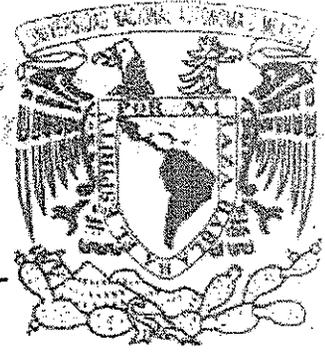


005763

# UNAM POSGRADO



FACULTAD DE QUÍMICA  
División de Estudios de Posgrado

Dominio de Existencia de un Plasma de Resplandor

T E S I S  
Que para obtener el grado de  
MAESTRA EN CIENCIAS NUCLEARES

Presenta  
Beatriz Sánchez Pérez

Director:  
M en C. Juan Lartigue Gordillo

Ciudad Universitaria, D.F.

2002

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**

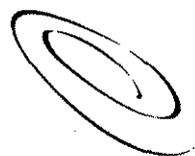


**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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



OF.CPCQ.392/02

**BIÓL. FRANCISCO INCERA UGALDE**  
Jefe de la Unidad de Administración del Posgrado  
**Presente**

Me es grato informarle que la alumna **BEATRIZ SÁNCHEZ PÉREZ**, con número de cuenta 78202393 y expediente 3932031, presentará su examen para optar por el grado de Maestro en Ciencias Químicas (Ciencias Nucleares), quien defenderá el proyecto de investigación titulado: "Dominio de existencia de un plasma de resplandor", ante el siguiente jurado:

Presidente	Dr. Sergio Ramos Bernal	Instituto de Ciencias Nucleares, UNAM
Vocal	Dra. Guillermina Burillo Amezcua	Instituto de Ciencias Nucleares, UNAM
Secretario	Dr. Manuel Navarrete Tejero	Facultad de Química, UNAM
Primer suplente	M. en C. Rubén Ortega Carmona	CFE
Segundo suplente	M. en C. Jesús Soberón Mobarak	Facultad de Química, UNAM

Este oficio cancela y sustituye al de fecha 4 de diciembre de 2000.

Sin otro particular de momento, aprovecho la ocasión para enviarle un cordial saludo.

Atentamente.  
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"  
Cd. Universitaria, D.F. a 15 de abril de 2002.

  
**DR. RAYMUNDO CEA OLIVARES**  
Coordinador del Programa

c.c.p. Integrantes del Jurado  
Presidente del SAO  
Interesado  
Expediente  
Sección Escolar de la División de Estudios de Posgrado, Facultad de Química.

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

*Dedico este trabajo:*

*A mi hijito,*

*ALBERTO LEÓN PACHEZ*

*A mi Pareja,*

*ARTURO LEÓN ROMANOS*

*A mis Padres,*

*ANTONIO PACHEZ DOMÍNGUEZ Y*

*AMPARO PÉREZ GERARDO*

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

AGRADEZCO:

Al Laboratorio de Plasmas de Química Nuclear:

Por las facilidades que me dieron para la elaboración del presente trabajo.

Al M en C JUAN LARTIGUE GORDILLO:

Por dirigir pacientemente la presente tesis.

A MIS SINODALES,

Por haber revisado y aceptado el presente trabajo:

Dr. Sergio Ramos Bernal.

Dra. Guillermina Burillo Amescua.

Dr. Manuel Navarrete Tejero.

M en C Rubén Ortega Carmona.

M en C Jesús Soberón Mobarak.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

# ÍNDICE

	página
Resumen -----	4
CAPÍTULO I Introducción y propósitos de la tesis -----	6
CAPÍTULO II Antecedentes históricos, origen del término -----	9
CAPÍTULO III Fundamentos teóricos de los plasmas -----	19
CAPÍTULO IV Clasificación y formas de generación de los plasmas -----	39
CAPÍTULO V Métodos de análisis del plasma de baja temperatura -----	48
V.1 Métodos de diagnóstico -----	48



V.2 Métodos para observación espectroscópica ----- 53

CAPÍTULO VI Desarrollo experimental para la obtención de un  
    plasma de resplandor----- 62

VI.1 Metodología y diseño del experimento ----- 63

IV.2 Diagnóstico a partir de los datos experimentales ----- 65

CAPÍTULO VII Resultados y confrontación con la teoría ----- 66

CAPÍTULO VIII Conclusiones ----- 73

ANEXOS ----- 75

TABLAS DE DATOS ----- 76

AURORAS BOREALES ----- 79

GRÁFICAS ----- 81

CONSTANTES EMPLEADAS ----- 92

GLOSARIO ----- 94

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS ----- 99



## RESUMEN

En este trabajo se describe el planteamiento experimental para encontrar el dominio de existencia de un plasma de resplandor, dicho de otra manera: la propuesta de esta tesis fue encontrar por la vía experimental las relaciones entre los voltajes de polarización y las presiones dentro de un tubo de descarga a baja presión, para los cuales se presenta el plasma de resplandor. En cada caso se exploraron las regiones de existencia del plasma variando progresivamente las condiciones de la presión y el voltaje.

Como se mencionó anteriormente, las variables controladas durante el experimento que da lugar a este trabajo son: el voltaje de polarización aplicado al tubo de experimentación y la presión dentro del mismo tubo. El experimento se efectuó sucesivamente con Helio, Argón y Aire a fin de observar la regularidad y conocer más el fenómeno del plasma y la correspondencia con el modelo utilizado en el trabajo, a partir de los datos obtenidos. Variando voltaje y presión se encuentran los valores del óptimos para producir el plasma.

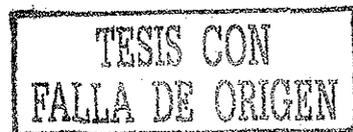
Tomando como base los resultados experimentales obtenidos, estos se vierten en un diagrama de excitación Presión-Voltaje. Esta información es la base para llevar a cabo el diagnóstico. Las conclusiones que sobre el experi-



mento se obtienen dan como resultado el dominio de existencia del plasma en diagramas Temperatura-Densidad.

Para complementar y para obtener más información sobre el experimento, se repite con intervalos más cortos y, adicionalmente, se comprueba la existencia de las curvas de ignición y extinción del plasma.

Finalmente, se confrontan los resultados experimentales con los teóricos y se observa que el plasma localmente se aproxima a un gas de electrones. Las conclusiones (último capítulo de la tesis), se obtienen a partir de los razonamientos teóricos y las evidencias experimentales, que, salvo las inevitables desviaciones experimentales, concuerdan y sirven para proponer posibles caminos para una ulterior investigación sobre áreas aún ignoradas de los plasma de resplandor, que quizás se puedan extrapolar a los de otros orígenes.



# **CAPÍTULO I**

## **INTRODUCCIÓN**

El objetivo principal de este trabajo de tesis es encontrar el dominio de existencia de un plasma de resplandor y demostrar que su comportamiento se puede explicar a partir del modelo de gas de electrones.

La importancia de medir el dominio de existencia de los plasmas fríos está en la amplia gama de aplicaciones que tienen; particularmente los plasmas de resplandor que, además, para las condiciones de nuestro material de trabajo, son los más fácilmente observables.

Un dato digno de destacarse en estos plasmas es la descarga inicial producida por la existencia de electrones libres acelerados por el campo eléctrico, quienes durante esta transición adquieren energía cinética suficiente para ionizar algunas moléculas del gas.

Este trabajo incorpora, con el fin de dar un soporte histórico, experimental y teórico, ordenado por capítulos, lo siguiente:



Capítulo Primero: relación cronológica de los antecedentes históricos del plasma, inclusive, por considerarla importante, se trae a colación la disputa por el derecho de su uso en las ciencias biológicas y en las ciencias nuestras.

El Capítulo Segundo sirve para analizar los fundamentos teóricos de los plasmas. Particularmente se presentan los conceptos e ideas específicas que sirven de sustento a nuestro trabajo experimental.

No intentamos siquiera explicar la teoría completa del plasma, pues implicaría por sí mismo un trabajo irrealizable por lo vasto, sería como pretender rescribir los muchos libros que sobre plasmas existen; tal tarea se escapa a nuestros propósitos y alcances, por eso sólo se toma lo estrictamente indispensable para darle al trabajo la necesaria validez científica, la suficiente para cumplir la tarea marcada inicialmente: Dar una respuesta científica a nuestra hipótesis de trabajo que busca justificar que un plasma se puede explicar utilizando el modelo del gas de electrones.

En el Capítulo IV se analizan los orígenes y tipos de plasma conocidos; se observa a grandes rasgos que el fenómeno puede ser producido por coincidencias de la naturaleza o por el contrario, por la voluntad del hombre: Plasmas naturales y plasmas artificiales. En función de la intensidad y los niveles de energía que se dan en el interior del gas donde se produce el plasma, pueden ser fríos o calientes. Se fundamenta teóricamente la diferencia.

El Capítulo V discurre sobre los métodos de diagnóstico. Lo complejo y vasto de la materia nos impele a tomar solamente lo esencial para darle coherencia y validez a nuestro trabajo. El estudio completo de la teoría de los

plasmas escapa a nuestros objetivos y posibilidades.<sup>1</sup>El Capitulo VI es sin duda donde se manifiesta de mejor manera el aprendizaje y habilidades conquistadas durante los meses de trabajo, explica el desarrollo experimental construido para encontrar el dominio de existencia de un plasma de resplandor. Como todo trabajo de investigación experimental tuvo éxitos y fracasos hasta afinar la metodología (tratada con detalle en este lugar) y llegar finalmente al objetivo de todo nuestro trabajo, determinar por medio del diagnóstico la zona característica o dominio de existencia de los plasmas de resplandor o plasmas fríos y encontrar la coincidencia de resultados entre nuestro experimento y el modelo de gas de electrones.

En el Capítulo VII analizamos los resultados obtenidos presentándolos en forma de tablas y gráficas, y realizamos cálculos de los parámetros básicos para el estudio del plasma.

El último capítulo muestra las conclusiones generadas después de confrontar los resultados experimentales con los cálculos teóricos del modelo de gas de electrones

Salvo las diferencias debidas a errores instrumentales se encuentra que hay coincidencia entre los cálculos teóricos y los datos experimentales.

Una conclusión que afirma y valida nuestra hipótesis de trabajo.

---

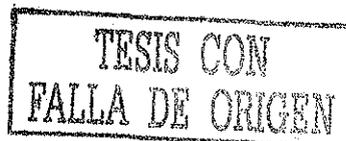
<sup>1</sup> Se ofrece al final de esta tesis la lista de los libros y artículos donde el lector interesado puede profundizar y encontrar más detalles sobre este y temas afines.



## **CAPÍTULO II**

### **ANTECEDENTES**

El vocablo plasma caracteriza al estado de mayor excitación de la materia, vale decir, el de mayor energía interna, fue pronunciado por primera vez por los fisiólogos a mediados del siglo XIX [1,2]; designaba —y designa aún— al componente líquido e incoloro de la sangre, de la leche y de los tejidos animales. Dicha palabra tuvo únicamente este sentido hasta el año de 1923, cuando los físicos estadounidenses Y. Langmuir y L. Tonks llamaron plasma a cierto estado singular de un gas, naturalmente nos referimos al que es motivo de esta tesis. Desde este momento distinguimos las dos acepciones o conceptos ligados a la misma palabra o símbolo con el que se que expresa: plasma. La interpretación del fenómeno fisicoquímico caracterizado por el alto grado de energía prevaleciente y, en consecuencia, la dispersión de partículas componentes del átomo y moléculas, vibrando y emitiendo energía. O el líquido semitransparente propio de los organismos vivientes.



A pesar de los llamamientos de los biólogos para que la palabra plasma se le dejara sólo su sentido primario, es decir, el biológico, este concepto fue incorporado de manera firme —como otros tantos a lo largo de la historia— en las ciencias físico-químicas. Pero como el lenguaje cotidiano nos enseña, una palabra, signo o símbolo tiene valor o significado siempre con relación al contexto o ámbito donde se emplea. Así pues, no hay confusión ni error en cuanto que la palabra plasma es unívoca para cada uno de los campos. Como se ve la inicial disputa perdió sentido y la ninguno busca más la exclusividad.

Definamos la parte que nos corresponde, ¿A qué le llamamos plasma los físicos, los químicos y los fisicoquímicos? a una mezcla de partículas cargadas y neutras en donde, macroscópicamente, la carga negativa total de las partículas es igual a la carga positiva total. De modo que, en conjunto las partículas de la mezcla del plasma se considera como un medio eléctricamente neutro que, sin embargo, conduce con facilidad la corriente eléctrica.

## UN POCO DE HISTORIA

Aunque el desarrollo de la física de plasmas sólo comenzó en los años 20 del pasado Siglo XX, algunos científicos —sin que ellos lo advirtiesen— manejaron con anterioridad el plasma en sus experimentos.

En 1667, los científicos de la Academia de Ciencias de Florencia, descubrieron que la llama de un quemador conducía la electricidad, esto es, que existen cargas portadoras libres. La flama es un plasma.

En 1698, en Inglaterra, el doctor Woll [1], al estudiar la electrización del ámbar, tomó un trozo de lana para frotar su pieza de ámbar, mas en esta acción lo acercó tanto a su cuerpo que; de pronto, del ámbar saltó una chispa



hacia él (lo sabemos ahora porque el ámbar se carga negativamente) y así, de modo casual y por un afortunado descuido, el científico inglés obtuvo artificialmente por primera vez una pequeña descarga eléctrica transmitida a través del aire. Semejante descarga en el aire sólo es posible cuando se crea una cantidad suficiente de partículas cargadas, entonces y sólo entonces, el aire se convierte en un gas conductor de la electricidad: ¡esto también es plasma!

En 1717, cincuenta años después de lo relatado, Leiden observó una descarga eléctrica (plasma) con ayuda de la batería eléctrica pensada y construida por él mismo<sup>2</sup>.

A principios del siglo XIX, el académico ruso V. Petrov descubrió el arco eléctrico o, como suelen llamarlo, la descarga en arco; su estudio mostró que las propiedades del gas en el que acontece la descarga eléctrica (gas en combustión) se diferencian de las del gas en estado no conductor de la electricidad. He aquí la razón por la que el plasma fue considerado como un nuevo estado de la materia: el cuarto estado de la materia.

El Físico inglés W. Crookes que estudiaba la descarga eléctrica en tubos con aire enrarecido escribió en 1879 acerca de dicho estado: "Los fenómenos en los tubos con gas a baja presión abren a las ciencias físicas un nuevo mundo en el cual la materia puede existir en un cuarto estado." [1]

Así pues, los científicos convivieron con el plasma en sus laboratorios desde hace ya bastante tiempo; cada uno de ellos ha contribuido con su esfuerzo hasta llegar al conocimiento actual.

---

<sup>2</sup> Conocida desde entonces como Botella de Leiden, esta se compone de discos de cobre separados por una tela de algodón humedecida por una solución salina. El voltaje obtenido depende del número de discos, que suman su potencial por encontrarse formando un circuito serie. Y aunque la corriente no era alta si pudo obtener varios cientos de Volts.



## AURORAS BOREALES

*El crepúsculo fugaz del verano nórdico,  
donde el sol rueda como un carro en  
llamas sobre los bosques sombríos que  
coronan el horizonte, y sus rayos,  
reflejados por las ventanas de los  
palacios, dan al espectador la  
impresión de un inmenso incendio.<sup>3</sup>*

*Joseph de Maistre, Las veladas de San Petersburgo*

Mientras que las dimensiones lineales de los plasmas de laboratorio rara vez son mayores de unos cuantos metros [2], la influencia del plasma solar se extiende a una distancia media de  $1.5 \times 10^{11}$  metros [1, 2, 16]; mucho más allá de la tierra<sup>4</sup>.

Otras regiones del espacio interestelar, y quizá del intergaláctico, donde la densidad de partículas es del orden de  $10^6$  part/cm<sup>3</sup>, (aunque en algunas zonas la densidad es de 1 part/cm<sup>3</sup>), están también sujetas a la influencia de los plasmas; estas regiones son de una extensión mucho mayor. Los científicos (particularmente los astrofísicos) han calculado que el 99% de la mate-

---

<sup>3</sup> Es esta una expresión literaria de un observador del Siglo XIX cautivado por la magnificencia de la naturaleza. No sabemos con certeza si está describiendo una aurora boreal, sin embargo, si no es se le parece mucho.

<sup>4</sup> La distancia media de la superficie de la Tierra a la superficie del Sol es de  $1.5 \times 10^9$  metros



ria en el Universo se halla en estado de plasma. La temperatura electrónica del plasma interplanetario referido es de aproximadamente  $10^5$  K [1, 2, 20]. En nuestro planeta ha sido posible hacer observaciones, algunas sin esfuerzo alguno como es el caso de las auroras polares, producto de los efectos de la interacción de partículas cargadas emitidas por el sol con gases enrarecidos que se dan en las cercanías de los polos terrestres.

## LAS MANCHAS SOLARES Y LAS AURORAS BOREALES

La observación más antigua que relaciona los estados de actividad solar con fenómenos visibles en la atmósfera terrestre, probablemente sea la coincidencia de manchas solares y las auroras boreales. En este caso la actividad electromagnética surge unas 30 horas después de una intensa actividad del viento solar. Este fenómeno demuestra que existe una correlación entre el fenómeno Aurora y la actividad de las manchas solares. Además la Aurora aparece unas treinta horas después de que se observan ráfagas solares y aumenta su intensidad cada 11 años [1, 2, 16, 20].

Para obtener una visión más detallada de la interacción del viento solar y el medio ambiente terrestre, es útil considerar las fuertes variaciones del campo magnético terrestre: las tormentas magnéticas. Se sabe que el viento solar estacionario produce deformaciones del patrón del campo geomagnético. Se observa que cualquier perturbación del viento solar provoca variaciones de este campo. Aún más, puesto que las amplitudes y direcciones de estos cambios del campo pueden ser medidas, éstos podrían, al menos en principio, ser interpretados con algún modelo que relacione la interacción del viento y la perturbación del campo magnético terrestre.

En la superficie del ecuador, el valor de la componente horizontal del campo magnético es de, aproximadamente, 0.3 gauss [1, 2, 20] en la super-



ficie y los cambios del campo deben medirse con respecto a éste. Entonces, cualquier variación que el viento solar provoque en la compresión de la componente del campo paralelo a la superficie terrestre deberá ser más evidente en esta latitud.

Unas treinta horas después de la aparición de una ráfaga solar, la componente vertical del campo crece rápidamente; estas treinta horas, evidentemente, son las requeridas para que el material de las ráfagas solares llegue hasta la Tierra.

A diferencia de las tormentas magnéticas, que sólo pueden ser detectadas con instrumentos magnéticos de precisión, las auroras polares se captan visualmente,, aunque no de manera exclusiva. Sus apariciones, raras e inesperadas, su movimiento enigmático, el juego de colores y la falta de explicación de estos fenómenos, han conducido a que, desde los más antiguos tiempos, las auroras polares fueran consideradas como misteriosos presagios, ahora sabemos que estos maravillosos espectáculos de la naturaleza tienen una satisfactoria explicación. Seguimos gozando del cúmulo de colores y su movimiento que desgarrar el cielo y lo adorna con arreglos irrepetibles, pero además gozamos del placer de descorrer más aún el velo de misterio que cobijaba este y otros fenómenos de la naturaleza.

