



José Antonio Vallés Abarca

# **Descargas eléctricas en gases y plasmas: aplicaciones**

2003 - Reservados todos los derechos

Permitido el uso sin fines comerciales

**José Antonio Vallés Abarca**

# **Descargas eléctricas en gases y plasmas: aplicaciones**

Universidad de Alicante, 1998

Deseo que esta lección sea un homenaje al Prof. Dr. D. Maximino Rodríguez Vidal, Catedrático de Electromagnetismo de la Universidad Complutense, Miembro de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Medalla Alfonso X el Sabio al Mérito Docente... Él fue mi Maestro (inició su actividad profesional como Maestro Nacional, así se llamaba entonces, en un ignoto pueblo de Lugo: Bullan): como profesor, como director de tesis, como preparador en la disciplina Electricidad y Magnetismo... Él fue mi Jefe, como le llamábamos respetuosa pero cariñosamente sus colaboraciones, como Profesor adjunto, como Profesor Agregado (lástima que mi acceso a Cátedra nos separó físicamente... y algo más). Pero sobre todo fue un ejemplo constante y un segundo padre (me acompañó al quirófano cuando me operaron el año 1965, pues mis padres acobardados no se sentían con fuerzas). Para todos los que tuvimos la honra de estar a su lado siempre ha sido, es y será un estímulo para nuestra actividad docente.

También deseo recordar al compañero de mi Departamento Enrique Alfonso Abad Sempere que se nos fue de forma inesperada y trágica el pasado curso académico, muy conocido en esta Universidad desde que se inició su germen, que fue el CEU, y hasta en la reciente celebración del XXV aniversario del CEU. El mejor recuerdo será iniciar esta lección con el grito que se intercambian los «festers» de sus queridas Fiestas de Moros y Cristianos de Alcoy: «Tot be, tot bonic, nos passa res i si passa... que passe». [2]

Honorable Sr. Conseller de Cultura, Educació i Ciència de la Generalitat Valenciana

Excelentísimos y Magníficos Señores Rectores,

Excelentísimos e Ilustrísimos Señores,

Personal de la Universidad de Alicante, Docente, Investigador, Administración y Servicios,

Alumnas y Alumnos,

Señoras y Señores.

En el ritual del acto académico de apertura del curso universitario es una tradición el desarrollo de una lección por parte de uno de los profesores del Claustro que se elige empleando un criterio de reparto cíclico entre los distintos Centros que componen la Universidad, en este caso la Facultad de Ciencias. Dentro de cada Centro se propone al profesor más antiguo en el escalafón burocrático: éste es mi caso, tras los profesores Francisco Ruiz Beviá, Eduardo Cadenas Bergua y Antonio Aldaz Riera. Sirvan estas primeras observaciones para aclarar que mi presencia es fruto de estos hechos y no de especiales méritos docentes o de investigación.

La concreción de la lección plantea, al menos, dos problemas iniciales referidos a la heterogeneidad de la audiencia ante la que se «lee» y al nivel de su contenido. La especialización inherente dentro de cada área de conocimiento lleva a que resulte en ocasiones difícil entender las investigaciones que realizan compañeros de un mismo Departamento, en especial si reúnen distintas áreas. En consecuencia, he optado por desarrollar un tema con un contenido de carácter general y un nivel no especializado con el difícil objetivo de aclarar algunos términos, ideas o conceptos y de motivar la curiosidad por el estudio de las aplicaciones, tanto en su sentido de extensión de nuestro conocimiento como de fundamento para realizaciones prácticas, de los Plasmas o gases ionizados con unas características específicas que trataré de detallar. Tanto el área de conocimiento a la que pertenezco, Física Aplicada, como la actividad investigadora que he desarrollado desde mi incorporación a la Universidad de Alicante, Aplicaciones de los haces iónicos en Microelectrónica, explican esta elección.

Otras razones son de tipo histórico pues desearía recordar dos efemérides recientes de las que los medios de comunicación social se hicieron eco. En octubre de 1997 se cumplió el centenario de la publicación de J. J. Thompson, del Laboratorio Cavendish de la Universidad de Cambridge, de sus trabajos sobre descargas eléctricas en los gases que le hacían concluir que los denominados entonces, y ahora, rayos catódicos eran haces de «corpúsculos», partículas con una masa y carga características. Fue la primera propuesta de una partícula «elemental» que se denominó electrón. Estos estudios sobre la conducción de electricidad en los gases fueron la justificación de la concesión de los Premios Nobel en Física de 1906 P. Lenard (rayos catódicos) y 1907 al propio J. J. Thompson.

