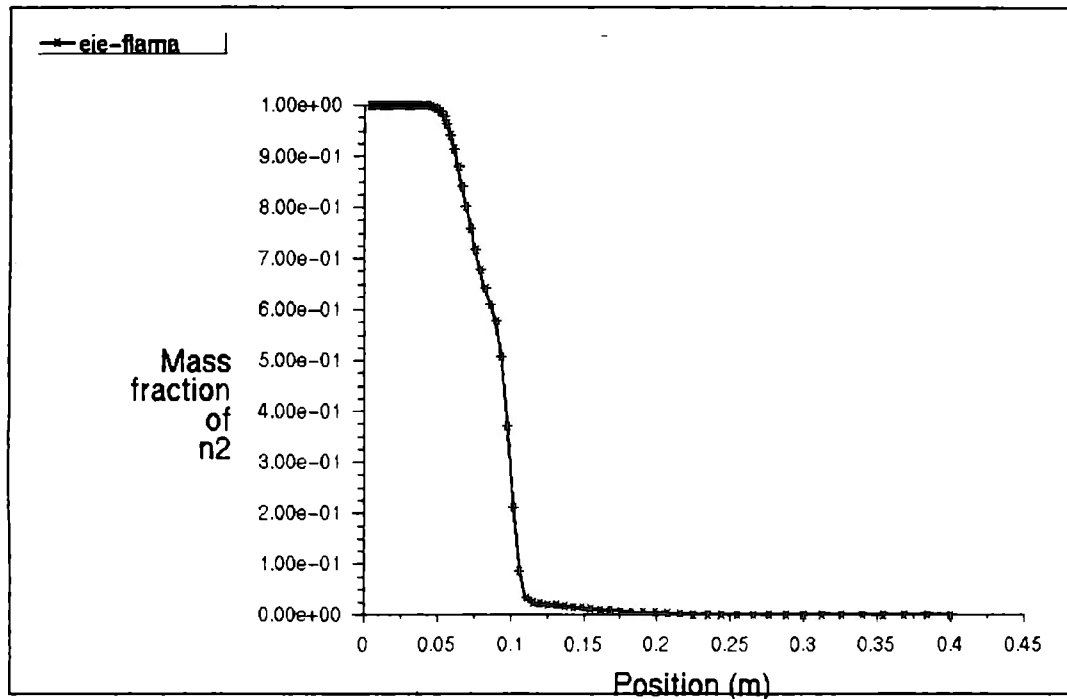


Fig. 5.9c Gráfica Fracc. de masa vs Posición del Experimento No. 9

La longitud máxima del chorro es de 12.5 cm con una velocidad máxima de 2 175 m/s y una temperatura máxima de 4 757 K.

Uno de los factores principales de comparación es el gas utilizado para producir el plasma, para el desarrollo de la presente tesis ocupé dos gases: el argón y el nitrógeno como se ha mencionado con anterioridad.

La naturaleza de dichos gases es diferente, el gas argón tiene una ventaja extra, al ser un gas inerte no reacciona con ninguna sustancia o polvo que se inyecte al chorro o jet de plasma. Mientras que el nitrógeno reacciona con algunos recubrimientos por ejemplo con los recubrimientos de base titanio, aún cuando su comportamiento tiende a ser el de un gas inerte.

El argón y el nitrógeno bajo condiciones de operación iguales se comportan de diferente manera como se muestra en los experimentos No. 1 y No. 9 respectivamente. El chorro de plasma producido con gas nitrógeno alcanza una temperatura máxima de 4 747 K, tres veces menor a la temperatura alcanzada con gas argón que es de 17 664 K.

Aún cuando el nitrógeno abunda, y es el gas más barato para producir plasma, no es recomendable utilizarlo como gas puro, ya que las temperaturas alcanzadas no son las necesarias para el proceso de recubrimiento por rociado de plasma.