Cualquier intento de descripción de una aurora polar será poco ante la magnificencia de la realidad, pero diremos que producen una luminiscencia intensa del cielo –con más propiedad diríamos en las bajas capas de la atmósfera- con variedad de formas, arcos, rayos, bandas y cortinas que se agitan y entrelazan. Su nombre proviene de que se observan solamente en las cercanías de los polos terrestres, es decir, en las bajas latitudes, y exclusivamente durante los períodos de una actividad solar muy intensa.

En las auroras polares se manifiestan casi todos los colores; sin embargo, en las auroras en forma de arco, el color predominante es el verde-amarillo. En las que tienen la configuración de superficies y cortinas luminiscentes, el color más frecuente es el rojo oscuro; las auroras de tonalidades azules y violetas se observan rara vez cada color nos indica los niveles de energía presentes. Pero más que las palabras, admiremos la elocuencia de las imágenes de algunas auroras captadas en Alaska (ver anexo).

El 25 de enero de 1938 fue observada una de las más grandiosas auroras boreales del siglo XX. En el momento en que la aurora alcanzó su total desarrollo, enormes regiones de la bóveda celeste se tiñeron de rojo bermeillon, con columnas verde claro, amarillo, naranja, carmesí, en constante movimiento y brillos cintilantes. Ese día el cielo se convirtió en una cúpula de bandas y nubes de luminosidad y colorido.

El número de noches en las que se observan las auroras crece al aproximarse a ambos polos magnéticos —boreal y austral—. Pero sea cual sea la latitud, la variación de la frecuencia de aparición de las auroras boreales, de año en año, está ligada íntimamente, como se mencionó antes, con la actividad solar. Se ha establecido con precisión que las auroras se presentan con mayor frecuencia un día después de que grandes manchas solares pasan por el meridiano solar. Se descubrió análoga dependencia para las grandes tormentas magnéticas de la Tierra.

## EL FENÓMENO LLAMADO AURORA POLAR

Profundizando en el estudio de las auroras encontramos que éstas son provocadas por los electrones y protones que penetran las capas superiores —altamente enrarecidas— de la atmósfera terrestre. El alcance de esta penetración es función de la energía de esos electrones y protones venidos del Sol

y del efecto de frenado que ejercen sobre ellos las capas superiores de la atmósfera.

Los electrones con energías de 10 keV a 100 keV [1, 2, 16] penetran hasta 80 a 100 km sobre la superficie de la Tierra, produciendo las citadas auroras polares.

Adicionalmente, el flujo de electrones y protones crean en el entorno de nuestro planeta un campo eléctrico. Cuando la diferencia de potencial entre dichos flujos alcanza suficiente valor se produce una descarga en el gas; tal diferencia de potencial es producida tanto por los vientos solares como por la ionización de las capas atmosféricas altas. La conjunción de éstas produce una fuerte tormenta magnética. La luminiscencia de esta descarga en el gas enrarecido en la alta atmósfera es, precisamente, la aurora boreal.

Comparando el espectro obtenido mediante un experimento de descarga con plasma de resplandor, en condiciones controladas de laboratorio, con los espectros de las auroras polares, se pudo establecer que éstas auroras las generan electrones con una energía de unos 30 eV [1, 2, 20].

#### ANALOGÍA ENTRE LAS AURORAS POLARES Y LOS PLASMAS

Por lo dicho en el párrafo anterior, no hay duda en que las Auroras Boreales y Australes son producto de la interacción de cargas eléctricas en un medio gaseoso enrarecido, esto es en un ambiente propicio para darse el fenómeno del plasma<sup>5</sup>. Esto significa que en los tubos de descarga se obtienen plasmas de resplandor cuya luminiscencia es similar a la de las auroras boreales o australes (es decir: polares). Por lo tanto, la determinación del dominio

---

<sup>5</sup> Por los niveles de energía presentes se trata de plasmas de resplandor.



de existencia de estos plasmas de resplandor tiene una aplicación inmediata para conocer el dominio de existencia de dichas auroras.

Por otra parte, las aplicaciones químicas de los plasmas fríos son cada día mayores. Por ello, el conocer las condiciones límite entre las cuales se pueden generar, ayuda a prever la cinética de las reacciones químicas en estado de plasma, y de sus aplicaciones. De lo anteriormente expuesto, se manifiesta la importancia de conocer el dominio de existencia de los plasmas fríos, de los cuales los plasmas de resplandor son los más fácilmente detectables.

#### APLICACIONES TECNOLÓGICAS DE LOS PLASMAS DE RESPLANDOR

Algunos de los campos de aplicación de este tipo de plasmas son los siguientes [4, 21, 23]:

- Síntesis de Compuestos Complejos
- -Implantación de iones en metales
- Protección de superficies en sólidos
- Mayor Integración de circuitos electrónicos
- Formación de nitruros, óxidos y silicatos metálicos.

Según nuestras observaciones, las mayores inversiones en plasmas se hace en las áreas de:

- Dispositivos Electrónicos
- Microelectrónicos
- Circuitos integrados
- Óptica
- Optoelectrónica



- Producción de membranas de desalinización y purificación del agua
- Y, en la implantación de iones en superficies metálicas.

El tratamiento químico de superficies mediante plasmas hace que los materiales en donde se deposita el plasma adquieran resistencia a altas temperaturas y presiones, así como a los medios abrasivos y corrosivos. La modificación química (por plasma) de las superficies de materiales está relacionada con cambios en la composición y estructura atómica de las capas superficiales del material.

El tratamiento químico por plasmas, en polímeros, ocasiona cambios en su humedad, peso molecular y composición química. Las propiedades adhesivas de los polímeros dependen en gran medida de la humedad. El cambio de peso molecular influye en sus propiedades físicas y químicas, tales como la permeabilidad, temperatura de fusión y solubilidad.

Una vez más queda de manifiesto el valor tecnológico de los plasmas, particularmente de los plasmas de resplandor; sin embargo, es necesario formalizar y sustentar el fenómeno; el capítulo siguiente tiene esta finalidad.



## **CAPÍTULO III**

### **TEORÍA BÁSICA DE LOS PLASMAS**

En este capítulo se mencionan los fundamentos y principios que explican de manera particular la existencia de los plasmas y de sus principales propiedades.

El punto de partida de nuestra teoría es que el plasma es una mezcla de partículas cargadas, cuando hablamos de un plasma generalmente nos referimos a un plasma producido a partir de un gas. Como, además, se tiene la restricción de tratar con una mezcla de carga neutra y esta mezcla debe ser homogénea, entonces electrones y iones se encuentran cercanos y en agitación constante. En tal condición de agitación es de esperarse una gran cantidad de colisiones y choques de todo tipo; En estas interacciones se encuentra la razón de ser de los plasmas.

En esta mezcla el promedio de la carga negativa de las partículas es igual al promedio de la carga positiva. Dicho de otra manera, los plasmas están constituidos por electrones libres e iones positivos que se producen por



ionización de átomos y moléculas, antes y después de tener nuestro plasma el gas en que se produce es un gas neutro.

Lo mencionamos recientemente en el Capítulo II: En forma natural solamente se forman plasmas cuando se presentan condiciones especiales en la atmósfera terrestre. Se requiere la existencia de un gas rarificado y de energía para ionizarlo.

Debido a que el plasma exhibe características distintas a las de los gases, se puede considerar que constituye el cuarto estado de la materia, es el cuarto por el orden de su descubrimiento. Aun cuando es el más abundante en el universo no es tan fácilmente observable como los otros tres.

Las propiedades del plasma son consecuencia de la interacción entre las diferentes especies de partículas (neutras y cargadas) y de las fuerzas que se producen dentro del gas; en ese espacio, una partícula cargada interactúa con muchas otras. No obstante ser distintos a los gases, los plasmas conservan ciertas propiedades comunes como la compresibilidad, la presión proporcional a la temperatura absoluta, etc.

Para producir un plasma es necesario liberar electrones; pero éstos se encuentran normalmente ligados a los átomos. La tabla 3.1 muestra las energías de ionización, es decir, para liberar electrones, para algunos elementos. Para producir ionización existen varias maneras de añadir estas energías al sistema atómico. El requisito esencial es que un electrón adquiera la energía suficiente para escapar del campo de fuerzas del átomo. Por lo general, la energía proviene de colisiones.



## PLASMAS FRÍOS Y PLASMAS CALIENTES

Un plasma se clasifica como débilmente ionizado o de baja temperatura cuando la energía media de los electrones o iones es mucho menor que el potencial de ionización de los átomos del plasma. Un plasma de alta temperatura tiene la condición opuesta, es decir, la población de partículas neutras es muy pequeña comparada con la de iones.

Lo remitimos al apéndice, donde se encuentra la Tabla 3.1 con los Potenciales de Ionización del Hidrógeno, Helio, Litio, Argón, Nitrógeno y Oxígeno.

### LONGITUD DE LANDAU

Un parámetro que caracteriza el estado de los plasmas es la Distancia o Longitud de Landau [13, 15, 24]. Esta distancia toma en consideración las colisiones entre partículas cargadas pues la Longitud de Landau es la distancia  $l$  para la cual la energía potencial mutua  $\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 l}$  entre dos partículas cargadas es igual a la energía cinética característica del movimiento térmico,  $kT$ ; esta longitud es:

$$l = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 kT} = \frac{1.65 \times 10^{-5}}{T} \text{ metros} \quad \text{ec. 3.1}$$

$e$  es la carga del electrón en coulombs,

$\epsilon_0$  es la permitividad del vacío en  $\frac{\text{coulomb}}{\text{joule} \times \text{metro}}$ ,

$k$  es la Constante de Boltzmann,



T es la temperatura en Kelvin

### PARÁMETRO DE IMPACTO

Una colisión binaria entre partículas cargadas se considera cercana si el parámetro de impacto [11, 12, 13, 24], esto es si la distancia de separación mínima entre ellas, en ausencia de interacción mutua, es menor que  $l$  y tiene como resultado una deflexión en la trayectoria de la partícula. La distancia promedio entre partículas es  $N^{-1/3}$ , donde N es el número de partículas por unidad de volumen.

Las colisiones cercanas carecen de importancia si  $\alpha \ll 1$ . El parámetro de Impacto  $\alpha$  en función de  $l$  y N es:

$$\alpha = \frac{l}{N^{-1/3}} = \frac{1.67 \times 10^{-5} \times N^{1/3}}{T} \quad ec.3.2$$

### TRAYECTORIA LIBRE MEDIA, $L$

Es la distancia promedio recorrida por un electrón entre la ocurrencia de una colisión y la siguiente. La sección transversal de colisiones cercanas entre partículas cargadas es del orden de  $\pi \times l^2$  [11, 12, 13, 24], por lo tanto la correspondiente trayectoria libre media  $L$ , es:

$$L = \frac{1}{\pi N l^2} = \frac{N^{-1/3} T}{\pi \alpha^2} = \frac{1.1 \times 10^9 T^2}{N} \text{ metros} \quad ec.3.3$$

No existen colisiones cercanas si  $\alpha \ll 1$  y en este caso no se usa la Longitud de Landau en la ecuación de la trayectoria libre media de los elec-



trones. La relación para encontrar la trayectoria libre media queda de la siguiente forma:

$$L = \frac{1}{\pi N d_A^2} \text{ metros} \quad \text{ec. 3.4}$$

$d_A$  es la distancia interatómica y se obtiene de la relación siguiente:

$$d_A = N_A^{-\frac{1}{3}}$$

$N_A$  es el número inicial de partículas por unidad de volumen. Este número se deduce como sigue:

$$pV = nRT \quad \text{ec. 3.5}$$

$$\frac{p}{RT} = \frac{n}{V} \quad \text{ec. 3.6}$$

$$\frac{n \times Av}{V} = \frac{p \times Av}{kT} \quad \text{ec. 3.7}$$

finalmente:

$$N_A = \frac{p}{kT} \quad \text{ec. 3.8}$$

$p$  es la presión en pascales,

$k$  es la constante de Boltzmann,  $k = 1.38 \times 10^{-23} \frac{\text{Joule}}{\text{Kelvin}}$

$T$  es la temperatura ambiente absoluta (K),

$R$  es la constante general del estado gaseoso,

$n$  es el número de moles en el volumen  $V$  del gas ( $\frac{n}{m^3} = nm^{-3}$ ) y

$A_v$  es el número de Avogadro  $A_v = 6 \times 10^{23} \frac{\text{partículas}}{\text{mol}}$

#### LONGITUD DE DEBYE O LONGITUD DE BLINDAJE

Otro parámetro importante es la distancia de Debye. La presencia de efectos colectivos constituye la principal característica de un plasma. Una medición cuantitativa de la longitud de Debye puede obtenerse determinando la distancia a la cual se extiende el campo eléctrico de una partícula individual cargada antes de que su efecto sea anulado por las partículas de carga opuesta que se encuentren en la vecindad. Dicho cálculo fue realizado por primera vez por Debye para un electrolito. Suponiendo un gran número de partículas próximas, de manera que el campo eléctrico pueda ser tomado como una función continua de la distancia, la distancia crítica de blindaje o Longitud de Debye [2, 11, 12, 13, 24] es:

$$D = \sqrt{\frac{kT}{4\pi Ne^2}} = 69 \sqrt{\frac{T}{N}} \text{ metros} \quad \text{ec. 3.9}$$

Más allá de  $D$ , el campo eléctrico y, por tanto, la influencia de la partícula individual es nula y los efectos colectivos predominan sobre los puntuales.

Entonces, un criterio para la existencia de un plasma es que la dimensión lineal ( $l$ ) del sistema sea grande comparada con  $D$ .



La hipótesis de un gran número de partículas en la vecindad de una partícula cargada, para suministrar el decremento lento del campo eléctrico, requerido para la derivación de  $D$  es un criterio más para la existencia de un plasma; para asegurarlo, el número de partículas dentro de una esfera de radio igual a la longitud de Debye debe ser mucho mayor que la unidad. Expresadas estas condiciones matemáticamente dan por resultado las dos ecuaciones siguientes:

$$D \ll 1 \quad \text{ec. 3.10}$$

$$\frac{4\pi n}{3} D^3 \gg 1 \quad \text{ec. 3.11}$$

## DENSIDAD DE PARTÍCULAS

Hablar de efectos colectivos es considerar el comportamiento global, común y simultáneo de las partículas que existen en el plasma.

Un plasma tiende a mantener un estado eléctricamente neutro puesto que existe poca restricción para el movimiento de partículas cargadas (excepto en donde actúan fuerzas magnéticas), de ahí que las partículas se muevan en el campo eléctrico promedio neutralizando los posibles excesos locales de carga.

Hemos encontrado por lo ya dicho que, otra condición, necesaria pero no suficiente, para la existencia de un plasma es la neutralidad eléctrica [11, 12, 13, 24]. Simbólicamente escrito es:

$$n_i = n_e \quad \text{ec.3.12}$$



$n_i$  es el número de iones (cationes) del plasma

$n_e$  es el número de electrones (aniones) del plasma

La discusión precedente se refiere al plasma en estado estacionario.

## FRECUENCIA DEL PLASMA

Uno de los más importantes movimientos colectivos de carga es la Frecuencia del Plasma  $\nu_p$  [11, 12, 13, 24] a la que se produce la oscilación de los electrones del plasma respecto de los iones; la oscilación se da por la interacción electrón-ion y dada la gran diferencia de masas (unas 1800 veces), la amplitud de la oscilación es muy pequeña. El cálculo de esta frecuencia suministra una escala de tiempos significativos contra la cual pueden compararse los mecanismos que tienden a amortiguar las citadas oscilaciones, de estos el más determinante es el de las colisiones entre iones y electrones. Para evitar que sean amortiguadas en exceso es necesario que la frecuencia de las colisiones sea mucho menor que la frecuencia de oscilación del plasma, es decir:

$$\nu_p \gg \nu_c \quad \text{ec. 3.13}$$

$\nu_p$  frecuencia de oscilación del plasma,

$\nu_c$  frecuencia de las colisiones.

Es importante mencionar que algunos sólidos y líquidos: en especial metales, semiconductores y electrolitos; poseen propiedades de plasma; sin embargo, los plasmas gaseosos son el tema de estudio de la Química de Plasmas.



La frecuencia de oscilación del plasma puede expresarse también como una frecuencia angular,  $\omega_p$ :

$$\omega_p^2 = \frac{Ne^2}{\epsilon_0 m} \left( \frac{rad}{seg} \right)^2 \quad ec. 3.14$$

$$\omega_p = \sqrt{\frac{Ne^2}{\epsilon_0 m}} \frac{rad}{seg} \quad ec. 3.14 a$$

$m$ , masa del electrón

Sustituyendo los valores de las constantes, obtenemos:

$$\omega_p = 56\sqrt{N} \frac{rad}{seg} \quad ec. 3.14 b$$

o bien, nuevamente para la frecuencia del plasma:

$$\nu_p = \frac{\omega_p}{2\pi} \quad s^{-1} \quad ec. 3.15$$

## EQUILIBRIO DEL PLASMA

En el plasma se producen interacciones complejas entre las partículas: colisiones elásticas entre electrones, iones, átomos y moléculas; colisiones

inelásticas que dan lugar a excitación, disociación y ionización del gas; radiación de energía; interacción con campos electromagnéticos, etc. Por lo mismo, es difícil encontrar la solución de las ecuaciones diferenciales que explican el movimiento de las partículas individualmente. Surge así la necesidad de crear un concepto que nos ayude; una abstracción del fenómeno y dejar lo suficiente para aproximarnos al conocimiento de los plasmas. Se define un "electrón promedio" a uno que excluye los aspectos más finos del proceso, aun así, sirve, en una primera aproximación y en espera de un modelo más certero, como medio para estudiar los procesos que se dan en el plasma. A pesar de la simplificación de este, no es fácil explicar aún, por ejemplo, la ocurrencia de descargas eléctricas con energías tan bajas como puede ser la energía de ionización.

Una vez más mencionemos que un plasma exige la neutralidad del gas [6, 7, 13, 19], del equilibrio entre partículas cargadas y neutras. Esta condición, en el Argón, es la siguiente:



Esta ecuación implica la preservación de la neutralidad electrónica, es decir:  $n_e = n_{Ar^+}$

La Ley de Boltzmann permite definir la existencia de equilibrio entre estados excitados con el mismo grado de ionización. Para describir el proceso de excitación de partículas, la disociación e ionización de átomos y moléculas y fenómenos similares; no se consideran las partículas como sólidas esferas elásticas, sino que, buscando una mejor solución, se toman en cuenta sus estructuras internas. Los electrones en el átomo están situados a diferentes niveles de energía. Por ejemplo el nivel más bajo del átomo de hidrógeno es

el estado base,  $n=1$ , corresponde al átomo no excitado. Para transferir un electrón a un nivel más alto, digamos,  $n = 2, 3, \dots$  se debe suministrar al átomo una determinada cantidad de energía,  $E$ . Si la energía de excitación es igual o mayor a la del potencial de ionización, se observará la ionización del átomo en ion y electrón.