En el presente año de 1998 estamos recordando el cincuentenario del descubrimiento del efecto transistor en los estudios sobre semiconductores de W. Shockley, J. Bardeen y W. H. Brattain que les justificó para la concesión del Premio Nobel en Física de 1956. [3]

Mi intención en esta lección es presentar una relación entre estos dos aspectos de la Física experimental y aplicada, aparentemente tan dispares, y cuyas consecuencias tecnológicas están presentes en nuestra vida cotidiana y se nos anuncian continuos progresos en un futuro no muy lejano.

El puente que conectará ambos temas serán los Plasmas. Una anécdota puede servir para evitar desde el comienzo de esta lección una «lógica» confusión terminológica. En el

verano de 1980 dentro de los cursos de la Universidad Menéndez y Pelayo de Santander dirigí un curso cuyo título era «Aplicaciones de los Plasmas». Al concluir la presentación del mismo se me acercaron horrorizados tres matriculados que eran alumnos de estudios de Ciencias de la Salud, pues se llevaron el chasco de que no eran plasmas... sanguíneos.

Me parece oportuno hacer esta aclaración dado que el uso más generalizado corresponde a su significación biomédica. Éste es un ejemplo más de los posibles problemas de comunicación entre las distintas disciplinas y entre los científicos y la sociedad.

Una ventaja inicial del tema escogido es que todos tenemos una experiencia directa de descargas eléctricas, como ocurren en las tormentas acompañadas de «rayos» en los que percibimos fenómenos visuales (relámpago), sonoros (trueno) e incluso químicos, pues en las proximidades donde «cae» un rayo se detecta un olor picante. Estas descargas «naturales» no van a ser el objeto de nuestra lección pero dejemos constancia de la interpretación mítica que en la Odisea hace Homero como un recurso del dios Zeus «[...] despidió un trueno y al propio tiempo arrojó un rayo en nuestra nave; ésta se estremeció, al ser herida por el rayo de Zeus, llenándose del olor del azufre» (Rapsodia XII).

Aunque puede resultar innecesario el manifestarlo, el texto escrito que se presenta no se corresponde con la exposición oral desarrollada. Intencionadamente, sólo fue un resumen con el modesto objetivo de sugerir o aclarar algunas ideas y conceptos y de motivar la curiosidad... sin aburrir a la heterogénea audiencia presente.

También deseo dejar constancia que el texto definitivo se entregó en febrero de 1999 con lo cual incumplí la habitual costumbre de tenerlo disponible para los asistentes a la Solemne apertura del Curso Académico. Solicito clemencia, en especial a las personas directamente involucradas en la organización del Acto, como la Vicerrectora Excma. Sra. Ana Laguna y al personal de Protocolo, Secretaría e Imprenta. Esta aclaración también es necesaria para entender cómo aparecen referencias cuya fecha de publicación es posterior al día 2 de octubre de 1998, en el que pronuncié la «corta» lección inaugural.

En esta introducción también deseo aclarar que en el título utilicé la palabra «Aplicaciones» entendida no sólo como realización y productos tangibles. Pretender extender su significado para incluir la extensión del conocimiento, la identificación de proyectos y la formulación de propuestas. Creo que son verdaderos productos intangibles necesarios para el progreso, la innovación...

Para terminar quiero insistir en que me he impuesto limitaciones justificables por razones de tiempo y espacio. No hablaremos de una temática tan interesante y espectacular como es la «Electricidad Atmosférica». [4]

## I. Descargas eléctricas en gases

La electricidad es la parte de la Física que se ocupa del estudio de los fenómenos eléctricos, entendiendo como tales aquellos que ofrecen características análogas a las

nuevas propiedades que adquiere el ámbar al ser frotado con un trozo de lana (atrae pequeñas partículas), experiencia ya conocida por los griegos y que explica la razón etimológica de la palabra electricidad (ámbar). Para caracterizar este estado de la materia en el que se presentan estas nuevas acciones, eléctricas, se dice que está electrizada o cargada y se introduce una nueva magnitud física, la carga, pudiendo presentarse dos formas como lo demuestra el hecho de poder ser las acciones entre cuerpos cargados repulsivas o atractivas en contraposición a lo que ocurre con las acciones gravitatorias que siempre son atractivas.