5.1.1 VALIDACIÓN CON LOS PARÁMETROS CRÍTICOS Y LOS RESULTADOS OBTENIDOS DE LA MODELACIÓN Y SIMULACIÓN.

Con base en los resultados obtenidos del análisis numérico, puedo concluir que el gas utilizado para producir plasma, si influye en las características del recubrimiento obtenido, ya que influye directamente en el comportamiento del chorro de plasma, en particular en la temperatura y la velocidad de éste.

La figura 5.10 y 5.11 nos muestran las gráficas comparativas de velocidad y temperatura obtenida para los chorros de plasma con gas argón y gas nitrógeno.

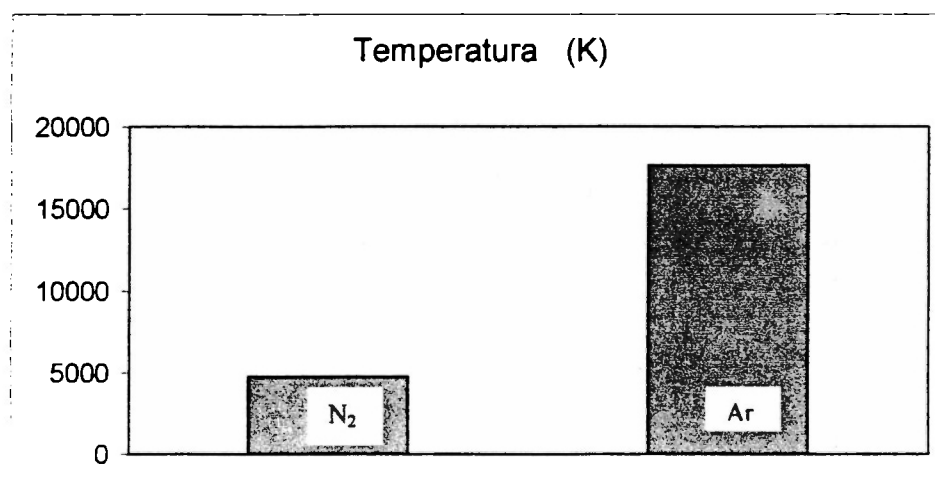


Fig. 5.10 Variación de la Temperatura dependiendo el gas utilizado

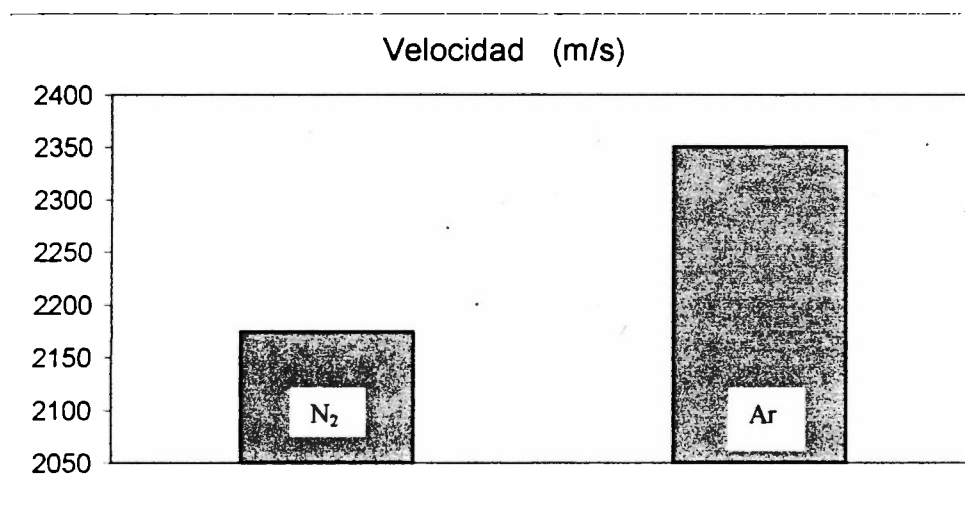


Fig. 5.11 Variación de la Velocidad dependiendo el gas utilizado

La variación de la potencia, en particular de la energía suministrada para producir el arco eléctrico, es otra de las variables que influyen directamente en el comportamiento del chorro de plasma, ya que además de influir en la temperatura y la velocidad alcanzada, influye directamente en la longitud máxima del chorro.