## TRANSICIONES ELECTRÓNICAS EN LOS ESTADOS BAJOS DE ENERGÍA

La emisión del plasma puede ser de tres tipos de transiciones electrónicas en los estados bajos de energía:

1. Libre-Libre: Se produce desaceleración electrónica en presencia de los campos iónicos, atómicos y moleculares. Se caracteriza por producir un espectro continuo de emisión.
2. Libre-Ligado: En este tipo de transición ocurren fotorrecombinaciones por lo que el espectro de emisión es continuo para ciertos intervalos de frecuencia.
3. Ligado-Ligado: la transición del electrón ocurre entre los niveles de energía atómico y molecular. En este caso el espectro de frecuencias de emisión es de líneas y de bandas respectivamente.

Consideremos un gas a temperatura  $T$  de átomos del mismo elemento y dos niveles de excitación,  $m$  y  $n$ , con energías  $E_n$  y  $E_m$ . Cada uno de estos niveles corresponde a los términos cuánticos  $J_n$  y  $J_m$ . Entonces definimos los pesos estadísticos,  $g$  de los niveles, como  $g = 2J + 1$  [6, 9, 13, 19].

Cada uno de los pesos estadísticos  $g$  representa la contribución de este nivel con respecto al conjunto de niveles.



A partir de esto la distribución de partículas en estados excitados (población de niveles) está dada por la ecuación de Boltzmann, que define el equilibrio entre dos niveles de estados excitados, es decir:

$$\frac{n_n}{n_m} = \frac{g_n e^{-\frac{E_n}{kT}}}{g_m e^{-\frac{E_m}{kT}}} \quad ec. 3.17$$

$n_n$  y  $n_m$  son las densidades de partículas (part/m<sup>3</sup>).

Los pesos estadísticos equivalentes de niveles superiores serán menos probables que los niveles inferiores, pues cuanto más alto el nivel menos estable es. Esta ley depende de la temperatura del medio y de las propiedades físicas del plasma. Esta ley no describe la distribución de población en el interior de un mismo estado de ionización, sino de un estado dado con respecto al estado base.

En el primer caso la energía de excitación  $E_0$  del estado base es nula entonces la ecuación anterior queda como [6, 9, 13]:

$$\frac{n_n}{n_0} = \frac{g_n}{g_0} e^{-\frac{E_n}{kT}} \quad ec. 3.18$$

En el segundo caso la energía de excitación es diferente de cero y entonces, se sumarán todos los niveles de población:



$$\frac{n_0}{\sum n} = \frac{g_0 e^{-\frac{E_0}{kT}}}{\sum g e^{-\frac{E}{kT}}} \quad ec. 3.19$$

En esta ecuación tenemos que:

$$\sum g e^{-\frac{E}{kT}} = g_0 + g_1 e^{-\frac{E_1}{kT}} + g_2 e^{-\frac{E_2}{kT}} + \dots + g_n e^{-\frac{E_n}{kT}} = Z(T) \quad ec. 3.20$$

$Z(T)$  es la función de partición del gas a la temperatura  $T$ . Por lo tanto:

$$\frac{n_0}{\sum n} = \frac{g_0 e^{-\frac{E_0}{kT}}}{Z(T)} \quad ec. 3.21$$

Pero esta ecuación no da información sobre la población total de dos estados de ionización sucesivos. En su lugar se emplea la Ley de Saha.

#### ECUACIÓN DE SAHA

Si se considera la población total de un estado ionizado  $q$  (que podría ser el estado neutro) y la población total del estado ionizado,  $q+1$ , podremos

escribir una relación entre  $n_{q+1}$  y  $n_q$  [6, 9, 13, 19]. Tal ecuación es la expresión matemática de la Ley de Saha:

$$S(T) = \frac{n_e n_{q+1}}{n_q} = \frac{2Z_{q+1}}{Z_q} \left( \frac{2\pi m_0 kT}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} e^{-\frac{E_{ion}}{kT}} \quad ec. 3.22$$

$Z$  es el equivalente de la función de partición para el electrón,

$E_{ion}$  Es la energía de ionización para pasar del estado  $q$  al estado  $q+1$ ,

$h$  es la constante de Plank,

$k$  es la constante de Boltzmann,

$m$  es la masa del electrón,

$T$  es la temperatura absoluta del electrón y

$Z$  es la función de partición del estado considerado.

### EQUILIBRIO TERMODINÁMICO DEL PLASMA

El equilibrio termodinámico de un plasma es una situación idealizada, en la que este se considera aislado del exterior y en la que no existen gradientes ni flujos. Todos los parámetros del plasma permanecen sin cambio en el tiempo y en el espacio. La expresión matemática para esta especialísima condición es [5, 6, 9, 13]:

$$T_{cin} = T_{exc} = T_{rot} = T_{ion} = T_e = T_{rad} \quad ec. 3.23$$

En otras palabras: existe equilibrio termodinámico completo si se puede definir una sola temperatura en un punto.

## PROPIEDADES TERMODINÁMICAS DE LOS PLASMAS

Las propiedades termodinámicas de los plasmas se asocian principalmente con la temperatura. Revisaremos las principales, que son:

1. Temperatura Cinética
2. Temperatura de excitación electrónica o de Boltzmann
3. Temperatura de rotación
4. Temperatura de ionización
5. Temperatura electrónica
6. Temperatura de radiación

Profundicemos en cada uno de estos conceptos,

### 1. Temperatura Cinética

Dos parámetros ligados al fenómeno del plasma son la temperatura cinética  $T_{cin}$  [5, 6, 7, 9, 13, 24] de una partícula de masa  $m$  y velocidad  $v$ . No puede garantizarse que la velocidad sea constante y rectilínea por lo que se prevé para sustituirla una velocidad media entre los puntos extremos de su trayectoria; esta velocidad media la da una función de distribución  $f(v)$  llamada Ley de Maxwell-Boltzmann y es el medio por el cual podemos definir una temperatura cinética  $T_{cin}$ :

$$f(v) = 4\pi \left( \frac{m}{2\pi kT} \right)^{\frac{2}{3}} v^2 e^{-\frac{mv^2}{2kT}} \quad ec. 3.24$$



m en kg

$v$  en  $\frac{m}{s}$ ,

T en K

k la constante de Boltzmann.

El máximo en  $f(v)$  define la velocidad más probable, la cual se encuentra por diferenciación de la ecuación 3.24 e igualándola a cero; en términos matemáticos:

$$\frac{d[f(v)]}{dv} = 0$$

$$\sqrt{\frac{v_{max}}{m}} = 2kT \quad ec. 3.25$$

a velocidad media se encuentra integrando la ecuación 3.24

$$v_m = 2\sqrt{\frac{2kT}{\pi m}} \cong 1.13 v_{max} \quad ec. 3.26$$

Así como la raíz cuadrada de la velocidad media  $|v|$

$$|v| = \sqrt{\frac{3kT}{m}} \cong 1.06 v_{max} \quad ec. 3.27$$

El equilibrio termodinámico del plasma está completamente determinado por su composición química y dos parámetros termodinámicos, por ejemplo temperatura y presión. La presión se considerará constante en todos los puntos del espacio. Todos los procesos elementales del plasma, por ejemplo, disociación, asociación, ionización, densidad, capacidad térmica, etc.,... son función únicamente de la temperatura, la presión y de la composición química y cada proceso esta balanceado por su opuesto; por ejemplo, la ionización se anula por la simultánea recombinación.

## 2. Temperatura de excitación electrónica o de Boltzmann

La ley de Boltzmann permite definir un equilibrio entre estados excitados en función de la temperatura [5, 6, 7, 13, 24]. También es posible definir la temperatura de excitación de los electrones ligados,  $T_{ex}$ , tal que:

$$\frac{n_m}{N} = \frac{g_m e^{-\frac{E_n}{kT}}}{Z(T_{ex})} \quad ec. 3.28$$

$n_m$  es la población del nivel  $m$ ,  $N$  la población total.  $T$  es la temperatura de los rayos emitidos.

### 3. Temperatura de rotación

De manera similar a la emisión de un rayo atómico, se puede definir un rayo de rotación que proviene de la rotación de una molécula diatómica o poliatómica [5, 6, 9, 13] y que absorbe una energía, es decir:

$$I = \frac{cY^4}{Q} S_j e^{-\frac{hcE_{rot}}{kT_{rot}}} \quad ec. 3.29$$

Y es la frecuencia de la transición,

Q es la función de partición,

S es la fuerza del oscilador (equivalente de la probabilidad de la transición).

Como la energía de rotación es generalmente muy pequeña, la temperatura de rotación  $T_{rot}$  es un buen indicador de la temperatura del gas.

### 4. Temperatura de Ionización, $T_{ion}$

Es la temperatura  $T_{ion}$  que interviene en la ecuación de Saha y que permite describir la ionización [5, 6, 7, 13]

$$S(T) = \frac{n_e n_+}{n_0} \quad ec. 3.30$$



## 5. Temperatura Electrónica

Es la temperatura ( $T_e$ ) de los electrones libres [5, 6, 9, 13], es decir, los situados en el continuo o por encima de la energía de ionización. Estos se desexcitan y producen un fondo continuo  $\varepsilon$  que depende de la longitud de onda y de  $T_e$ :

$$\varepsilon(\lambda, T_e) = \frac{C n_e^2 Z^2 F(\lambda, T)}{T_e^{1/2} \lambda^2} \quad ec. 3.31$$

F es un término de corrección.

## 6. Temperatura de Radiación

Todo cuerpo posee una cierta temperatura por la que emite una radiación [5, 6, 9, 13]. La Ley de Plank aplicada a nuestro tema de estudio resulta:

$$I(\nu) = \frac{2h\nu^3}{c^2 e^{\frac{h\nu}{kT_{rad}} - 1}} \quad ec. 3.32$$

## EQUILIBRIO TERMODINÁMICO LOCAL DEL PLASMA, LTE.

El plasma en equilibrio es una idealización del fenómeno fisicoquímico real, pues hasta el momento no es posible producir la igualdad térmica local en todos los puntos del plasma [6, 9, 13, 24]. Aún existe una distancia, a ve-

ces insalvable, entre nuestros planteamientos teóricos y la maravilla de un plasma en actividad. Los procesos que ocurren —y que ignoramos en la simplificación— son principalmente procesos de transporte, transporte de masa, de carga, de momentum y de energía; además de la inevitable ionización localizada, que a despecho de lo asentado previamente, es apenas balanceada por recombinación y nunca por absorción.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## CAPÍTULO IV

### CLASIFICACIÓN Y GENERACIÓN DE PLASMAS

Básicamente los plasmas se caracterizan por su origen, en a) Plasmas naturales y b) Plasmas artificiales; demos una revisión somera de ambos.

#### a) PLASMAS NATURALES

Sobre los plasmas naturales se ha hecho un breve resumen en la introducción. Sin duda los que más impresionan nuestros sentidos son las auroras boreales y australes<sup>1</sup>; las que conozco solamente por las referencias y alguna fotografía. Pero por su magnificencia es necesario estar presentes cuando suceda una o unas en el futuro. Olvidar una mención particular para las llamas producidas por la combustión sería imperdonable; si fue en nuestra introducción punto de partida de este trabajo, justo es repetir que una flama es conductora

---

<sup>1</sup> Las que conozco solamente por referencias y alguna fotografía. Espero, sin embargo, estar presentes una de ellas en un futuro cercano.



de la electricidad, y por lo tanto, posee la cualidad básica de los plasmas. Los rayos o descargas eléctricas de la atmósfera hacia la tierra es otra manifestación del mismo fenómeno, es también un plasma el arco y la chispa que salta de un punto de un potencial a otro.

## b) PLASMAS ARTIFICIALES

Se conocen varias formas de la generación natural de plasmas; mencionemos la más frecuente en primer lugar. La conducción de corriente eléctrica a través de un gas como consecuencia de un campo eléctrico que acelere las moléculas y produzca choques entre ellas, puede cambiar la condición de dieléctrico original del gas y, con la excitación eléctrica incrementar su temperatura y hacerse conductor. Pues si bien, un gas a temperatura ambiente se comporta como dieléctrico, una proporción pequeña de cargas será suficiente para convertir el gas en un conductor eléctrico. es decir: en un plasma.<sup>2</sup> Para ciertas aplicaciones los plasmas son producidos por: descargas de ondas de choque, radiofrecuencia, microondas, láser o haces de partículas de alta energía y por gases calientes en hornos de alta temperatura. Vamos a hacer un análisis de las principales formas de producir plasmas artificialmente, empecemos por los

### PLASMAS PRODUCIDOS POR DESCARGAS ELÉCTRICAS

Los plasmas producidos por descargas eléctricas se dividen en dos grupos. El primero es el plasma caliente o en equilibrio, que se caracteriza por tener igual temperatura entre los iones y los electrones; es decir, el estado termodinámico del plasma se aproxima al equilibrio, más exactamente, al equilibrio termodinámico local (LTE), estos son llamados plasmas térmicos. Los producidos

---

<sup>2</sup>A este proceso se le llama ruptura dieléctrica y existen muchas formas de realizarla; sucede con el paso de una corriente a través de un gas ionizado; una diferencia de potencial suficientemente elevada dentro de un gas produce el fenómeno de descarga gaseosa. Estás es la más común, pero no la única forma de producir plasma.



por plasmas de arco, de antorchas o descargas inductivas (RF) son ejemplos típicos de plasmas térmicos.

El segundo grupo lo integran los plasmas conocidos como plasmas fríos o de no-equilibrio y se tipifican por tener altas temperaturas en los electrones y baja temperatura en los iones.

### TIPOS DE PLASMAS FRÍOS

Los tipos de plasmas que se producen son:

1. Descargas de Resplandor
2. Descargas de Radio-Frecuencia (inducción)
3. Descargas de Microondas

Discernir la pertenencia de un plasma a uno o a otro grupo es importante. Los plasmas fríos y los plasmas calientes se distinguen por medio de las relaciones

$$\frac{E}{p} \text{ o } \frac{E}{n}$$

Estos son los indicadores idóneos pues expresan de una manera simple el proceso de intercambio de energía entre electrones e iones del plasma.

$E$  es el campo eléctrico,

$p$  es la presión del plasma, y

$n$  la densidad de partículas.



## PRODUCCIÓN DEL PLASMA

Para generar un plasma hace falta que las cargas se agiten y choquen, esta condición viene de excitar a los electrones por medio de campos eléctricos y de condiciones de presión adecuadas. Las colisiones en parejas y el intercambio de energía asociada entre los electrones y los iones se incrementan debido a las presiones altas y a la alta densidad de partículas. Un campo eléctrico que se intensifica tiende a incrementar el exceso de energía del gas de electrones y hace pequeños los valores de las relaciones

$$\frac{E}{p} \text{ y } \frac{E}{n}$$

Los plasmas fríos presentan valores grandes de estos parámetros, generalmente mayores por varios ordenes de magnitud respecto de los valores de estas relaciones para un plasma caliente.

## MECANISMOS DE LOS PLASMAS FRÍOS

Son tres los mecanismos de producción de un plasma frío:

1. Descargas de Resplandor
2. Descargas de Radio-Frecuencia, o por inducción
3. Descargas de Microondas



## 1. DESCARGAS DE RESPLANDOR

La descarga de resplandor es el mecanismo más simple para producir un plasma. Esta descarga se efectúa dentro de un tubo de vidrio con gas a baja presión y dos electrodos en los que se aplica una diferencia de potencial. Decimos que el plasma consiste de dos clases de partículas: electrones y partículas pesadas (átomos, iones, moléculas). La distribución de velocidades de Maxwell en ambos grupos de partículas, las temperaturas cinéticas  $T_e$  y  $T$ , y la distribución de Boltzmann describen la distribución de niveles excitados. El intercambio de energía efectivo ocurre durante las colisiones entre las partículas; esto es, mientras duran las colisiones entre electrones rápidos y partículas pesadas y lentas.

## 2. DESCARGAS DE RADIOFRECUENCIA POR INDUCCIÓN

Los plasmas de origen inductivo o de radiofrecuencia (RF) se producen sin electrodos. Esta manera de excitación provoca en un gas rarificado (típicamente entre  $10^{-3}$  y  $10^{-1}$  mm Hg. Las densidades de corriente requeridas son grandes, del orden de  $2$  a  $3 \times 10^3$  A/m<sup>2</sup> y una conductividad eléctrica del gas de  $10^4$  ( $\Omega$  m)<sup>-1</sup>. La corriente iónica máxima que puede aportar la fuente de RF es proporcional a la densidad electrónica ( $n$ ) del plasma. Por lo tanto, como primera condición para calcular esta corriente máxima es necesario conocer este número.

Los plasmas inductivos necesitan generalmente de frecuencias elevadas y, en consecuencia, de generadores eléctricos o de convertidores de potencia con frecuencias de trabajo del orden de los MegaHertz.

Es importante distinguir el fenómeno de inicio de la descarga por inducción del estacionario o de alimentación. Las componentes axiales del

campo eléctrico (capacitivo), provocan el inicio de la descarga debido a la diferencia de potencial alternativo entre las espiras del solenoide. El campo eléctrico inducido en el gas por el campo magnético variable de la bobina, asegura, entonces, la alimentación; este campo eléctrico es normal al eje de la bobina de inducción (fuente).

Esto es: La fuente de Radio Frecuencia acoplada inductivamente a los campos eléctricos crea el inicio de la descarga. En el caso de la alimentación, ésta es asegurada por las fuerzas electromagnéticas inducidas.

### DENTRO DEL TUBO EXISTEN DOS DISTRIBUCIONES ESPACIALES

En el lugar en donde la descarga tiene lugar se distinguen dos partes:

- a) Una región dentro del plasma en donde el campo es muy alto. En ella
- b)  $\frac{E}{p}$  es del orden de  $10^6$  a  $10^7$   $\frac{\text{volts}}{\text{cm} \times \text{mm de Hg}}$ ,
- c) Una región del plasma producido por efecto de la excitación de radiofrecuencia (RF), en donde el campo continuo es de escasa influencia, o nulo.

### 3. DESCARGAS DE MICROONDAS

En la actualidad los generadores de plasma de microondas encuentran gran aplicación principalmente en Química de Plasmas, espectroscopia y en el depósito de recubrimientos. Las antorchas de microondas encuentran muchas ventajas técnicas por sus características de pureza del plasma, por la generación y soporte del plasma de no-equilibrio bajo un gran intervalo de condiciones externas, y la gran eficiencia de la disociación de algunos gases.

## Descripción del fenómeno

La fuente electromagnética se coloca en forma simétrica y radial para que las descargas sean parcialmente disipadas y reflejadas en el plasma. La energía de las microondas del campo magnético está dada por la luz y los electrones móviles.

Las ecuaciones de energía y continuidad, la Ecuación de Maxwell, la Ley de Dalton y las condiciones de quasi-neutralidad describen las descargas de microondas, características de un gas atómico.

Existe el equilibrio térmico para las partículas pesadas en la superficie de las paredes en contacto con el plasma, pero los electrones permanecen "calientes": estos son reflejados por las paredes con la misma energía con la cual incidieron.