A grandes rasgos se pueden distinguir cuatro periodos en el desarrollo histórico de la Electricidad: 1) Electrostático, que culmina con la formulación cuantitativa de Coulomb (1729) de la fuerza entre cargas; 2) Electrocínético, en el que la atención se centra en la producción y efectos de la corriente eléctrica; 3) Electromagnético, en el que el abundante trabajo experimental e interesantes observaciones fenomenológicas debidas a Faraday, permite la primera sistematización de los fenómenos eléctricos y magnéticos que realizó Maxwell; 4) Electrónico-Relativista, en el que descubierto el carácter discreto de la carga eléctrica por ser siempre múltiplo de una cantidad mínima, la carga del electrón, se exige un replanteamiento del electromagnetismo como realizó Lorentz que a su vez formula sus conocidas relaciones de transformación de coordenadas que son una de las muchas consecuencias o mejor razones de los postulados de la Relatividad de Einstein.

En el estudio de la Electricidad se suelen adoptar diferentes criterios. Así, si nos fijamos en la fuente que es el origen de la energía que da lugar a la aparición de estas propiedades se suele hablar de Triboelectricidad (frotamiento o fricción), Termoelectricidad (temperatura), Piroelectricidad (calentamiento), Piezoelectricidad (presión), Fotoelectricidad (luz). Como puede verse las posibilidades son bastantes numerosas resultando difícil abordar el estudio así planteado de forma unificada, siendo preferible el hacerlo particularmente.

Para un estudio sistemático es mejor diferenciar los fenómenos según sean consecuencia de la existencia de cargas fijas o móviles. La Electrostática se preocupará del estudio de los fenómenos ligados a cargas inmóviles y que lógicamente serán independientes del tiempo. Por el contrario, si los fenómenos son consecuencia de un movimiento de cargas se podrá hablar de Electrodinámica, Electrocínética y Magnetismo. En los dos primeros casos nos preocupemos o no de las causas del movimiento de cargas. En Magnetismo se estudian un tipo especial de acciones llamadas magnéticas que aparecen sólo si las cargas se mueven.

La teoría atómica de la materia nos permite comprender el significado de la expresión cuerpo cargado. El núcleo reúne concentrada la carga positiva y alrededor de él pero bastante distantes se encuentran los electrones (cuantos de carga negativa) en número igual al de protones (cuantos de carga positiva) que tiene el núcleo, de tal forma que la carga total neta es nula. Pero si un átomo pierde un electrón se convierte en un ión cargado positivamente (catión) y ocurre lo contrario si adquiere un electrón en exceso siendo entonces la carga negativa (anión). En resumen, el proceso de aparición de cargas en los cuerpos materiales es simplemente una pérdida o ganancia de electrones en el caso más sencillo. Así explicamos el fenómeno de electrización del ámbar por frotamiento con lana pues al tener los dos cuerpos en [5] contacto diferente características eléctricas, los

electrones se redistribuyen quedando en exceso en uno de ellos, que queda cargado negativamente, mientras el otro queda cargado positivamente. Un mismo cuerpo puede quedar cargado positiva o negativamente según las características del cuerpo con el que esté en contacto. Este carácter positivo o negativo se puede comprobar en forma experimental sencilla empleando un péndulo eléctrico que consiste en una pequeña esfera de médula de saúco (cuerpo muy ligero) suspendido por un hilo de seda de un punto fijo. Al acercar el ámbar recién frotado con lana la esfera es atraída pero si choca con él es repelida. Si después de esta experiencia acercamos vidrio también recién frotado con lana la esfera es atraída y como antes puede ocurrir que al tocar sea repelida. Concluimos con estos sencillos experimentos la existencia de dos estados de carga, positivo y negativo y que las cargas del mismo signo se repelen y las de distinto se atraen.