La figura 5.12, 5.13 y 5.14 nos muestran las gráficas comparativas de la velocidad, temperatura y longitud máxima de la flama para los experimentos realizados con el gas argón.

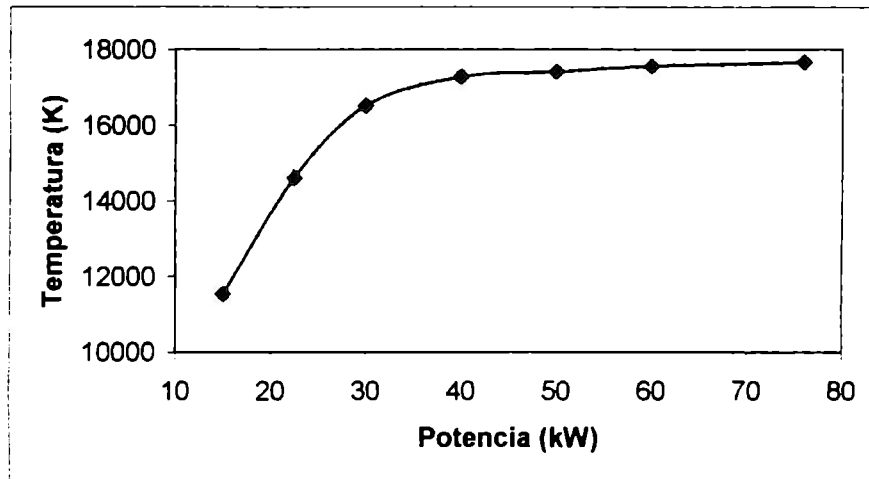


Fig. 5.12 Variación de la Temperatura para cada experimento realizado con gas Ar

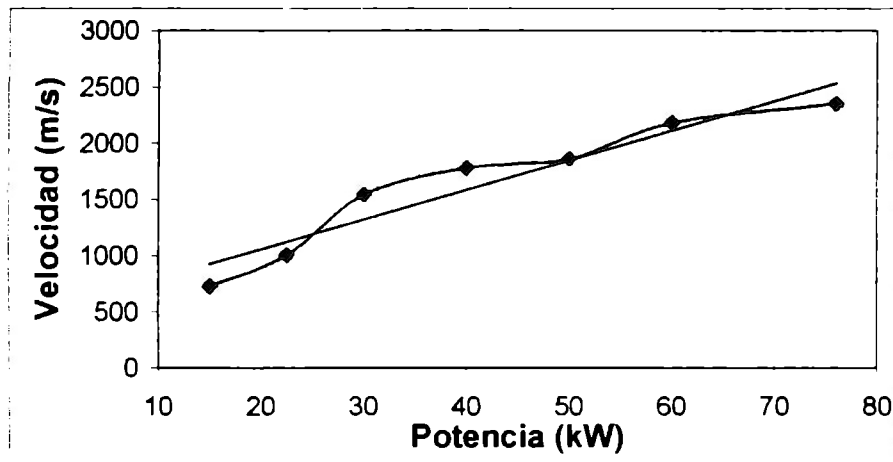


Fig. 5.13 Variación de la Velocidad para cada experimento realizado con gas Ar

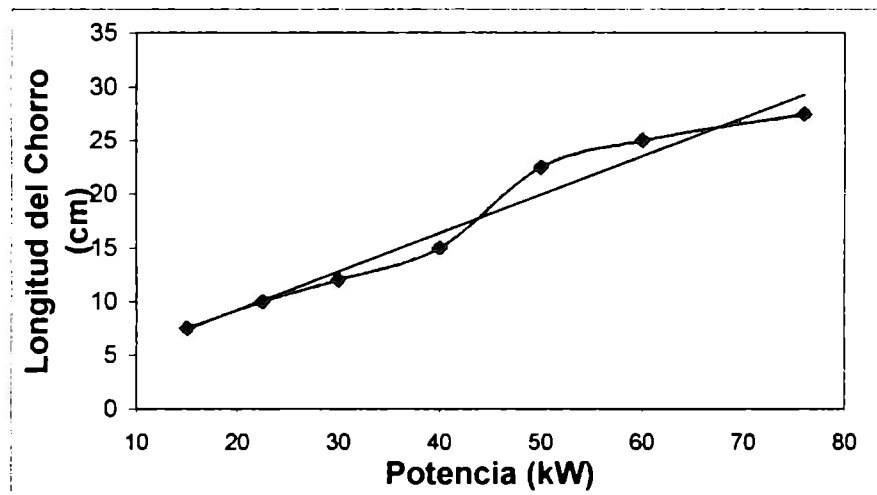


Fig. 5.14 Variación de la Longitud para cada experimento realizado con gas Ar.

No es sencillo validar el mejor chorro de plasma ya que depende de diversos factores relacionados con el proceso de recubrimiento, por ejemplo para lograr una mayor micro dureza (*HV*) se requiere que todas las partículas inyectadas a la flama se fundan antes de chocar contra el sustrato. Esto se logrará si las partículas alcanzan la temperatura de fusión durante el vuelo en el chorro de plasma.

Se puede deducir entonces que el chorro con mayor temperatura es el mejor, pero no sería cierto, no es un proceso sencillo decidir cuál es la mejor temperatura y el mejor lugar para inyectar las partículas o polvos de recubrimiento, ya que esto depende de otros factores que se estudiaron previamente [16]. Donde se demuestra que la transferencia de calor de la flama hacia la partícula se observa cuando la temperatura de la flama disminuye y la temperatura de las partículas aumenta como se muestra en la figura 5.13. Y depende única y exclusivamente del tamaño y material de la partícula o polvo para recubrir.