La entrada de la potencia de microondas y la continuidad de las soluciones para  $E(r)$  en las regiones de frontera de adentro y afuera, determinan la magnitud del campo eléctrico.

La suma de las ondas electromagnéticas incidente y reflejada, dentro de la descarga, es la solución de la ecuación de onda

## Problemática

El modelo de descargas de microondas de no-equilibrio presenta considerables dificultades cuando se consideran plasmas moleculares. Para descargas en gases moleculares (en contraste con los atómicos), un importante —e influyente— canal para la disipación de la energía electromagnética es la excitación de los estados cuánticos rotacional y vibracional.

## Descripción del Fenómeno

En el plasma molecular de no-equilibrio es común que el calentamiento del gas ocurra a través del rotacional y algo más importante por la relajación del estado cuántico vibracional. Para la descripción matemática de las propiedades del plasma molecular es necesario introducir el concepto de temperatura molecular vibracional.

En una descarga de microondas la temperatura de no-equilibrio esta presente con mayor claridad. La temperatura electrónica es, prácticamente constante, en la región pre-axial; ésta aumenta hacia los límites de la descarga y decrece progresivamente al acercarse a las paredes frías del tubo. Como el campo electromagnético de entrada es incrementado, la diferencia de temperatura entre el electrón y el ion decrece en la región axial y aumenta notablemente en la periferia de la descarga.

Es interesante comparar las características de las descargas de microondas calculadas en equilibrio y en no-equilibrio. El perfil radial de una temperatura de equilibrio es similar a la distribución de temperatura radial del ion y difiere cualitativamente de la distribución de temperatura radial del electrón.

Si aumenta la temperatura y la concentración de electrones en la periferia de la descarga de microondas de no-equilibrio, favorece la proyección de los efectos del campo electromagnético en la región axial. En la periferia de la descarga de no-equilibrio la intensidad del campo eléctrico  $E_R$ , es notablemente mayor en comparación con el caso de equilibrio; pero, en el eje  $E_0$ , es algo menor.

Los resultados de las investigaciones teóricas y experimentales muestran que, la generación y formación de antorchas de plasma estacionario de mi-

croondas es posible únicamente cuando están presentes en las descargas regiones de recirculación de gas.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## **CAPÍTULO V**

### **MÉTODOS DE ANÁLISIS DE PLASMAS**

#### **DE BAJA TEMPERATURA**

La necesidad de diagnóstico y el mejoramiento de los procesos tecnológicos en plasmas, ha dado como resultado el desarrollo de varios métodos experimentales para la investigación del plasma. Esto incluye los métodos de emisión, absorción y dispersión de fotones, métodos de interferometría, en particular, holografía y espectroscopia de láser activo; métodos de contacto, sondas, termopares, espectrometría de masas, cromatografía, calorimetría, etc. Sin embargo, hasta los tiempos presentes, la mayor información del comportamiento del plasma se ha obtenido por espectroscopia.

#### **V.1 MÉTODOS DE DIAGNÓSTICO**

##### **Definición**

El estudio de las propiedades del plasma comienza con la descripción de los fenómenos observados y la determinación de las condiciones en las que ellos se desarrollan. Esta etapa consiste de la medición de los parámetros del plasma:

básicamente la concentración de electrones e iones, la composición del plasma, la presión y la temperatura. La realización de tales mediciones constituye el llamado diagnóstico del plasma.

Cuando se trata del plasma, las mediciones de una misma magnitud física mediante diversos procedimientos proporciona, con frecuencia, diferentes resultados. Son de mayor confiabilidad los métodos basados en el registro de la variación de las manifestaciones exteriores del plasma, en la observación de sus radiaciones, etc. Así pues, las fuentes de información más frecuentemente utilizadas sobre las propiedades del plasma son los propios fenómenos físicos que existen en él.

#### LOS MÁS IMPORTANTES MÉTODOS DE DIAGNÓSTICO SON:

1. Método fotográfico
2. Fotorregistro
3. Diagnóstico por el Método de Análisis Espectral de la Luz
4. Método de Diagnóstico por Sondeo con microondas
5. Diagnóstico por medio de una Sonda Magnética
6. Diagnóstico por medio de una Sonda Eléctrica

#### 1. MÉTODO FOTOGRÁFICO

Su nombre mismo nos da la pauta del principio en que se basa; se trata de fotografiar el plasma; para el caso de este diagnóstico se fija la dinámica de variación de las singularidades estructurales exteriores del plasma. Como la duración de una descarga por impulso en un gas constituye, por regla, sólo fracciones de segundo, para tomar vistas del plasma se impone como condición para obtener la información esperada la de cámaras ultrarrápidas.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Con este método de diagnóstico es posible investigar procesos de gran rapidez tales como: las descargas de impulso, la descarga de chispa y de relámpago. En la actualidad se dispone de aparatos cinematográficos y fotográficos ultrarrápidos.

## 2. FOTORREGISTRO

La fotografía de los procesos que en el plasma se desarrollan con rapidez se efectúa con cámaras de objetivos móviles. En la cámara del fotorregistrador hay un espejo giratorio. El espejo giratorio se fabrica en forma de un prisma poliédrico especular.

Junto con la cámara fotográfica ultrarrápida (fotorregistrador) son utilizados los transductores electrónico-ópticos. Con ellos se consigue obtener la imagen de la descarga durante un intervalo de tiempo del orden de tan sólo una millonésima de segundo.

Al estudiar una descarga espontánea desde la parte externa del tubo, es de gran utilidad el empleo de la cámara de niebla (Cámara de Wilson). La utilización de la cámara de niebla permite imprimir series de fotografías de la distribución de los recorridos de las partículas ionizantes para llegar a conclusiones a partir de mediciones directas de las imágenes obtenidas al fotorregistrar los procesos en el plasma.

## 3. DIAGNÓSTICO POR EL MÉTODO DE ANÁLISIS ESPECTRAL DE LA LUZ

El análisis espectroscópico de la luz que emite la descarga en un gas es un método de diagnóstico de mucha importancia. La intensidad y la composición espectral de la radiación del plasma dependen de su temperatura y densidad. Usando el método de análisis espectral. Se trata, dicho someramente de cono-

cer las frecuencias de emisión y sus amplitudes asociadas. Esta información y su análisis son suficiente para estimar razonablemente la temperatura de los electrones e iones, la composición y concentración de diversos componentes del plasma y su grado de su pureza.

#### Alcance del Método

Los resultados de las mediciones espectroscópicas complementan considerablemente el conocimiento acumulado hasta el momento sobre los procesos que transcurren en el plasma.

#### 4. MÉTODO DE DIAGNÓSTICO POR SONDEO CON MICROONDAS

Las microondas constituyen una radiación electromagnética de alta frecuencia, a fin de dar una idea de éstas podemos decir que son pulsaciones con longitudes de onda que va de los centímetros a las fracciones de milímetro.

Haciendo observaciones y mediciones directas sobre la absorción y dispersión de las microondas en el plasma, es posible llegar a una cuantificar la densidad de electrones en él. Además, mediante el estudio de las vibraciones de alta frecuencia del plasma se puede conocer la temperatura de los electrones.<sup>3</sup>

#### 5. DIAGNÓSTICO POR MEDIO DE UNA SONDA MAGNÉTICA

Es preciso conocer la distribución de la intensidad de campo magnético en el seno del plasma, pues el campo magnético está íntimamente ligado con las propiedades del plasma. Se tiene un problema importante en el diagnóstico del plasma cuando se realizan trabajos experimentales, ya que se tienen que

---

<sup>3</sup> Interrogante para abocarse en busca de respuestas en el futuro cercano

Para comprender el fundamento físico del método de microondas, se tiene que estudiar, con más detalle el problema de la propagación de las ondas electromagnéticas en el plasma.



hacer las mediciones dentro del tubo de descarga. La ventaja de este método reside en que Si se conoce la estructura de los campos magnéticos se puede adquirir información valiosa de la distribución de las corrientes del plasma. En ciertos casos, resulta incluso posible determinar la temperatura del plasma.

#### Principio de Funcionamiento

La sonda magnética, base de este método de diagnóstico, es una diminuta bobina de alambre de cerca de 1 mm de diámetro. Esta bobina se fija en el extremo de un pequeño tubo de cuarzo. Esta sonda puede introducirse en cualquier parte de la cámara de descarga de un gas y explorar este espacio enviando información. El plasma induce una fuerza electromotriz (FEM) en la bobina de la sonda, desde luego, esto es posible tratándose de un campo magnético variable como el de un plasma. La diferencia de potencial medida en las terminales de la bobina sonda tiene una relación directa con la intensidad del campo magnético, por lo que es posible conocer la intensidad de campo magnético si se hace un muestreo punto a punto dentro del tubo.

#### 6. DIAGNÓSTICO POR MEDIO DE UNA SONDA ELÉCTRICA<sup>4</sup>

El método de las sondas fue propuesto por Langmuir en 1923. La sonda que se utiliza con este método de diagnóstico está hecha de un fino y recto alambre metálico cilíndrico; se aísla en toda su longitud, excepto en sus extremos, esto es. Las caras rectas del cilindro, las bases, por así decirlo, se dejan al descubierto, en tanto que la superficie curva de la sonda se cubre con un material dieléctrico. Con estas sondas se pueden determinar la concentración de electrones y la temperatura en el plasma.

---

<sup>4</sup> Más información sobre las sondas electrostáticas fue desarrollada en la tesis "Diseño de un laboratorio de Química de Plasmas" de Guadalupe Cisneros Ramírez Facultad de Química, UNAM 1990 (Asesor del tema M en C Juan Lartigue Gordillo)



Una importante propiedad del plasma se manifiesta con este método de diagnóstico: Resulta que éste no se subordina sino en una región a la Ley de Ohm; es por eso que con una diferencia de potencial positiva, la intensidad de corriente en el plasma tiende a cierto valor límite que no depende del valor de la diferencia de potencial. A este valor límite se le llama corriente de saturación<sup>5</sup>.

Conociendo la intensidad de la corriente de saturación y la velocidad térmica de los electrones, podemos hallar la concentración de electrones en el plasma [1, 2].

## V.2 MÉTODOS ESPECTROSCÓPICOS DE DIAGNÓSTICO

Generalmente se acepta el hecho de que la elección correcta del equipo requerido y la aplicación de nuevos o más eficientes métodos de medición son decisivos para el éxito de un experimento. La tecnología se ve así exigida de diseñar y proveer instrumentos para a los científicos, ya que las necesidades prácticas van de la mano con los avances teóricos. Teoría y experimento van en rutas paralelas, pero siempre impulsándose una a la otra. Más o menos así ha ocurrido al respecto de la teoría de los plasmas y la espectroscopia, pues ha habido progresos en el desarrollo de las técnicas de espectroscopia y de equipos que han contribuido al conocimiento de los plasmas; Sin embargo, no todo está resuelto pues es importante obtener mayor información con respecto a la sensibilidad, resolución y posibilidades de detección de los picos de la señal en los aparatos espectrales modernos. Veamos uno por uno los métodos de diagnóstico:

1. Método de Diagnóstico con Monocromadores y Espectrógrafos
2. Diagnóstico con el Interferómetro de Fabry-Pérot

---

<sup>5</sup> Sin embargo, no es el único caso donde se presenta tal fenómeno, la intensidad de magnetización con respecto a la corriente tiene similar respuesta.



3. Diagnóstico por el Método de Detección de luz
4. Detectores Fotoeléctricos
5. Fotoelementos con efectos externos
6. Fotomultiplicadores

## 1, MÉTODO DE DIAGNÓSTICO CON MONOCROMADORES Y ESPECTRÓGRAFOS

Los monocromadores y los espectrógrafos (que algunas veces son considerados dentro de la clasificación general de espectrómetros), son instrumentos ópticos con una rendija de entrada que forma imágenes dispersadas en el espacio dependiendo de la longitud de onda de la radiación. El cambio en la imagen de la rendija se produce por la dispersión de la radiación en un prisma o en una rejilla de difracción. Los monocromadores y espectrógrafos detectan el espectro fotoeléctrico o fotográfico, respectivamente.

A continuación se enumeran los principales parámetros que caracterizan a un aparato espectral dispersivo:

- Fuente luminosa
- Poder de resolución
- Transmisión espectral
- Intervalo espectral de dispersión

En la tecnología actual se han desarrollado rejillas de difracción de alta resolución, principalmente para la formación de hologramas y en los espectrómetros más modernos también se prefiere a las rejillas y no a los prismas de difracción.

## 2. DIAGNÓSTICO CON EL INTERFERÓMETRO DE FABRY-PÉROT

Uno de los objetivos del diagnóstico de un plasma es el análisis de las formas espectrales de las líneas atómicas o moleculares, provenientes de la emisión o absorción de electrones dentro del seno del gas.

Una detección alta de luz indica que las medidas del ancho de la línea de emisión espectral de energía, no son mayores a 0.02 nm y tal observación se hace posible al utilizar un monocromador de dispersión de alta resolución. Sin embargo, las líneas espectrales de los plasmas que no están en equilibrio son de aproximadamente de  $10^{-6}$  nm. En estos casos se utiliza un espectroscopio de alta resolución para medir estas registrar y medir estas líneas. El más simple y más comúnmente empleado para obtener los espectros mencionados es el Interferómetro de Fabry-Pérot.

El Interferómetro de Fabry-Pérot, como lo indica su nombre trabaja por interferencia entre la onda incidente y la reflejada. El patrón de interferencia que se recibe en una pantalla muestra los niveles de energía, es éste el espectro que nos permite efectuar el análisis ya antes mencionado para conocer los fenómenos de emisión y absorción que tienen lugar en el plasma.

### Interferómetro de Fabry-Pérot

Este instrumento óptico está formado por dos placas planas y paralelas, de vidrio o de cuarzo, con un baño de material reflejante en su superficie exterior, están separadas una distancia  $t$  y para prevenir interferencias no deseadas de los rayos reflejados de la superficie trasera, las placas frecuentemente tienen forma de cuña; Es decir, son prismas.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Cuando el haz de luz incidente pasa a través del Interferómetro se produce un gran número de haces paralelos de luz como resultado de numerosas reflexiones de la superficie semitransparente, todos los haces recorren la misma trayectoria y por esta razón se produce la interferencia deseada.

Las principales características del Interferómetro de Fabry-Pérot son las que a continuación enumeramos:

1. Dispersión:

a) La dispersión no depende de la distancia entre las placas del Interferómetro.

b) Para cierto ángulo la dispersión es infinita.

2. Un intervalo espectral libre.

3. Funcionamiento del aparato.

Principales Parámetros del instrumento

El contraste del Interferómetro es el valor  $\gamma = I_{\text{máx}} / I_{\text{mín}}$ . La fineza del Interferómetro es la razón  $F = \Delta\lambda / \delta\lambda$ , la fineza del aparato caracteriza la resolución espectral, una fineza (F) grande tiene mayor resolución media. Si la separación de las placas  $nt \cos\varphi$  se cambia en varios ordenes de interferencia  $k = k_0, k_0+1, k_0+2 \dots$ , entonces la longitud de onda de la radiación que pasa a través del Interferómetro satisface la condición  $k\lambda = 2nt\cos\varphi$ .

El valor de  $nt \cos\varphi$  se puede cambiar manipulando las siguientes propiedades del interferómetro:



1. Variando la inclinación relativa del Interferómetro al eje óptico, i.e., cambiando el ángulo  $\varphi$ .
2. Variando la distancia  $t$  entre las superficies reflejantes del Interferómetro por el barrido del piezoeléctrico de las placas.
3. Variando el índice de reflexión  $n$ . Se modifica la presión en la cámara que contiene al Interferómetro.

La cámara —de vacío— donde se introduce el Interferómetro de Fabry-Pérot es de un diseño propicio para hacer observaciones, por lo tanto requiere de ventanas transparentes; los controles manométricos y un sistema de presurización están previstos para que la presión pueda ser aumentada o disminuida. Esta cámara también se utiliza para calibrar los diámetros de los orificios difractores; la linealidad de dispersión se corrige ajustando adecuadamente la distancia de los órdenes de interferencia.

### 3. DIAGNÓSTICO POR EL MÉTODO DE DETECCIÓN DE LUZ

Los principales problemas de la espectroscopia son dos: disponer de una alta capacidad de discriminación de los niveles de energía de la luz detectada y la medición, lo más precisa posible, de su intensidad.

La selección del detector de radiación apropiado para la solución de un problema de espectroscopia en particular, dependerá de las siguientes características:

1. sensibilidad espectral relativa, se busca que el detector tenga la respuesta apropiada en el intervalo de energías del espectro y, consecuentemente, permita la comparación de la intensidad de las líneas localizadas en varias partes del espectro (calibración relativa);



2. sensibilidad absoluta. Definida como la relación entre la intensidad de la señal de salida del detector y la intensidad emitida por la fuente de radiación (calibración absoluta);
3. La razón de señal-ruido. Determinada por los ruidos de la radiación y por los ruidos propios del detector, comparados con la señal útil propiamente dicha.
4. El intervalo dinámico máximo de la respuesta lineal del sistema de detector.

Es el intervalo en el cual la amplitud de la señal de salida es proporcional a la señal que emite la fuente de radiación;

5. El tiempo mínimo de reacción del detector a la señal de luz, también conocido como tiempo de respuesta; es producto de la constante de tiempo del detector.

#### 4. DETECTORES FOTOELÉCTRICOS

Se reciben varios tipos de radiación que serán divididos en tres grupos principales, en función de sus niveles de energía y de los detectores que se emplean para captarla: Nivel Fotográfico, su utilización justa está en el intervalo visible del espectro electromagnético. El intervalo de longitudes de onda es de 350 a 750 nm.

1. Nivel Térmico. Este intervalo corresponde a la radiación infrarroja; ya no es percibida por el ojo humano y sus longitudes de onda son mayores a 800 nm
2. Nivel Fotoeléctrico. El intervalo de longitudes de onda inicia en los 300 nm y sigue hasta las más pequeñas longitudes de onda, tales como los Rayos X o las radiaciones  $\alpha$ ,  $\beta$  o  $\gamma$ .



Los dos primeros niveles y sus correspondientes detectores no son parte de nuestro proyecto por lo que nos abocaremos con detalle al tercero enumerado. La razón de ser de esta selección radica en su extendido empleo en la práctica de la espectroscopia de plasmas.