## I. 1. Conducción de la electricidad en la materia

Deliberadamente he usado la anacrónica denominación «conducción de la electricidad» para este primer subapartado, dado que es la que históricamente se empleó para identificar este tipo de estudios. Un buen ejemplo es el libro de los Thompson: J. J. Thompson, padre, que ya hemos mencionado y su hijo G. P. Thompson, Premio Nobel de Física en 1937 por el descubrimiento experimental de la difracción de electrones por cristales. Hoy en día, aunque se utilice la expresión, sabemos que lo que se conduce, mejor transporta, son cargas eléctricas electrones («huecos») e iones (cationes y aniones), móviles, los portadores de carga en el caso de corrientes de conducción, presentes en los llamados no conductores. Existen también otros tipos de corrientes como son las de convección y las de desplazamiento. Un ejemplo de corriente sin portadores del material son los «tubos de vacío» como los aparatos de televisión o los osciloscopios: un filamento incandescente, el cátodo, emite (inyecta) electrones que son atraídos por un electrodo positivo (ánodo) no existiendo materia (vacío físico) entre ambos electrones que al impactar en una pantalla recubierta con material fluorescente, o fosforescente si se trata de osciloscopios de pantalla persistente, producen una emisión en él visible que es la que permite la visualización del punto de impacto. Las corrientes de desplazamiento, introducidas por Maxwell en su genial síntesis del Electromagnetismo, están asociadas con campos eléctricos variables incluso en el vacío (físico).

Como hemos indicado el descubrimiento de los fenómenos eléctricos se admite que son las experiencias que realizó Tales de Mileto (640-548 a. C.) empleando diversos materiales, en especial el ámbar. En el estudio experimental de las propiedades eléctricas de la materia, un campo concreto de la Electricidad, podemos distinguir hasta el inicio del siglo XX varios periodos:

- 1) Periodo helénico en el que los «fisiólogos» jónicos exponen sus razonamientos de forma demostrativa desde la hipótesis de que el mundo (la «physis») es comprensible y se puede razonar para encontrar la unidad latente en la diferencia patente que presenta la Naturaleza.

2) La aportación de Gilbert (1600) que en su obra «De Magnete» también se ocupa de los fenómenos eléctricos. Puede sorprender el gran desarrollo del Magnetismo frente a la [6] Electricidad. Diversas explicaciones pueden considerarse: la utilitarista, por el uso de los imanes como brújulas de importancia capital en los viajes terrestres y marinos, la pragmática, por disponer de imanes naturales y no de «electretes». Se debe a Gilbert la distinción entre cuerpos eléctricos, que se electrizan al ser frotados, y anaeléctricos, en caso contrario. Hoy sabemos que un anaeléctrico, como es un metal también se electriza si se frota pero sujetándolo con un mango de material eléctrico como el vidrio, la madera... La diferencia se debe al carácter conductor del cuerpo humano.

3) Los galenos electrofisiólogos hasta Galvani, que estudian los efectos de la electricidad, producida en máquinas de fricción, sobre seres vivos. Estos estudios los desarrollan los galenos, hoy médicos, pero todavía en tiempos más recientes la palabra «físico» era empleada para identificar a lo que hoy denominamos médico y en otros idiomas ha permanecido esta relación: en inglés physician significa médico y physicist es físico. La electricidad animal, en especial del pez eléctrico o torpedo centró el estudio, pero Galvani también se interesó por los efectos de las descargas eléctricas cuando los músculos de una rana estaban sujetos por escalpelos o bisturíes. Remito a la lección inaugural del curso académico 1991-92 en la que el Prof. Dr. Antonio Aldaz Riera nos expuso detalles de estos experimentos.

4) Los electroquímicos entre los que hay que destacar la síntesis de Volta que permitió disponer de fuentes o generadores de electricidad del tipo electroquímico, baterías o pilas voltaicas, también (¡y tan bien!) expuesta por mi antecesor en esta lección inaugural representando a la Facultad de Ciencias.

5) Los electricistas o electrólogos que desarrollaron estudios sistemáticos distinguiendo entre conductores y aisladores (Gray) y entre electricidad vítrea -hoy positiva- y resinosa -hoy negativa- (Du Fay). Franklin descubrió el efecto de las puntas, base del pararrayos.

6) Los físicos experimentales del siglo XIX con la magnífica y extensa labor de Faraday que recoge en su magistral obra «Experimental Researches on Electricity».