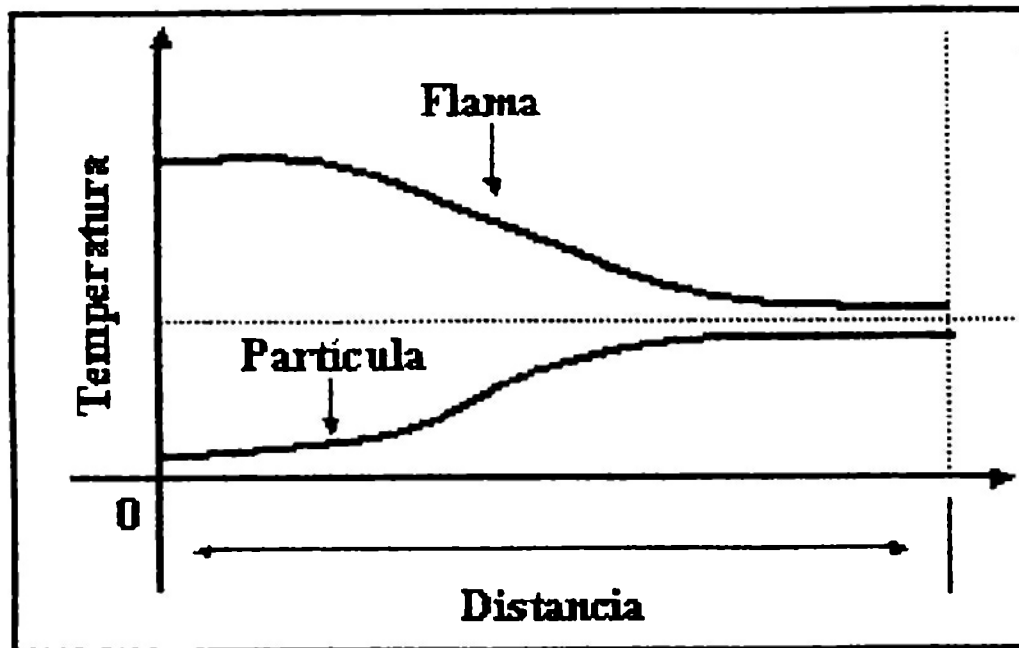


Fig. 5.15 Temperatura Flama- Partícula

Aún cuando la temperatura de fusión de los polvos de recubrimiento es menor a los 3 000 K y la temperatura alcanzada en la chorro de plasma es arriba de los 11 000 K, lo que se logra en la mayoría de las ocasiones es reblandecer o fundir la partícula e impactarla contra el sustrato, más no evaporarla, ya que el tiempo en el que la partícula recorre la distancia de la salida del inyector hasta chocar con el sustrato no rebasa los $2 \cdot 10^{-4}$ seg. Por lo que los polvos no logran evaporarse en la mayoría de las ocasiones.

Por ejemplo una partícula de titanio (Ti) de 20 μm , sometida en un chorro de plasma de 12 000 K logra alcanzar una temperatura máxima de 1 854 K, mientras que otra partícula del mismo material con un tamaño de 100 μm , logra una temperatura de apenas 651 K [16]. Si su

temperatura de fusión es de 1 945 K y el tamaño promedio de grano es de $-106 \mu\text{m} +45 \mu\text{m}$, 40/ 325 mesh. Lo que significa que aumentando la temperatura del chorro las partículas de titanio se lograrán fundir (por lo menos reblandecer) e impactar contra el sustrato para obtener un mejor recubrimiento.

5.2 CONCLUSIONES

El objetivo de la presente tesis, fue el desarrollo de una metodología de investigación para el análisis numérico y simulación de los chorros o jets de plasma para el recubrimiento metálico. El recubrimiento por rociado de plasma es un camino poco estudiado por la industria manufacturera en México, por lo que mi objetivo fue planteado con el fin de aportar alternativas dentro del amplio campo de los recubrimientos superficiales aplicables en nuestro País y nuestra industria.

Durante el desarrollo de esta tesis establecí el modelo teórico, obtenido por medio de una extensa investigación bibliográfica y recopilación de datos, que quedó propuesto durante los capítulos dos y tres.