Generalmente se utilizan dos tipos de detectores fotoeléctricos, estos son:

1. Fotoelementos con efectos externos y
2. Fotomultiplicadores

## 5. FOTOELEMENTOS CON EFECTOS EXTERNOS

El instrumento fotoeléctrico más simple es el tubo al vacío en el cual la superficie expuesta —superficie fotosensible— esta cubierta con una sustancia sensible a la radiación electromagnética —tal componente del detector es el fotocátodo del dispositivo— el ánodo se ubica en el centro del tubo. Si se hace incidir, previa colimación, en el tubo un rayo de esta onda con una longitud de onda cuya magnitud se encuentre en su rango de sensibilidad se producirá una corriente en el circuito.<sup>6</sup>

Una característica importante de los fotocátodos es la llamada "corriente oscura", es decir, la intensidad de corriente sin radiación incidiendo en la superficie sensible del detector. Como una regla empírica sabemos que, el umbral de sensibilidad del fotoelemento está determinado por las fluctuaciones de la co-

---

<sup>6</sup> La razón de llamarse detectores fotoeléctricos radica en el fenómeno que los hace sensibles a la radiación. Tal fenómeno es el Efecto Fotoeléctrico descubierto por Albert Einstein en 1905. La radiación se transmite en el espacio por medio de fotones, al incidir éstos en el fotocátodo excitan la estructura atómica del material y libera electrones, electrones que expuestos a un campo eléctrico sufrirán una aceleración. El fotocátodo se polariza con un potencial negativo respecto al ánodo, así, los electrones liberados llegan al ánodo, del número de electrones —cargas negativas— por segundo que pasen de un electrodo al otro es la corriente útil del detector; esta es la respuesta del detector en términos de los niveles de energía incidentes, es decir, de las frecuencias de la radiación-corriente del detector.

riente oscura. La densidad de corriente oscura de un fotocátodo moderno a temperatura ambiente está generalmente en el intervalo de  $10^{-14}$  a  $10^{-16}$  A/cm<sup>2</sup>. Para disminuir esta corriente es necesario disminuir la temperatura del cátodo. La temperatura óptima de enfriamiento depende del material del cátodo.

## 6. FOTOMULTIPLICADORES

Para la detección de la radiación de pequeñas intensidades se usan fotomultiplicadores. El principio de funcionamiento consiste en la emisión secundaria de electrones, la fotocorriente es amplificada por multiplicación como resultado de la emisión secundaria de electrones, causada por la incidencia de los electrones bombardeados.

El coeficiente de emisión secundaria  $\sigma$  se obtiene al dividir el número de electrones secundarios emitidos por la superficie entre el número de electrones primarios en cascada en la superficie.

El coeficiente de amplificación del fotomultiplicador es igual a  $\sigma^N$ , en donde N es el número de dinodos. Los fotomultiplicadores modernos tienen valores del coeficiente de emisión secundaria ( $\sigma$ ) que se encuentran en el intervalo 4-8 ( $4 \leq \sigma \leq 8$ ) y con 10 a 14 dinodos ( $10 \leq N \leq 14$ ), lo cual permite un gran factor de amplificación.

En el caso de señales de luz muy débil es mejor usar fotomultiplicadores operando en régimen de conteo de fotones. Los electrones generados aquí por un fotoelectrón, producen un voltaje en el ánodo. El impulso estimula la operación del discriminador-amplificador, que genera el impulso en la forma y amplitud necesaria para el contador o procesador analógico. La técnica de conteo de fotones tiene las siguientes ventajas:

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

La corriente oscura puede ser suprimida por el ajuste del discriminador de umbral. En este caso no son importantes las fluctuaciones del coeficiente de amplificación del fotomultiplicador porque los fotoelectrones generan un impulso normalizado.

Es más conveniente la digitalización de la señal en la mayoría de los casos.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## **CAPÍTULO VI**

### **DESARROLLO EXPERIMENTAL**

El presente capítulo trata de fundamentar la metodología seguida en la investigación del dominio de existencia del plasma de resplandor. Los resultados obtenidos en ella, se describen y justifican mediante el desarrollo de los pasos seguidos en cada uno de los experimentos realizados para encontrar una zona característica de existencia en el plasma.

#### **NUESTRO TUBO DE DESCARGA**

El laboratorio de plasmas cuenta con un tubo cilíndrico de cuarzo (vea la Figura 1). Este cilindro tiene un área transversal interna de  $20 \text{ cm}^2$  y una longitud de 40 cm, posee una terminal de 5 cm en cada extremo para conectarse a una fuente de alto voltaje de corriente directa; el sistema se completa con una bomba mecánica de vacío y un vacuómetro.

La descarga inicial se debe a electrones libres acelerados en el campo eléctrico, los cuales adquieren energía cinética suficiente para ionizar algunas moléculas del gas.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## VI.1 METODOLOGÍA:

Con el tubo de resplandor se efectuaron los siguientes experimentos y mediciones:

Al tubo de descarga se hace vacío durante una hora, al cabo de la cual se logra una presión —de vacío— de 0.15 mbar; posteriormente se hace funcionar la fuente de alto voltaje; se va elevando lentamente el voltaje hasta que se forma el resplandor del plasma (disponemos de un voltaje máximo de 990 Volts); se mantiene constante la presión y se disminuye paulatinamente el voltaje hasta que desaparece el plasma del tubo. Este fenómeno ocurre al llegar al voltaje de 650 Volts.

A continuación para encontrar con mayor precisión el dominio de existencia se lleva a cabo el proceso inverso en el manejo de las variables, es decir, se mantiene constante el voltaje y se varía la presión desde un máximo de 0.8 mbar.

Se observó que conforme se variaba el voltaje o la presión el color característico del plasma variaba de claro a intenso y después a claro. Suponemos que en el intervalo en donde el plasma es más intenso está la zona óptima de formación del plasma. La mejor para realizar algunos trabajos del diagnóstico de los datos obtenidos en cada caso dará una respuesta, es decir, se calculará la temperatura, la densidad electrónica y la velocidad en el plasma por medio de la sonda de Langmuir. Los datos obtenidos fueron graficados en un diagrama Presión vs. Voltaje (Gráficas I, II, IX y X) obteniéndose una zona característica que se repitió en cada una de las pruebas realizadas con aire.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

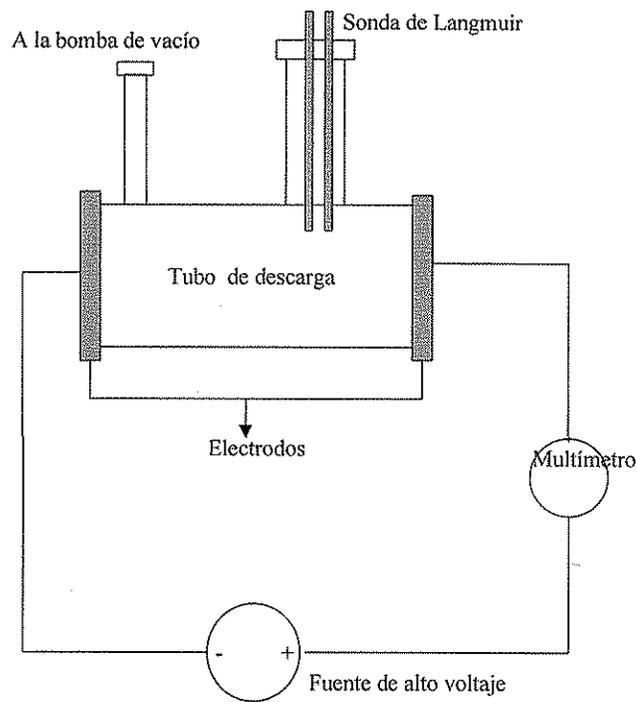


Figura 1 Diagrama del sistema para generar un Plasma de Resplandor

Otra de las etapas del experimento fue utilizar gases Helio (He) y Argón (Ar) y realizar las mismas mediciones para observar el comportamiento del plasma, es decir, se llenó el tubo de descargas con helio y con argón y se observó el mismo comportamiento que con aire (colores característicos). Al graficar Presión vs. Voltaje se obtuvo, de acuerdo con las Gráficas V y VIII, para cada caso, una zona característica en la cual el plasma tiene su origen y su extinción así como el cambio de color característico (o sea, claro-intenso-claro). El paso siguiente es el de realizar el diagnóstico del plasma, que se explicará en la próxima sección. Finalmente se realizó una prueba con más puntos en el intervalo de presión y con datos en la parte central, para comprobar si los resultados obtenidos eran consistentes. Las gráficas IX, X y XI muestran que los datos que se tomaron entre la línea de ignición y la de extinción se encuentran en

se tomaron entre la línea de ignición y la de extinción se encuentran en ese intervalo.

## VI.2. DIAGNÓSTICO

Cómo ya se explico en la sección II.3.1.5 el diagnóstico se efectúa con la sonda doble de Langmuir, con la que se mide el voltaje y la corriente generada en el circuito de sonda; los datos obtenidos en cada uno de los experimentos descritos anteriormente se graficaron para obtener las curvas características (Gráficas IV, VII y IX) con el fin de calcular las variables características del plasma: la temperatura, la velocidad de las partículas y la densidad de partículas del plasma. Los resultados se muestran en la Tabla 1 y Tabla 2. Con estos resultados se realizaron las gráficas de Densidad de partículas vs. Temperatura (Gráficas III, VI y XI) encontrándose en éstas una zona muy parecida a la de las gráficas de Voltaje vs. Presión (Gráficas I, II, V, VIII, IX y X). Lo que confirma que existe una región óptima de formación del plasma, adecuada para realizar los trabajos de investigación y las aplicaciones de estos.

Las gráficas X y XI resultan de una nueva medición, para este caso no sólo se tomaron las líneas de ignición y extinción, sino también se tomaron mediciones en la parte central del plasma y se encontró el mismo comportamiento que en los experimentos anteriores.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## **CAPÍTULO VII**

### **RESULTADOS**

Las Gráficas I, II, V, VIII y X, muestran las curvas de Presión (P) y Voltaje (V) del plasma de resplandor con aire, argón y helio; entre estas se define una zona en donde existe el plasma. A la curva superior le llamamos curva de ignición (aparición del plasma) y a la inferior le llamamos curva de extinción (desaparición del plasma). No se puede hacer el análisis antes del primer punto de presión que es de 0.15 mbar, pues, como se explicó en el desarrollo experimental, la bomba de vacío no alcanza un vacío mayor. Después del último punto observable, a la presión de 0.8 mbar el plasma desaparece, o es muy inestable y no es posible realizar el diagnóstico ni más mediciones.

Las Gráficas III, VI y XI, muestran las curvas de Temperatura (T) vs. densidad de partículas (N) del plasma de resplandor con aire y con Argón. En estas existe similitud en su comportamiento y por lo mismo existe semejanza con las gráficas I, II, V y VIII.

Utilizando las ecuaciones del capítulo III encontraremos algunos valores de los parámetros de nuestro plasma de resplandor para aire y Argón.

#### DISTANCIA DE LANDAU

Sustituyendo las variables de la ecuación 3.1 (capítulo III) y tomando los valores del aire de las tablas 1 y 2, se obtiene el valor de la Distancia de Landau:

$$l = \frac{1.67 \times 10^{-5}}{1.7 \times 10^5} \cong 1 \times 10^{-10} m$$

#### PARÁMETRO DE IMPACTO

Sustituyendo las variables de la ecuación 3.2 y tomando los valores de las tablas 1 y 2 obtenemos el valor del parámetro de impacto:

$$\alpha = \frac{10^{10}}{(21.1 \times 10^{15})^{\frac{1}{3}}} = 2.76 \times 10^{-5}$$

#### TRAYECTORIA LIBRE MEDIA

Quedó establecido que si  $\alpha \ll 1$  no existen colisiones cercanas y la Longitud de Landau no puede utilizarse en la relación de la trayectoria libre media de los electrones. Siendo así, utilizamos la ecuación 3.3a del Capítulo III; y cal-

culamos Sustituyendo los datos tomados del experimento llegamos al valor siguiente para la trayectoria libre media:

$N_A$  y  $d_A$ :

$$N_A = \frac{70 Pa}{1.38 \times 10^{-23} JK^{-1} \times 273 K} = 1.85 \times 10^{22}$$

Recordemos que  $d_A$  es la distancia interatómica y se obtiene de la relación siguiente:

$$d_A = N_A^{-\frac{1}{3}}$$

Por lo tanto,  $d_A = (1.85 \times 10^{22})^{-\frac{1}{3}} = 3.8 \times 10^{-8} m$

Utilizando los valores encontrados ahora calculamos la trayectoria libre media de los electrones en el plasma:

$$L = \frac{1}{\pi \times 21.1 \times 10^{15} \frac{part}{m^3} (3.8 \times 10^{-8} m)^2} = 1.1 \times 10^{-2} m$$

#### DISTANCIA DE DEBYE

Sustituyendo las variables de la ecuación 3.4 Capítulo III, y tomando los valores de las tablas 1 y 2 se tiene que:

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

$$D = 69 (0.7 \times 10^5 / 21.1 \times 10^{15})^{1/2}$$

$$D = 69 (1.9 \times 10^{-6})^{1/2}$$

$$D = 1.2 \times 10^{-4} \text{ m}$$

Comparando los valores encontrados de la trayectoria libre media y la distancia de Debye encontramos que el requerimiento expresado por la ecuación 3.5 se cumple, y confirma teórica y experimentalmente la existencia de plasma.

#### FRECUENCIA DEL PLASMA

Sustituyendo las variables de la ecuación 3.8ª del Capítulo III, y tomando los valores de las tablas 1 y 2 se tiene que:

$$\omega_p = 56 (21.1 \times 10^{15})^{1/2}$$

$$\omega_p = 8.1 \times 10^9 \text{ radian/s}$$

y

$$f_p = 8.1 \times 10^9 / 2\pi$$

$$f_p = 1.2 \times 10^9$$

#### DISTANCIA DE LANDAU

Sustituyendo las variables de la ecuación 3.1 del Capítulo III, tomando los valores del argón de la tabla 1 se tiene que:

$$l = \frac{1.67 \times 10^{-5}}{0.76 \times 10^5} = 2.19 \times 10^{-10} m$$

## PARÁMETRO DE IMPACTO

Sustituyendo las variables de la ecuación 3.2 del Capítulo III y tomando los valores de la tabla 1 se tiene que:

$$\alpha = \frac{2.19 \times 10^{10}}{(1.9 \times 10^{15})^{\frac{1}{3}}}$$

es decir,  $\alpha = 2.7 \times 10^5$

## TRAYECTORIA LIBRE MEDIA

Como  $\alpha \ll 1$ , no existen colisiones cercanas y en consecuencia no se utiliza la Longitud de Landau para el cálculo de la trayectoria libre media de los electrones. Por lo tanto utilizamos la ecuación 3.3ª del Capítulo III.

Calculemos  $N_A$  y  $d_A$ :

$$N_A = \frac{40 Pa}{1.38 \times 10^{-23} JK^{-1} \times 273 K} = 1.06 \times 10^{22} \text{ núcleos}$$

$$d_A = (1.06 \times 10^{22})^{-\frac{1}{3}} = 4.5 \times 10^{-8} m$$

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Utilizando los valores encontrados ahora calculamos la trayectoria libre media de los electrones en el plasma:

$$L = \frac{1}{\pi \times 1.9 \times 10^{15} \frac{\text{part}}{\text{m}^3} \times (4.5 \times 10^{-8} \text{ m})^2}$$

$$L = 10^{-2} \text{ m} = 1 \text{ cm}$$

#### DISTANCIA DE DEBYE

Sustituyendo las variables de la ecuación 3.4 del Capítulo III, y tomando los valores de la tabla 1, se tiene que:

$$D = 69 \sqrt{\frac{0.4 \times 10^5}{19 \times 10^{15}}}$$

$$D = 10^{-4} \text{ m} = 0.01 \text{ cm}$$

Comparando los valores encontrados de la trayectoria libre media y la distancia de Debye encontramos que el requerimiento impuesto por la ecuación 3.5 se cumple y confirma teórica y experimentalmente la existencia de plasma.

#### FRECUENCIA DEL PLASMA

Sustituyendo las variables de la ecuación 3.8<sup>a</sup> del Capítulo III y tomando los valores de las tablas 1 y 2, se tiene que:

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

$$\omega_p = 56\sqrt{19 \times 10^{15}},$$

$$\omega_p = 7.7 \times 10^8 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

y

$$f_p = \frac{7.7 \times 10^8}{2\pi} \text{ s}^{-1},$$

$$f_p = 1.2 \times 10^8 \text{ s}^{-1}$$

## **CAPÍTULO VIII**

### **CONCLUSIONES**

Para dar por satisfecho el objetivo de esta tesis, es necesario llegar a emitir un juicio razonado sobre los logros y deficiencias del trabajo. Para ello se ha dividido la presentación de pruebas por incisos, veamos:

De los cálculos y sus resultados anteriores se encuentra que:

1. La forma de los dominios de existencia, en coordenadas P-V es similar para aire, argón y helio, (vea las gráficas I, II, V, VIII y X de la sección de anexos).
2. La forma de los Dominios de Existencia en coordenadas T-n es diferente de la correspondiente P-V pero a su vez existe gran similitud entre los tres gases (ver gráficas III, VI y XI de la sección de anexos). La diferencia más notable entre los diagramas P-V y T-n es que, en estos últimos, la curva de extinción es cerrada.
3. El intervalo de valores P-V en que se presenta el resplandor es el mismo para aire y Argón (0.1 a 0.8 mb y de 700 a 1050 volts, res-



pectivamente). Ver las gráficas I, II, V, VIII y IX de la sección de anexos.

4. Los valores de la densidad iónica, para cada valor de la presión, son casi dos veces mayores en argón que en aire. Los valores de la temperatura electrónica, correspondiente a cada valor del voltaje, son casi dos veces mayores en aire que en argón.
5. Al repetir el experimento en intervalos más cortos. (Ver las Figuras. IX, X y XI y la tabla 2 en la sección de anexos) se comprueba la existencia de las curvas de ignición y extinción.
6. Al confrontar los resultados experimentales con los teóricos se comprueba que el plasma localmente se aproxima a un gas de electrones (ver Capítulo VII).
7. Se encontró que cuando se calcularon los parámetros del plasma para aire y argón (ver las tablas 1 y 2 de la sección de anexos) estos fueron muy similares confirmando la conclusión anterior.
8. En los tubos de descarga se obtienen plasmas de resplandor cuya luminiscencia es similar a la de las auroras boreales (figura 1). Por lo tanto, la determinación del dominio de existencia de los plasmas de resplandor producidos en el laboratorio, contribuye a desentrañar los fenómenos naturales como el de dichas auroras. Por otra parte, las aplicaciones químicas de los plasmas fríos son cada día mayores. Por ello, el conocer las condiciones límite entre las cuales se pueden generar, ayuda a prever la cinética de las reacciones químicas en estado de plasma y sus aplicaciones.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

**ANEXOS**  
**TABLAS DE DATOS**  
**AURORAS BOREALES**  
**GRÁFICAS**  
**GLOSARIO**  
**CONSTANTES**

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

ELEMENTO	POTENCIALES DE IONIZACIÓN (eV)	
	PRIMERO	SEGUNDO
H	13.6	-----
He	24.58	54.5
Li	5.39	75.62
Ar	15.76	27.62
N	14.54	29.60
O	13.62	18.65

**TABLA 3.1 POTENCIALES DE IONIZACIÓN**

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

PRESION (mbar)	VOLTAJE (Volts)		TEMPERATURA ELECTRÓNICA (°K)		DENSIDAD DE PARTÍCULAS (X10 <sup>9</sup> part/m <sup>3</sup> )	
	IGNICIÓN	EXTINCIÓN				
AIRE						
0.15	990	700	149,440	182,696	12.2	5.51
0.2	922	650	79,050	187,290	22.3	7.9
0.4	805	650	163,682	143,478	18.5	9.8
0.6	770	680	61,272	111,123	26.5	10.2
0.8	800	750	189,755	98,040	14	11.08
ARGÓN						
0.15	1000	780	84,727	39,884	20.8	19.3
0.2	950	740	51,690	85,714	42.4	22.6
0.4	850	645	44,444	76,623	46.4	19
0.6	835	780	42,951	56,728	40.6	28.3

TABLA 1, RESULTADOS DEL DIAGNÓSTICO PARA AIRE Y ARGÓN, CON DATOS SOBRE PRESIÓN, VOLTAJE, TEMPERATURA ELECTRÓNICA Y DENSIDAD DE PARTÍCULAS.