Posteriormente hice algunas simplificaciones y suposiciones al modelo, para dar lugar a la simulación en 2 dimensiones, obteniendo el chorro o jet de plasma de gas Argón y gas Nitrógeno respectivamente. Las condiciones de las simulaciones están descritas y desarrolladas durante el capítulo cuatro, donde se variaron parámetros como: voltaje, corriente, energía de ionización, gas para producir el plasma, etc. Dichas simulaciones fueron realizadas en el paquete CFD Fluent 5, como se mencionó a lo largo del capítulo cuatro.

No es sino hasta el desarrollo de este capítulo donde todos los resultados obtenidos toman lugar, ya que la parte más importante de la presente tesis se concentra en este capítulo en el análisis de los resultados y las conclusiones.

Como primera conclusión encontré que la naturaleza del gas influye en el comportamiento del chorro de plasma, en consecuencia influye directamente en el recubrimiento obtenido.

El mejor gas para producir el chorro de plasma es el Argón, en principio por ser un gas inerte que no reacciona con ninguna otra sustancia. Además, porque alcanza mayores temperaturas en el chorro, en comparación con el gas nitrógeno.

La geometría de la boquilla influye directamente en el comportamiento del chorro de plasma, aun cuando para fines de la presente tesis la geometría de la boquilla fue tomado de un estudio previo [15], se recomienda variar las dimensiones de la boquilla para analizar con mayor detenimiento la influencia de la boquilla en el comportamiento de la velocidad y la temperatura en el chorro de plasma.

La potencia suministrada a la pistola de plasma ayuda a controlar las temperaturas y velocidades del chorro de plasma. Esto debido a que mientras menor energía se suministre al arco eléctrico, el gas tiende a ionizarse en menor cantidad en consecuencia la temperatura y la velocidad del chorro o jet de plasma disminuye.