PRESIÓN (mbar)	VOLTAJE (Volts)			TEMPERATURA ELECTRÓNICA (JK)			DENSIDAD DE PARTÍCULAS (X10 <sup>9</sup> )		
	IGNI- CIÓN		EXTIN- CIÓN						
AIRE									
0.15	960	865	750	175438	172624	176695	22	15.7	13.7
0.2	930	815	700	176964	173913	171594	22.1	15.8	13.4
0.3	880	790	700	175399	171237	171132	23.1	19.4	15.6
0.4	820	750	670	176136	175783	172564	23.2	17.7	12.5
0.5	800	715	680	176964	177623	171152	22.5	14.5	11.6
0.6	805	760	720	176231	174342	172191	20.6	15.3	11.5
0.7	810	770	735	177133	175410	173047	21.1	16	11.1

TABLA 2, RESULTADOS DEL DIAGNÓSTICO PARA AIRE, CON PRESIÓN VOLTAJES DE IGNICIÓN Y EXTINCIÓN, TEMPERATURA ELECTRÓNICA Y DENSIDAD DE PARTÍCULAS.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

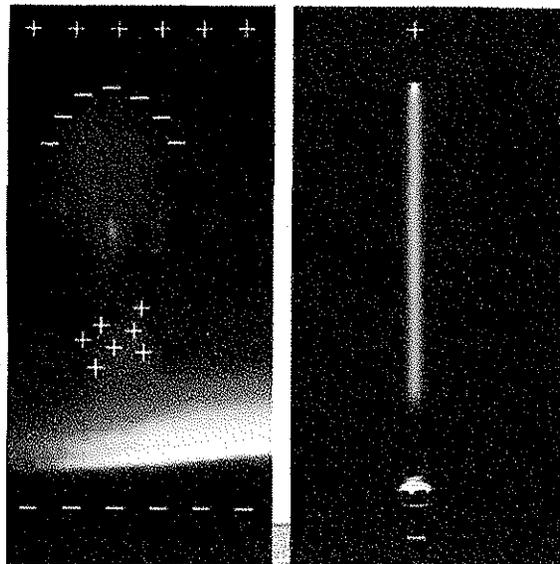


FIGURA 2. Los rayos, las Auroras. los Plasmas de resplandor y algunos fenómenos meteorológicos presentan abundante ionización.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

ESTA TESIS NO SALE  
DE LA BIBLIOTECA

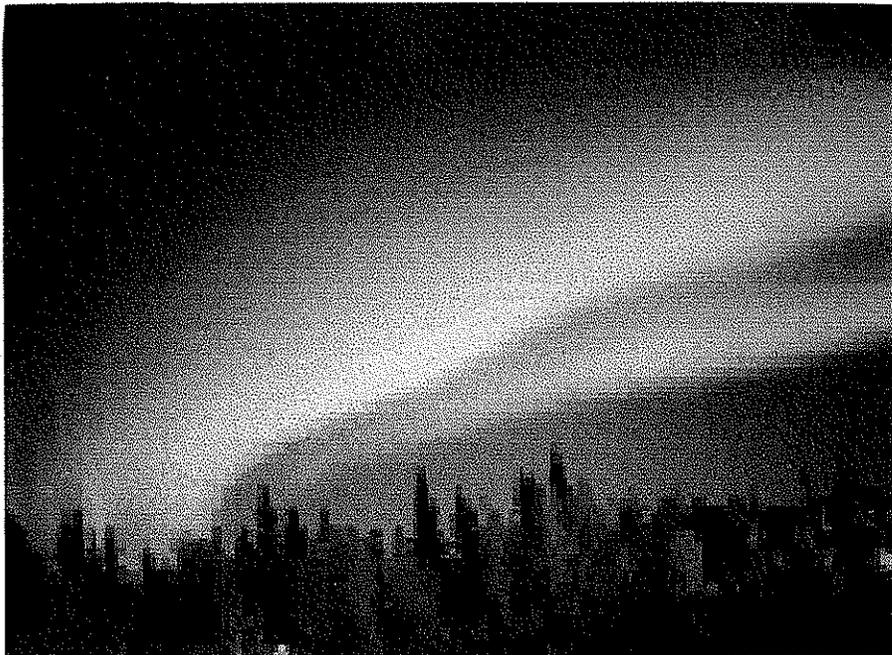
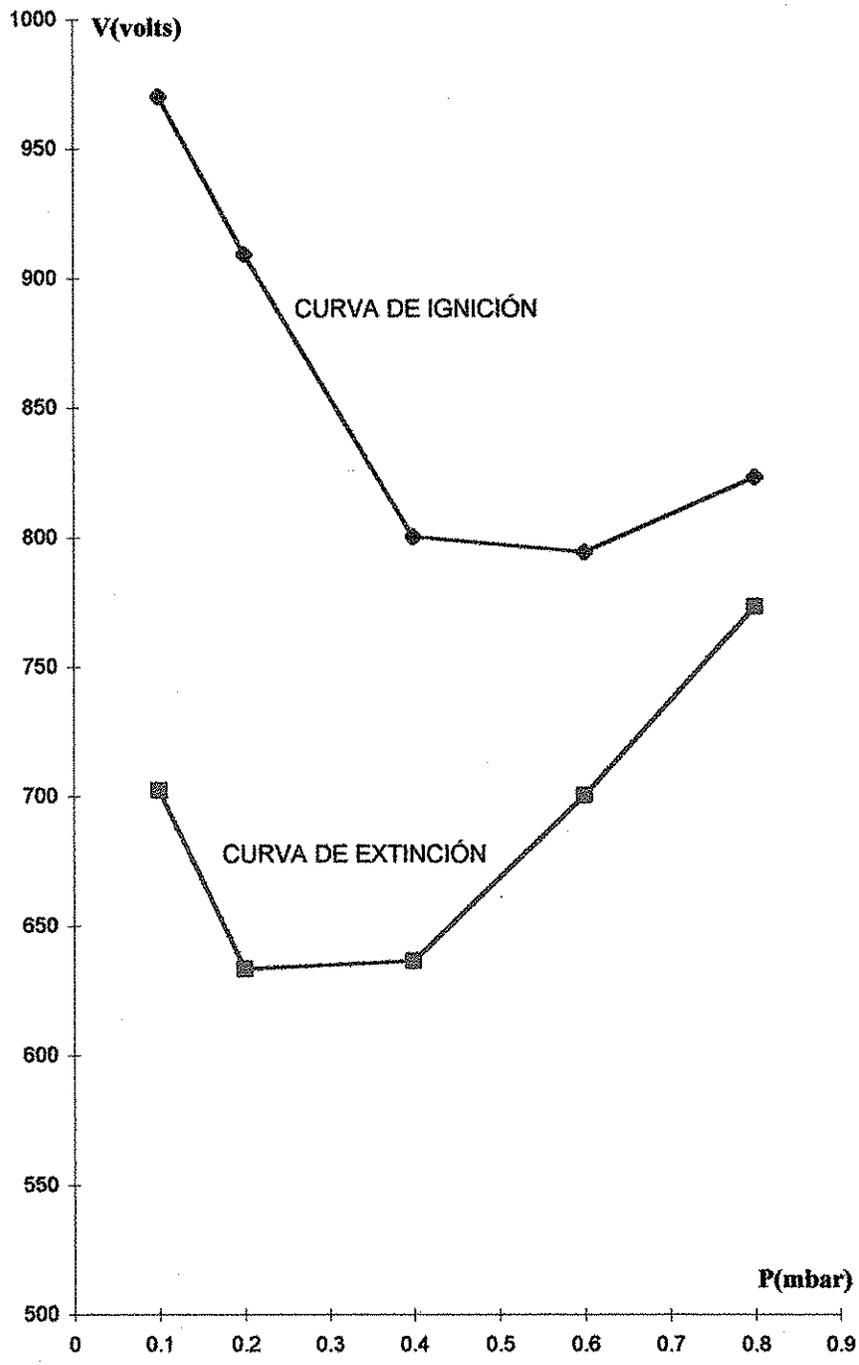
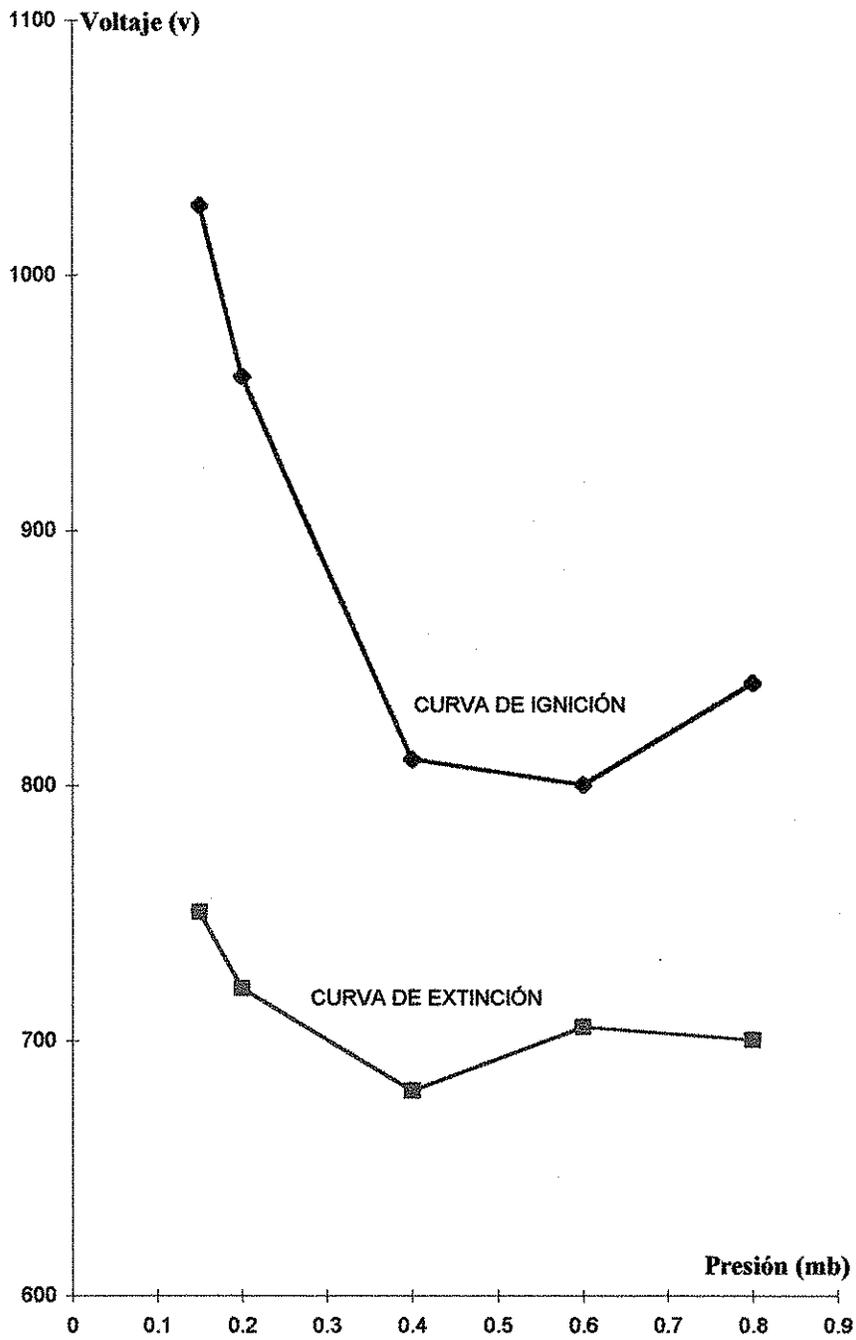


FIGURA 3. FOTOGRAFÍA DE UNA AURORA BOREAL.

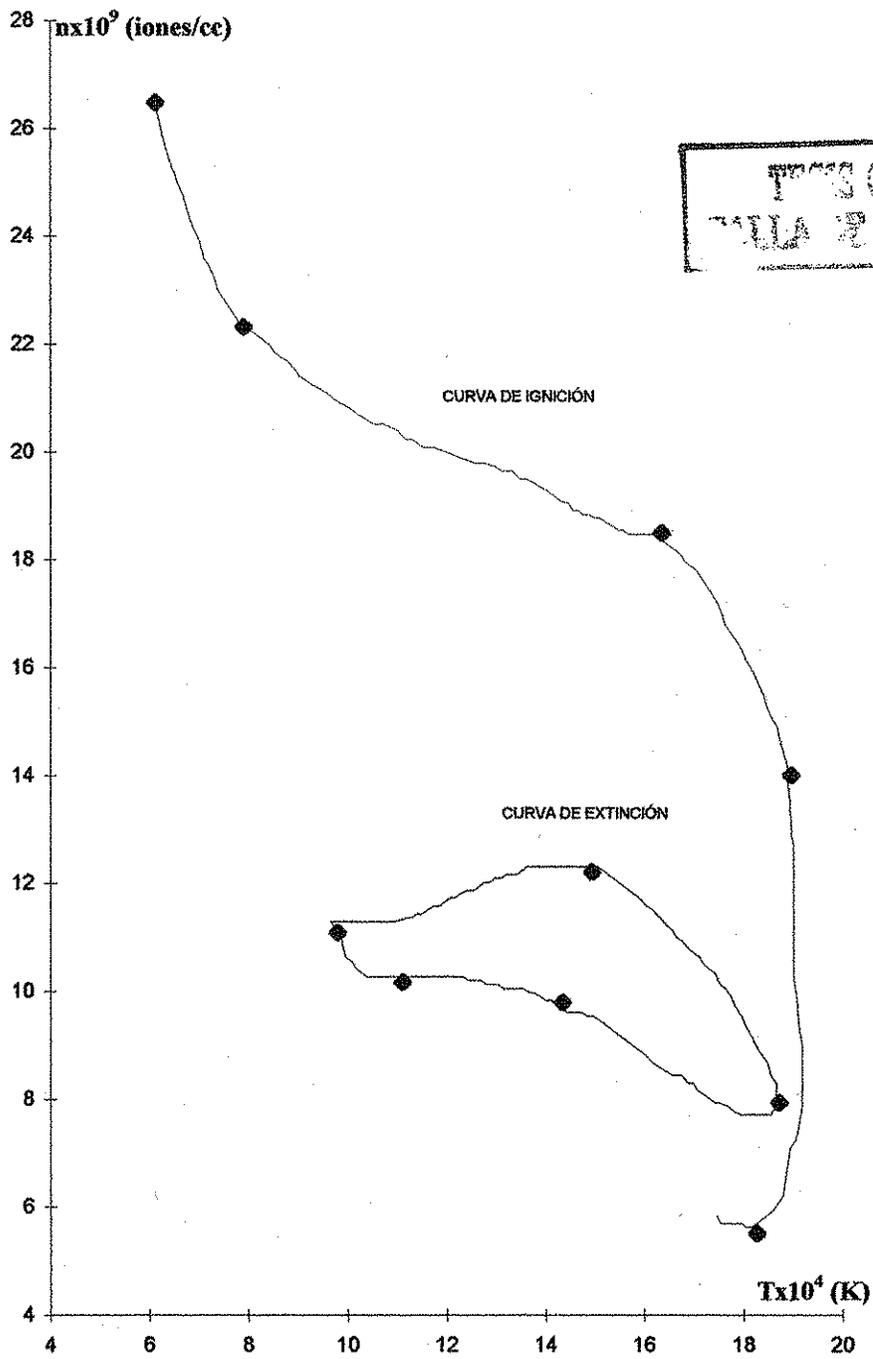
TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



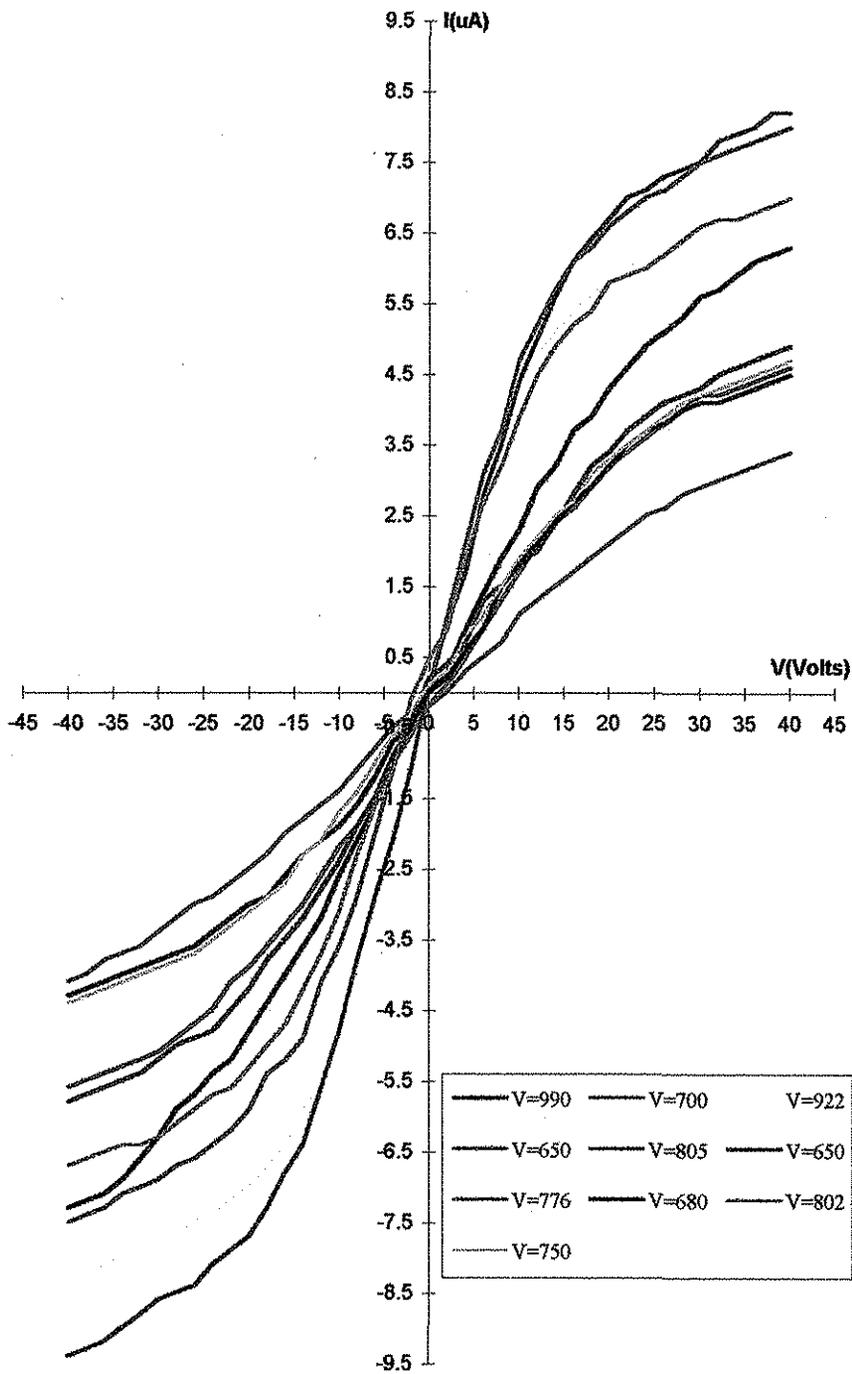
**Gráfica I. Dominio de existencia (presión-voltaje) del Plasma de resplandor con aire.**