La elección del mejor chorro para realizar el recubrimiento depende de los requerimientos del cliente como son: dureza, grosor de la capa superficial, rugosidad, porosidad, material del recubrimiento y hasta la geometría del sustrato. Que a su vez también dependen de otros factores como son: tamaño de las partículas de los polvos de recubrimiento, flujo o rango de alimentación de los polvos inyectados, lugar de la inyección de las partículas, entre otras.

Por otra parte se sugiere como mejoría al modelo, realizar simulaciones con mezcla de gases Ar-He y Ar- H₂. de igual forma N₂-He y N₂-H₂, y como mencioné anteriormente variar las dimensiones de la boquilla.

Este estudio se basó en experimentos anteriores que forman parte del estudio del Recubrimiento por rociado de plasma realizados en el ITESM-CEM, además de tomar como base datos bibliográficos de los recubrimientos superficiales, en especial de la técnica APS. Cabe señalar que la aportación de la presente tesis es el abrir el panorama industrial a *nuevos* métodos de recubrimiento, métodos que existen hace tiempo pero que no se emplean en la industria Mexicana.

6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] Instituto de Investigaciones Electricas, Investigación y aplicación de Recubrimientos superficiales en México.
- [2] Wilson, Dennius E. Kyoungjin Kim, Theoretical Analysis of an external pulsed plasma jet. IEEE Transactions on Magnetics, Vol 35, No. 1 January 1999.
- [3] Plasma Spraying- An Innovative Coating Technique Process Variants and Applications, IEEE, Transactions on Plasma Science, Vol 18, No 6, December 1990.
- [4] Z. Duan, J. Schein, Heberlein J. Investigation of Plasma Instabilities in a Spray Torch University of Minnesota, Department of Mechanical Engineering.
- [5] Cengel, Yanus A. [et al] TERMODINÁMICA Tomo I y II. Segunda Edición. Editorial Mc. Graw-Hill 1996.
- [6] Turns, Stephen R. An introduction to combustion, Concepts and Applications. Ed McGraw-Hill 1996
- [7] Roumilhac, Ph, Coudert J.F. Fauchais P. Designing parameters of spraying plasms torches, Thermal spray Research and applications, Proceedings of the Third National spray Conference, Long Beach, CA, USA 20-25 May 1990.
- [8] Combustión y Quemadores, Aplicaciones especiales de la combustión.
- [9] An introduction to fluid dynamics : principles of analysis and design / Stanley Middleman.
- [10] Advanced Welding Torch, Industrial Productivity and manufacturing technology. B&B NASA.
- [11] El-Kaddah, N. (Nagy). Thermal plasma applications in materials and metallurgical processing: proceedings of an international symposium sponsored by TMS Process Fundamentals Committee held in San Diego, California, USA, March 1-5, 1992 at the 121st TMS Annual Meeting / edited by N. El-Kaddah.

- [12] Thermal spray research and applications : proceedings of the 3rd National Thermal Spray Conference, Long Beach, California, 20-25 May 1990 / edited by Thomas F. Bernecki; sponsored by Thermal Spray Division of ASM International; co-sponsored by the High Temperature Society of Japan. National Thermal Spray Conference (3rd : 1990 : Long Beach, Calif.)
- [13] Handbook of depositions technologies for films and coatings. Science, Technology and Applications 2nd Edition. Edited by Rointan F. Bunshah NOYES publications.
- [14] Thermal spray Research and aplications ASM international edited by Thomas F. Bernecki 1991.
- [15] Tejeida, Rafael. TESIS: Diseño teórico y simulación CFD de la geometría interna de boquillas para el recubrimiento metálico por rociado de plasmas. ITESM-CEM Agosto 2002.
- [16] Lengerke, Omar TESIS: Transferencia de calor y momentum a partículas esféricas inyectadas en un chorro de plasma en el proceso de recubrimiento. ITESM- CEM, Mayo 2002
- [17] Pawlowski, Lech. The science and engineering of thermal spay coatings. Jonh Wiley & Sons Ltd. 1995
- [18] John B. y Haber, Richard A Ceramics Films and Coating, Edited by Wachtmand,. NOYES publications 1993.
- [19] Berry, R. Stephen. Thermodynamic optimization of finite-time processes / R.S. Berry ... [et al.], 1931.
- [20] McKelliget John, An integrated mathematical model of the plasma spaying process. University of Massachussets at Lowell. May 1998
- [21] Drysdale, Dougal. An introduction to fire dynamics / Dougal Drysdale. 2nd ed. Chichester; New York : Wiley, 1999.
- [22] Moiera Sola, Pere; Recubrimientos de los Metales, España, Marcombo, 1989
- [23] Park J.H, Heberlein J, Pfender E. Numerical modeling of multicomponent plasma jets. University of Minessota Department of Mechanical Engineering. High temperatura laboratory.
- [24] Groover, Fundamentos de manufactura moderna, Prentice hall, ed.1ra. 1997.
- [25] INEGI, Censo industrial , México,1999,
- [26] BANCOMETX 2001
- [27] SECOFI 2001

- [28] Breiter, Nutsch , Study of operating conditions of plasma spray torch using low electrical powder levels, IEEE, Transactions on Plasma Science, Vol 25, No5, October 1997.
- [29] Octave Levenspiel. Flujo de fluidos e intercambio de calor; Barcelona : Editorial Reverté, 1993.
- [30] Elements of thermal-fluid system design, Upper Saddle River, N.J.: Prentice Hall, 1998.
- [31] Burmeister, Louis C, Johnson, Richard W., Boca Raton. The handbook of fluid dynamics, CRC Press, 1998.
- [32] Sabersky, Rolf H. Fluid flow: a first course in fluid mechanics, Upper Saddle River, N.J. Prentice Hall, Ed.4ta. 1999.
- [33] Saad, Michel A., Englewood Cliffs. Compressible fluid flow, N.J. Prentice Hall, Ed. 2da. 1993.
- [34] Warren E. Stewart. Fenómenos de transporte : un estudio sistemático de los fundamentos del transporte de materia, energía y cantidad de movimiento / R. Byron Bird, , México; Barcelona : Reverté, 1992, reimpression 1998.
- [35] Essers, Jean-André. Computational methods for turbulent, transonic, and viscous flows, Washington : Hemisphere Pub. Corp.; Berlin ; New York : Distribution outside North America, Springer-Verlag, 1983.
- [36] Charles E. Wicks, Robert E. Wilson.Welty, James R. Fundamentos de transferencia de momento, calor y masa, México : Limusa, 1991.
- [37] Mills, Anthony F. Basic heat and mass transfer, Chicago: Irwin, 1995.
- [38] Cussler, E. L. Diffusion, mass transfer in fluid systems, New York : Cambridge University Press, 1997. Ed.2da.
- [39] Mills, Anthony F. Basic heat and mass transfer, Chicago : Irwin, 1995.
- [40] Frank M. Heat and mass transfer, White, Addison-Wesley, 1988.
- [41] Levy, Salomon. Two-phase flow in complex systems, New York : John Wiley, 1999.
- [42] Mott, Robert L. Applied fluid mechanics, New York : Maxwell Macmillan International,Ed. 4ta. 1994.
- [43] Maddox Robert N. Transferencia de masa : fundamentos y aplicaciones, México: Prentice-Hall Hispanoamericana , 1987.
- [44] Incropera, Frank P. Fundamentals of heat and mass transfer , DeWitt., Ed. 4ta New York: Wiley, 1996.
- [45] Warrendale, Pa. Plasma and laser processing of materials, Minerals, Metals & Materials Society, 1991.