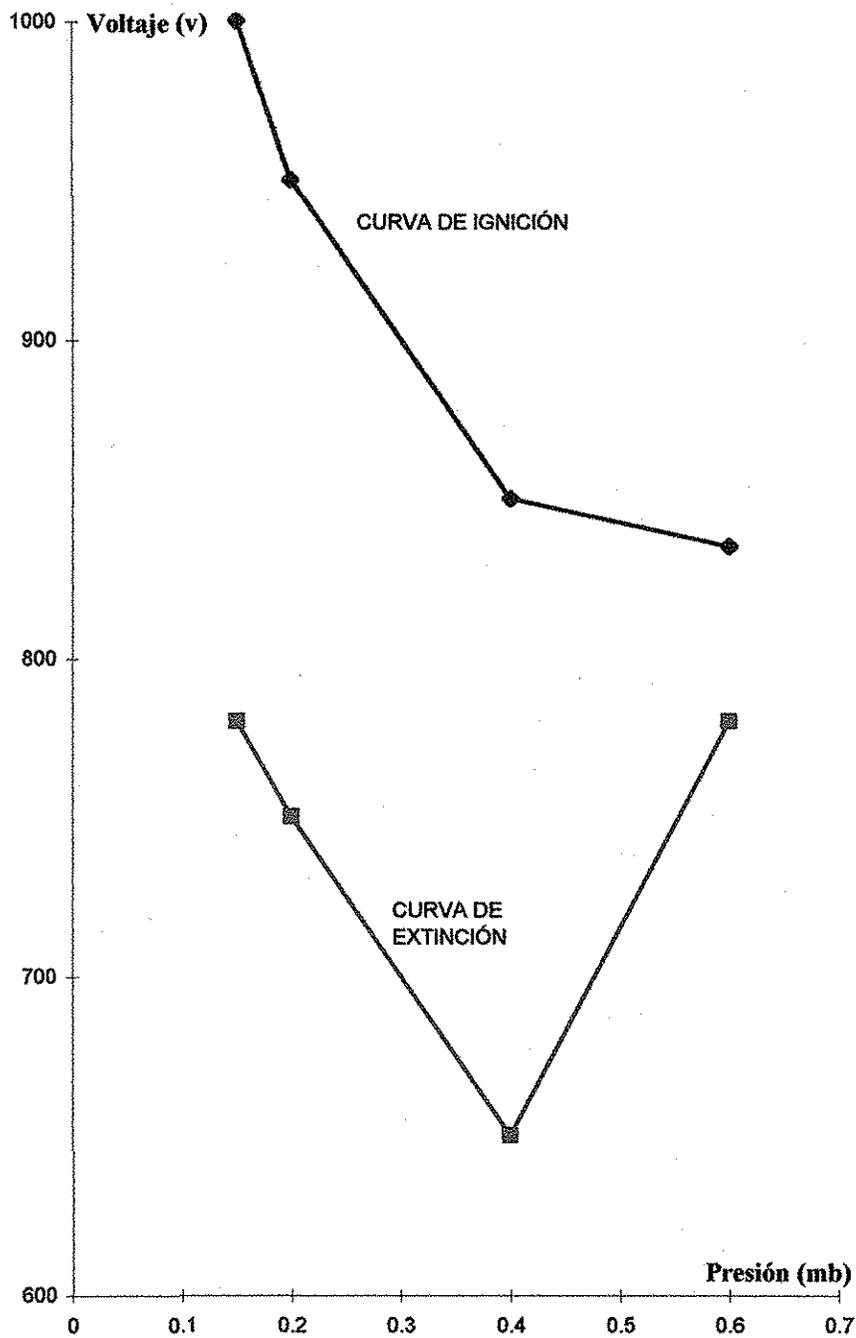
**Gráfica II. Dominio de existencia (presión-voltaje) del plasma de resplandor con aire.**



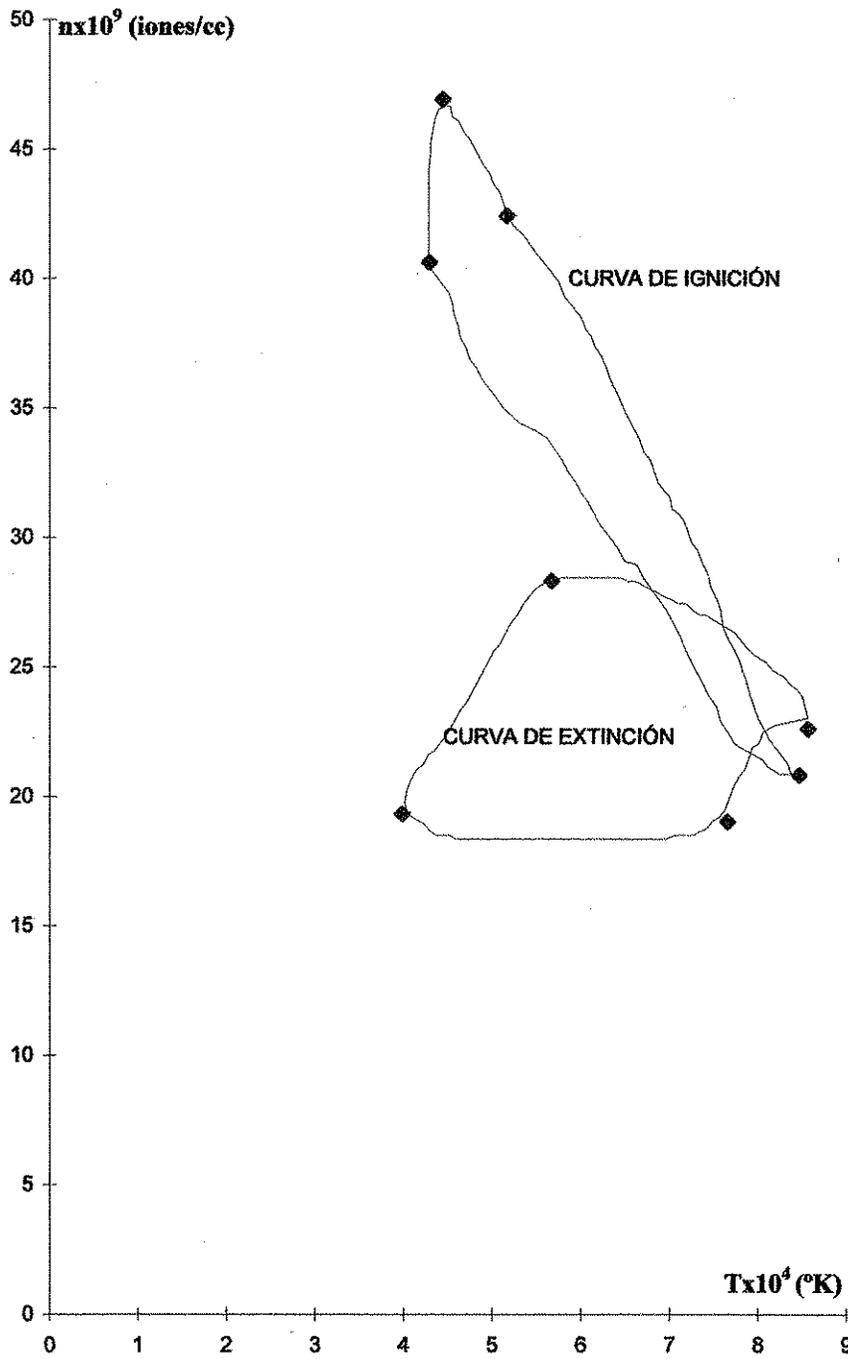
**Gráfica III. Dominio de Existencia ( Densidad-Temperatura) del Plasma de Resplandor con aire.**



**Gráfica IV. Curvas de Corriente (I) Vs. Voltaje (V)  
para el Diagnóstico del Plasma de Resplandor con aire.**

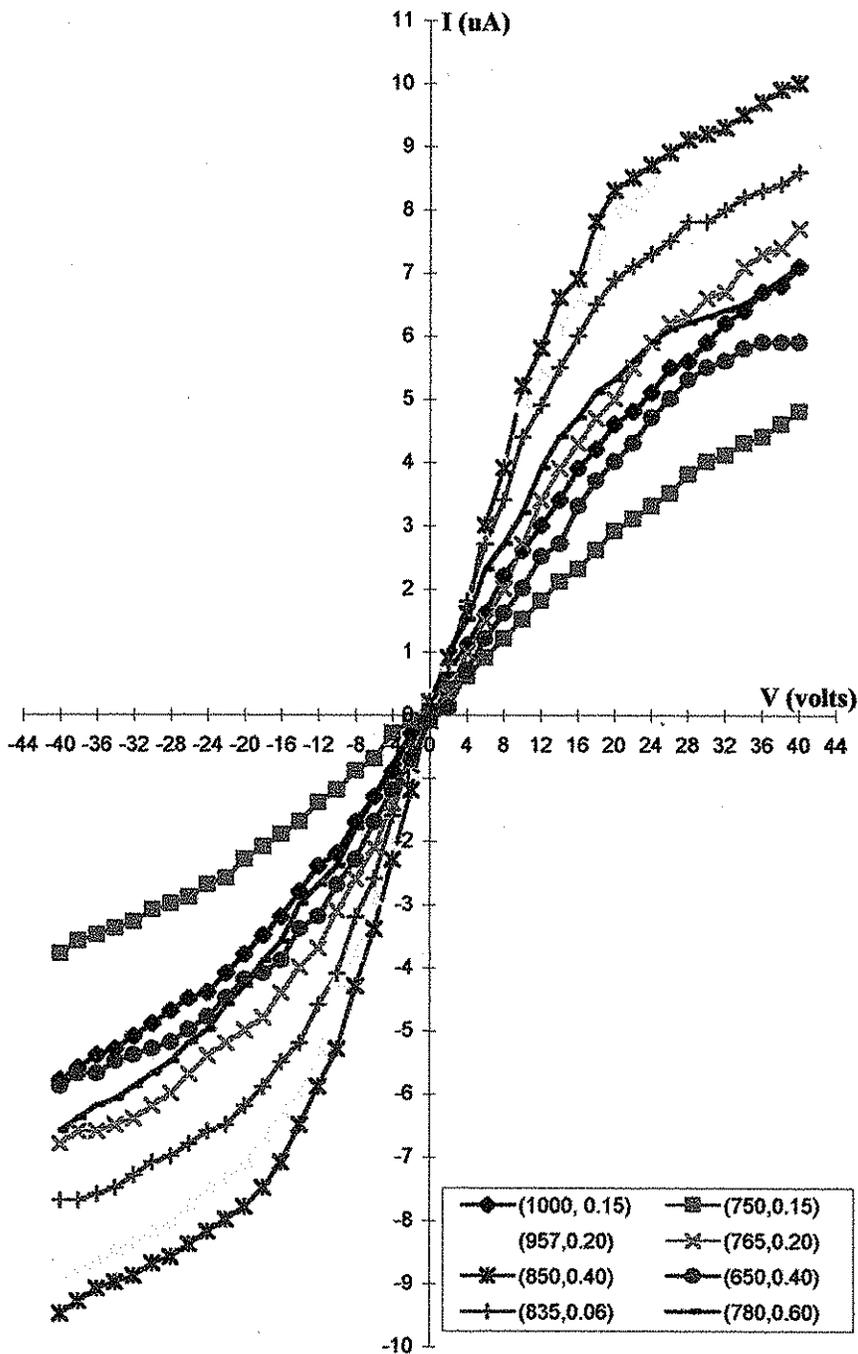


**Gráfica V. Dominio de Existencia (presión-voltaje) del Plasma de Resplandor con argón.**

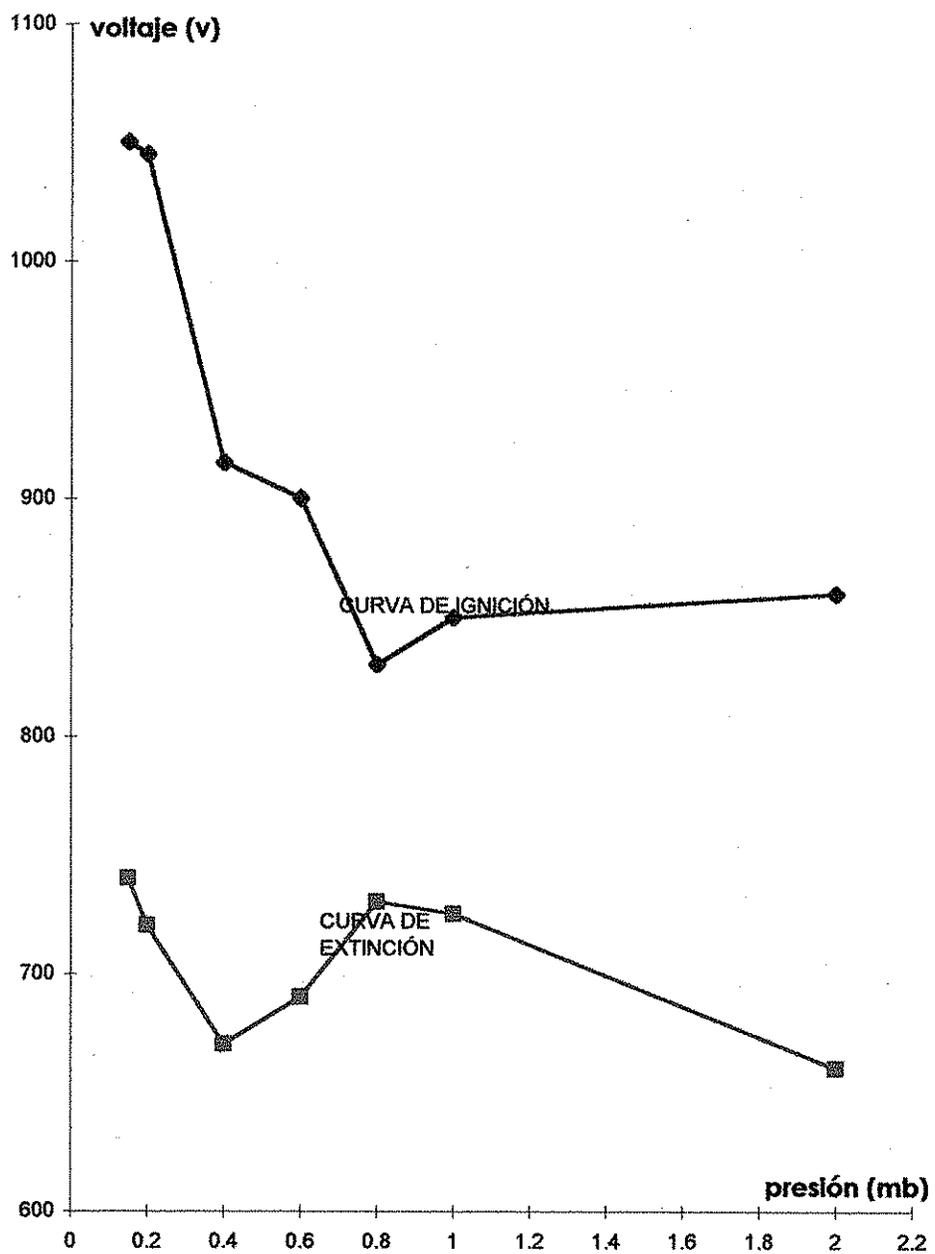


**Figura VI.- Dominio de Existencia Densidad(n) Vs Temperatura(T) del Plasma de Resplandor con argón.**

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

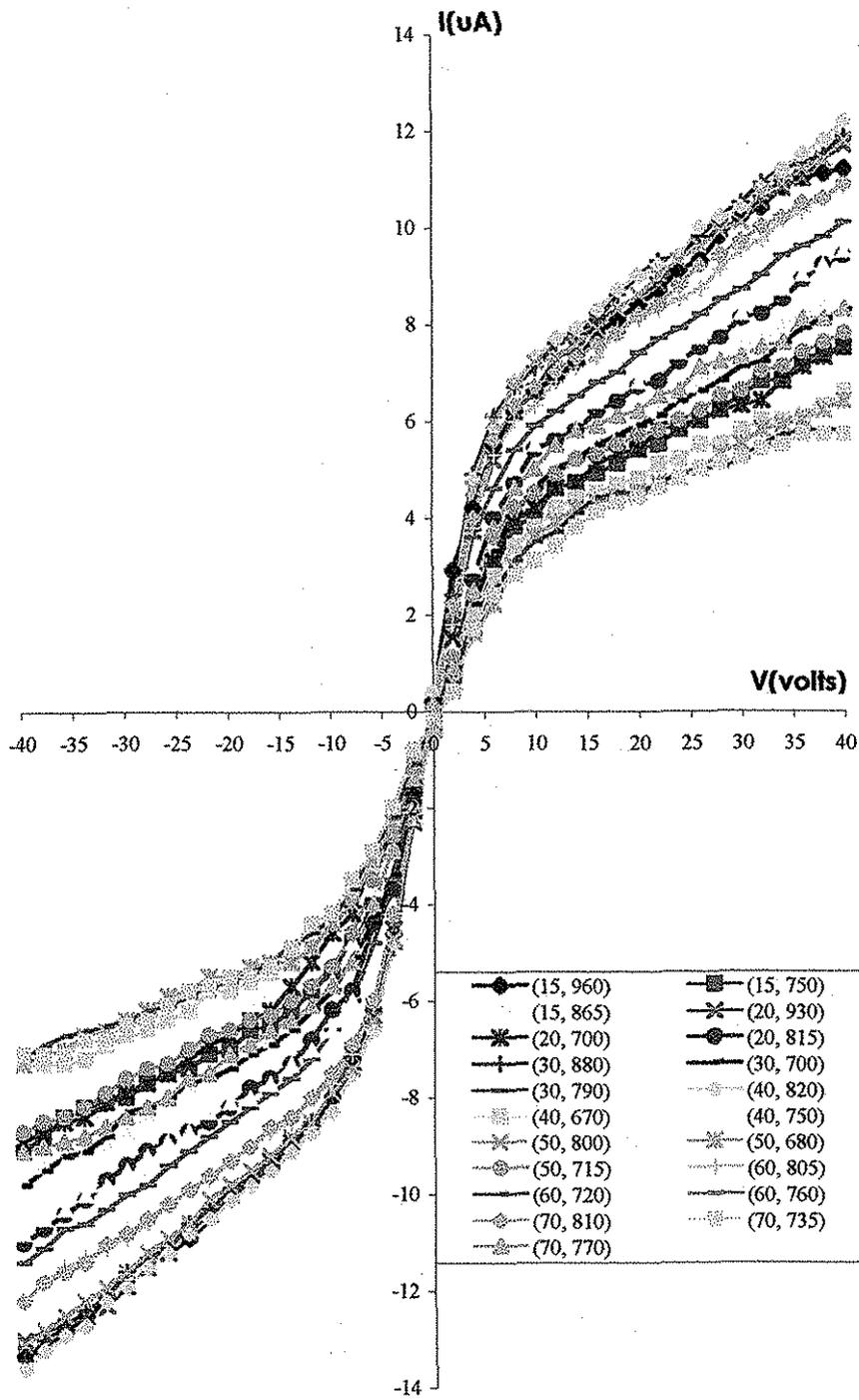


**Figura VII.- Curvas de Corriente(I) Vs Voltaje(V) para el Diagn3stico del Plasma de Resplandor con arg3n.**

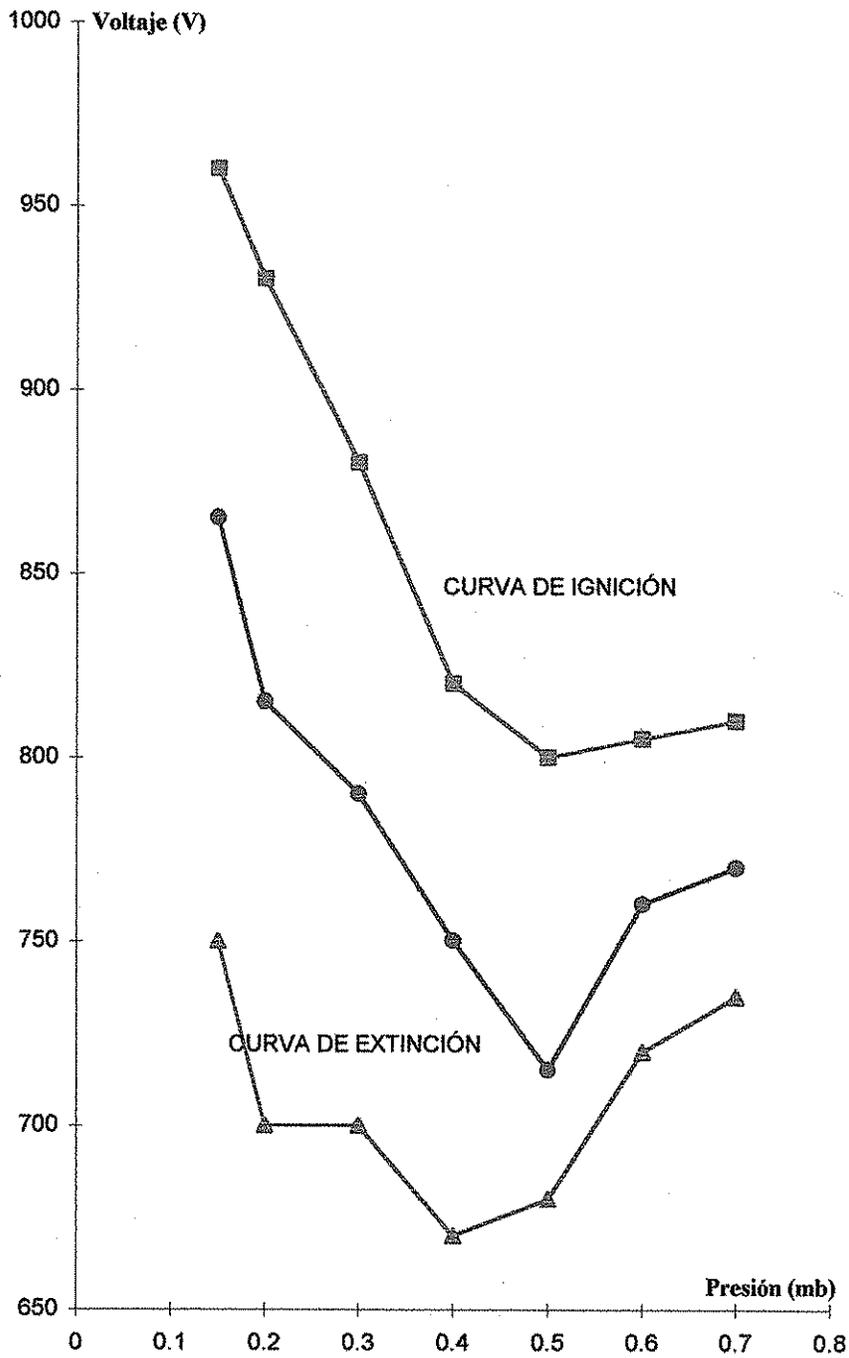


**Gráfica VIII. Dominio de Existencia (presión-voltaje) del Plasma de Resplandor con helio.**

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

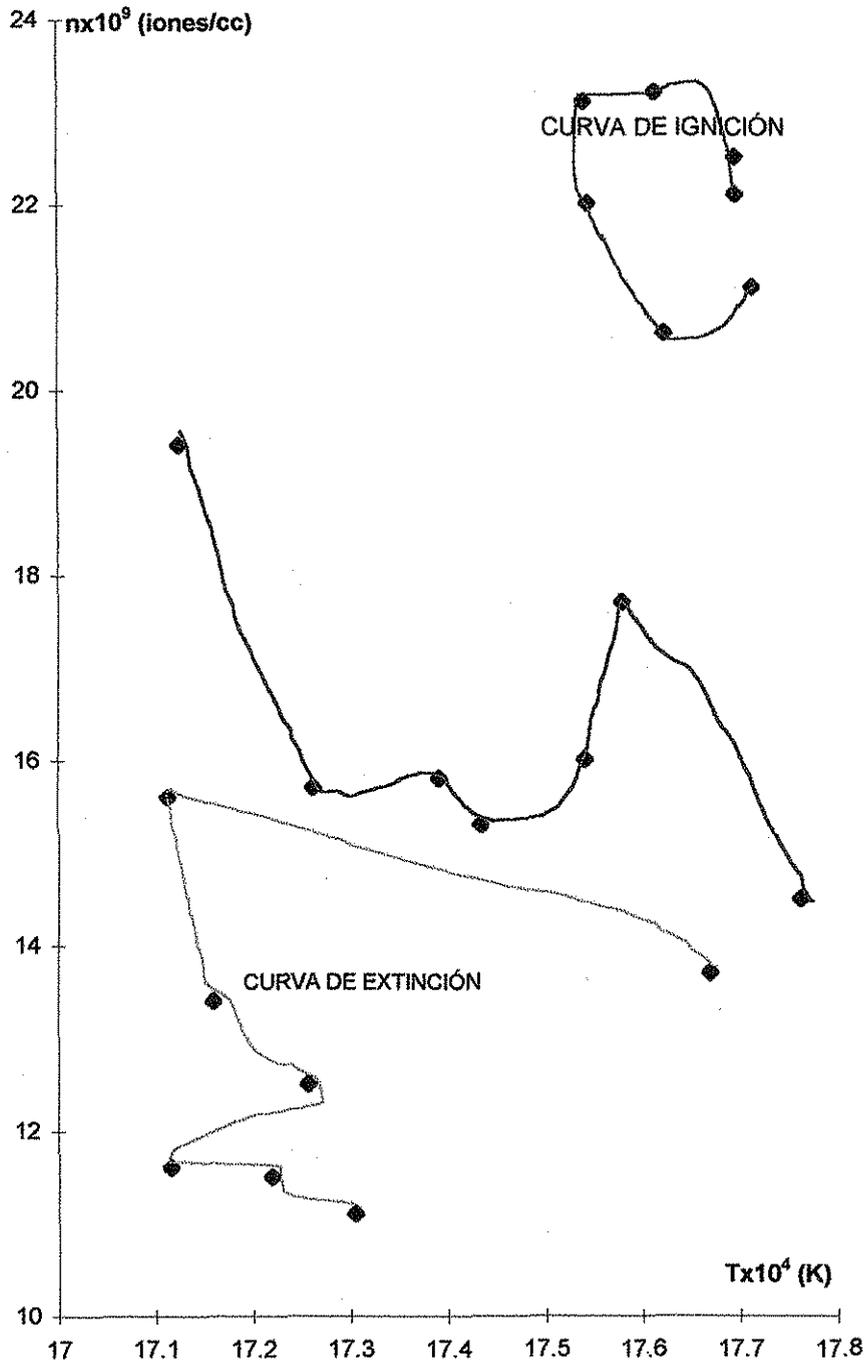


**Gráfica IX. Curvas de Corriente (I) vs Voltaje (V)  
para el plasma de resplandor con aire**



**Figura X.- Dominio de Existencia Presión (P) vs Voltaje (V) del Plasma de Resplandor con aire**

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



**Figura XI.- Dominio de Existencia Densidad (n) vs Temperatura (T) del Plasma de Resplandor con aire**

## CONSTANTES

$\epsilon_0$ , Permitividad del vacío,  $8.8541878 \times 10^{-12} \text{ C}^2 \text{ J}^{-1} \text{ m}^{-1}$

$e$ , carga del electrón y del protón,  $1.60219 \times 10^{-19} \text{ C}$

$h$ , Constante de Plank,  $6.62618 \times 10^{-34} \text{ J s}$

$L$ , Constante de Avogadro,  $6.02205 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$

$R$ , Constante universal de los gases,  $8.3144 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$

$k$ , constante de Boltzmann,  $1.38066 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$

$m_e$ , masa del electrón en reposo,  $9.10953 \times 10^{-31} \text{ kg}$

$c$ , Velocidad de la luz en el vacío,  $2.9979246 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$

## EQUIVALENCIAS

$$1eV = 1.602189 \times 10^{-19} J$$

$$1debye = 3.3356 \times 10^{-30} C m$$

## **GLOSARIO DE TÉRMINOS**

**AURORAS POLARES:** plasma producido por la interacción del campo magnético terrestre y la radiación solar. Se observan tanto en las cercanías del Polo Norte como del Polo Sur.

**CAMPO ELÉCTRICO:** la totalidad de las fuerzas producidas por una diferencia de potencial.

**CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS:** combinación de campo eléctrico y magnético.

**COLISIONES ELÁSTICAS:** choque entre partículas rígidas.

**COLISIONES INELÁSTICAS:** choque entre cuerpos deformables.

**CORRIENTE ELÉCTRICA:** la cantidad de cargas eléctricas que fluyen por un conductor en la unidad de tiempo. Su unidad es el ampere.

**CURVAS DE IGNICIÓN Y EXTINCIÓN:** curvas de inicio y desaparición del plasma de resplandor.

**DENSIDAD DE PARTÍCULAS:** número de partículas ionizadas en el plasma.

**DENSIDAD ELECTRÓNICA:** número de electrones libres por unidad de volumen.

**DENSIDAD IÓNICA:** número de protones libres por unidad de volumen.

**DIAGRAMAS PRESIÓN-VOLTAJE:** Gráficas de presión vs voltaje obtenida de los datos experimentales.

**DIAGRAMAS TEMPERATURA-DENSIDAD:** Gráficas de temperatura vs densidad obtenida de los datos experimentales.

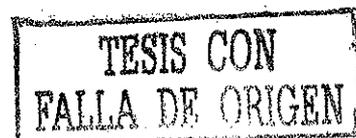
**DOMINIO DE EXISTENCIA:** intervalo dentro del cual el plasma persiste.

**ELECTRÓN PROMEDIO:** concepto que nos permite una abstracción del fenómeno y conservar los aspectos físicos del plasma y poner las ecuaciones diferenciales que explican el movimiento de las partículas individuales.

**ENERGÍA CINÉTICA:** energía adquirida por las partículas del gas al aplicarle una diferencia de potencial.

**ENERGÍAS DE IONIZACIÓN:** energía a la cual se produce ionización.

**EQUILIBRIO DEL PLASMA:** proceso que se define por medio de la Ley de Boltzmann.



**EQUILIBRIO TERMODINÁMICO DE UN PLASMA:** cuando se puede definir una sola temperatura en un punto.

**EQUILIBRIO TERMODINÁMICO LOCAL DEL PLASMA:** situación idealizada del fenómeno fisicoquímico real del plasma en equilibrio.

**ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO:** conjunto de todas las frecuencias de la radiación electromagnética.

**FRECUENCIA DEL PLASMA:** frecuencia a la cual se produce el plasma

**GAS DE ELECTRONES:** estado de la materia caracterizado por la existencia de electrones libres.

**IONIZACIÓN MÁXIMA:** estado de máxima actividad propiciado por el mayor número de electrones libres.

**LONGITUD DE DEBYE O LONGITUD DE BLINDAJE:** distancia a la cual se extiende el campo eléctrico de una partícula individual cargada antes de que su efecto sea anulado por las partículas opuestas.

**LONGITUD DE LANDAU:** longitud a la cual la energía potencial mutua entre partículas cargadas es igual a la energía cinética característica del movimiento térmico.

**LUMINISCENCIA:** emisión de ondas electromagnéticas visibles a baja temperatura.

**MANCHAS SOLARES** es una región constituida por un núcleo o sombra (zona oscura) y una penumbra (zona luminosa)

**NIVELES DE ENERGÍA:** órbita de valores escalonados posibles.



PARÁMETRO DE IMPACTO: distancia mínima es menor que  $l$  y tiene como resultado una deflexión en la trayectoria de la partícula

PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS: variables con las que se especifican las condiciones del plasma.

PARÁMETROS INTERNOS: densidad electrónica, temperatura electrónica, densidad de partículas (iones).

PARÁMETROS EXTERNOS: presión del gas, voltaje de excitación y temperatura termodinámica.

PLASMA DE RESPLANDOR: plasma de baja temperatura electrónica.

PLASMA SOLAR: plasma producido por las emisiones de la corona solar.

PLASMAS ARTIFICIALES: cuando se provoca un estado de alta excitación de un gas.

PLASMAS FRÍOS: plasmas que se generan a bajas temperaturas.

PLASMAS NATURALES: Auroras boreales, corona del sol, flama producida por la combustión de un gas, el intercambio de carga eléctrica entre la atmósfera y la Tierra (rayos).

POTENCIAL DE IONIZACIÓN: voltaje en el cual se produce ionización.

TEMPERATURA ELECTRÓNICA: temperatura de los electrones en el plasma.

TORMENTAS MAGNÉTICAS: fuertes variaciones del campo magnético terrestre.



TRANSICIONES ELECTRÓNICAS: cuando un electrón pasa de un nivel a otro de mayor o menor energía.

TRAYECTORIA LIBRE MEDIA: distancia promedio recorrida por un electrón entre la ocurrencia de una colisión y la siguiente.

TUBO DE DESCARGA A BAJA PRESIÓN: tubo de vidrio en donde se coloca una diferencia de potencial para producir un plasma de resplandor.

TUBO DE EXPERIMENTACIÓN: para el caso presentado, un tubo de cuarzo con conexiones para hacer el vacío e inyectar algún gas y por medio de una fuente de alto voltaje producir un plasma.

VALORES LÍMITE: del intervalo de voltaje y de presión son los valores extremos donde se da la ignición y extinción del plasma.

VIENTO SOLAR: gas tenue de partículas cargadas, principalmente iones y electrones, eyectadas por el sol en todas direcciones a grandes velocidades.



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Milantiev, V. y Temko, S. Física del plasma ed. MIR, Moscú, 1987.
2. Forrest Y. Boley, Plasmas en el laboratorio y en el Cosmos ed. Reverté Mexicana, S. A. México DF. 1968.
3. Cisneros Ramírez G., Diseño de un Laboratorio de Química de plasmas, tesis Facultad de Química, Div. Est. de Posgrado, UNAM, 1990.
4. Muñoz Meléndez G., Diseño de un Reactor Químico de plasmas, tesis Facultad de Ingeniería Química, Universidad Veracruzana, 1991.
5. Trassy Christian, Mermet Jean-Michel, Les Applications Analytiques des Plasmas Haute-Fréquence, Technique et Documentation (Lavoisier), París Francia, 1984.
6. Colloques Nationaux du Centre National de la Recherche Scientifique La Chimie des Hautes Températures, Les Chalumeaux et Fours a Plasma et leurs Applications, París, Francia 1962.
7. Spinks J. W. T., Woods R. J., An Introduction to Radiation Chemistry, 3era edition, Wiley Interscience, N. Y. 1990 cap. 4
8. Griem Hans R., Methods of Experimental Physics, vol. 9 Plasma Physics parte A (de.) Academic Press, N. Y. Londres, 1970 caps. 1 y 4



9. Lelevkin V. M., Otorbaev D. K., Schram D. C., Physics of non-equilibrium Plasmas, North Holland, Holanda, 1992
10. Herman V. Boenig, Plasma Science and Technology, Cornell University Press, United Kingdom, 1982
11. Chen Francis F., Introduction to Plasma Physics and controlled Fusion, vol. 1 second edition, Plenum Press, N. Y. 1984
12. Nicholson, Dwight R., Introduction to Plasma Theory, John Wiley and Sons, N.Y. 1983
13. Fortov Vladimir E., Lakubov Igor T., The physics of Non-ideal Plasma, World Scientific, Singapore, New Jersey, London Hong Kong 2000
14. Goldston R.J., Rutherford P.H., Introduction to Plasma Physics, Bristol UK, Philadelphia, Institute of Physics, 1995
15. Lisitsa Valery S, Atoms in Plasma, Berlin: Springer, 1994
16. Johnson Robert E, Energetica Charged-Particle Interactions with Atmospheres and Surface, Berlin: Springer, 1990
17. Nishikawa Kyoyi, Wakatan M, Plasma Physics: Basic Theory with fusion applications, 2 corrected ed. Berlin: Springer, 1994
18. Dendy Richard, Plasma Physics: An introductory course, 7 ed. Cambridge [England]: Cambridge University, 1993
19. Schram P.P.J.M., Kinetic Theory of Gases and Plasmas, Dordrecht Kluwer Academic, 1990
20. Sturrock Peter, Plasma Physics: An Introduction to the Theory of Astrophysical, Geophysical and Laboratory Plasmas, Cambridge Cambridge University, 1994
21. Lieberman Michel, Lichtenberg Alan J., Principles of Plasma Discharges and materials processing, New York, Jhon Wiley, 1994
22. Chakraborty, Bishwanath, Principles of Plasma Mechanics, 2 ed. New York, Jhon Wiley, 1990



23. Capitelli Mario, Gorse Claudine, Plasma Technology: Fundamental and applications New York, Plenum, 1992
24. Clemond P. C. and Dougherty J.P., Electrodynamics of Particles and Plasmas, Addison-Wesley Publishing Company N.Y.
25. Lartigue G. J., La Química de Plasmas, Gaceta UNAM México, 15 de diciembre 1988
26. Earle R. Williams, Sprites, Elves, and Glow Discharge Tubes, Physics Today, vol. 54, pag. 51, noviembre 2001.