- [46] International Seminar on Plasma Heat Treatment, Senlis, France, 21 to 23 September, 1987 : science and technology, International Seminar on Plasma Heat Treatment. Paris : Pyc Édition, 1987
- [47] Handbook of plasma processing technology :fundamentals, etching, deposition, and surface interactions, Park Ridge, N.J. U.S.A. : Noyes Publications, 1990.
- [48] Rossnagel, Stephen M. Handbook of deposition technologies for films and coatings: science, technology, and applications / edited by Bunshah, R. F, Boenig, Herman V. Park Ridge, N.J. : Noyes Publications, 1994.
- [49] Herman V. Plasma science and technology, Boenig. Ithaca : Cornell University Press, 1982.
- [50] Gidalevich, E. Boxman, R.L. Goldsmith. Applicability of the hydrodynamic approximation to current-carrying plasma jets during their radial expansion, S. Plasma Science, IEEE Transactions on , Volume: 29 Issue: 2 Part: 2 , April 2001
- [51] Schwenk, A. Gravelle, D.V. Boulos, M.I. Sember, V. Local thermodynamic equilibrium analysis of the supersonic induction plasma jet. Plasma Science, 2000. ICOPS 2000. IEEE Conference Record - Abstracts. The 27th IEEE International Conference on , 2000
- [52] Modeling of thermal plasmas Pfender, E. Plasma Science, 2000. ICOPS 2000. IEEE Conference Record -Abstracts. The 27th IEEE International Conference on , 2000
- [53] Keidar, M. Theoretical study of plasma expansion and electrical characteristics in the high-current vacuum arc Beilis, I.I. Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, 2000. Proceedings. ISDEIV. XIXth International Symposium on , Volume: 1 , 2000
- [54] Krinberg, I.A.; Paperny, V.L. Cathode jet pinching as the effective mechanism of plasma heating and acceleration Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, 2000. Proceedings. ISDEIV. XIXth International Symposium on , Volume: 1 , 2000
- [55] Gidalevich, E.; Goldsmith, S.; Boxman, R.L Interaction of two dissimilar supersonic plasma jets. Plasma Science, IEEE Transactions on , Volume: 27 Issue: 4 , Aug. 1999
- [56] Gidalevich, E.; Goldsmith, S.; Boxman, R.L. Shock front formation by two isotropic supersonic plasma jets Plasma Science, IEEE Transactions on , Volume: 27 Issue: 4 , Aug. 1999
- [57] Heberlein, J.V.R. Two-dimensional optical emission imaging of a pulsed supersonic plasma jet Postel, O.P.; Plasma Science, IEEE Transactions on , Volume: 27 Issue: 1 , Feb. 1999
- [58] Schutze, A.; Jeong, J.Y.; Babayan, S.E.; Jaeyoung Park; Selwyn, G.S.; Hicks, R.F. The atmospheric-pressure plasma jet: a review and comparison to other plasma sources Plasma Science, IEEE Transactions on , Volume: 26 Issue: 6 , Dec. 1998

- [59] Park, J.; Herrmann, H.W.; Henins, L.; Selwyn, G.S. Atmospheric pressure plasma jet applications Plasma Science, 1998. 25th Anniversary. IEEE Conference Record - Abstracts. 1998 IEEE International on , 1998
- [60] Spitsyn, V.G. Modeling of radar scattering from turbulent spraying jets; Antennas and Propagation Society International Symposium, 1998. IEEE , Volume: 4 , 1998
- [61] Gidalevich, E.; Boxman, R.L; Goldsmith, S. Mixing of supersonic plasma jets. Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, 1998. Proceedings ISDEIV. XVIIIth International Symposiumon , Volume: 2 , 1998

OTRAS FUENTES

- [62] <http://www.iie.org.mx/publica/bolmj97/actimj97.htm>
- [63] http://www.Hypertherm.com/technology/plasma_history.html
- [64] www.inegi.org
- [65] <http://calima.univalle.edu.co/~cyted/resu3.html>
- [66] <http://www.metal-spray.co.nz/plasma/plasma.html>
- [67] <http://homepage.dtn.ntl.com/gordon.english/ps.html>
- [68] <http://jmckelliget.eng.uml.edu/nice/papernew.htm>