A finales del siglo XIX parece claro que existen dos comportamientos -virtudes eléctricas- de la materia sometida a un estímulo eléctrico. Por un lado puede producirse un fenómeno de paso de electricidad, por otro una acumulación de electricidad, si se coloca entre dos electrodos (= vías para la electricidad) metálicos. Los primeros serán los conductores y el fenómeno de conducción, y los segundos dieléctricos y polarización eléctrica. Se recurre, como es lógico a interpretar estos comportamientos empleando el paradigma de los efluvios y de los fluidos: galvánico vital, dos fluidos interaccionantes...

En el caso de los sólidos, los metales son un claro ejemplo de conductores y Ohm descubre una dependencia lineal entre la diferencia de potencial aplicada entre sus extremos, medida con un voltímetro, y la intensidad de corriente circulante, medida con un amperímetro. El cociente entre estas medidas, la resistencia eléctrica, es una característica del material y de la geometría del hilo empleado. Este comportamiento caracteriza a los conductores óhmicos.

En el caso de los líquidos prácticamente solo los metales fundidos son conductores, pero las disoluciones acuosas de sales como el cloruro sódico presentan fenómenos de [7]

conducción y de electrólisis. Tenemos una distinción entre conductores iónicos o electrolíticos y conductores electrónicos o metales.

## I. 2. Generación y Transporte de cargas eléctricas en gases: Descargas

El estudio experimental de la conducción de la electricidad en los gases necesitó no sólo disponer de máquinas eléctricas que suministraran de forma continua una diferencia de potencial eléctrico, como ocurre básicamente en el caso de sólidos y líquidos, sino también de técnicas de evacuación que permitan controlar el contenido de los tubos que incorporan los electrodos para analizar el paso de la corriente a través del gas a una presión que también hay que controlar y medir.

Estas razones explican que el estudio de las propiedades eléctricas de la materia para el caso de gases se desarrollase a comienzos del siglo XIX con más dificultad. Pero a diferencia de los sólidos y de los líquidos se encontraron efectos visuales que explican el interés generalizado, pese a los problemas prácticos para la reproducción de resultados.

Al aplicar entre los electrodos una diferencia de potencial pequeña, y en consecuencia un campo eléctrico débil, se detecta que la corriente que circula es muy baja e incluso llega un momento en que no varía al incrementar el voltaje, produciéndose un fenómeno de saturación. Pero si continuamos aumentando el voltaje se produce un incremento brusco de la corriente. Este tipo de comportamiento es evidentemente no óhmico.

En los gases la condición que implica el paso de una corriente elevada se conoce como el fenómeno de descarga o «ruptura» eléctrica del gas: paso de un comportamiento no conductor (baja corriente) a conductor. Si se incrementa la corriente que circula se llega a una situación en la que entre los electrodos aparecen distintos espacios o zonas emisoras de luz y oscuras. Se habla entonces de descargas luminiscentes («glow»), siendo el color de las diversas zonas características del gas que ocupa el tubo.

La complejidad del fenómeno de descarga se debe a los muchos factores de que depende pues no sólo están implicados el gas, su composición y presión, sino también los electrodos, geometría y composición, además de las magnitudes eléctricas como son la diferencia de potencial y la corriente. El gas puede pasar a un estado conductor si se presentan mecanismos que incrementan el número de especies cargadas cuyo movimiento entre los electrodos implica un paso de corriente. El mecanismo más significativo es el impacto de los electrones acelerados por el campo existente en el espacio interelectródico con los átomos y moléculas que forman el gas.

Esta interacción puede producir la ionización y entonces tendremos, en el caso más general, que se produce un electrón y un ión positivo que al ser arrastrados por el campo transportan carga eléctrica entre los electrodos en una cuantía adicional a la que corresponde al gas sin este proceso interno consecuencia de la aplicación externa de una



diferencia de potencial entre los electrodos. Este mecanismo puede producirse en forma de una avalancha lo que justifica que la transición entre los dos estados se produzca de una forma relativamente brusca.

También puede suceder que la interacción origine la excitación de los átomos y moléculas del gas y en consecuencia se explica la existencia de emisiones de luz que [8] acompañan al proceso de desexcitación, esto es de retorno al estadio inicial, menos energético, después del impacto de los electrones energéticos.

En la mayoría de los gases si tenemos que explicar la existencia de electrones libres por la ionización intrínseca correspondiente a la temperatura del sistema, las cantidades son tan pequeñas que hay que introducir algún mecanismo extrínseco, como pueden ser las radiaciones energéticas a las que se encuentra sometido el tubo de descarga. Así se trata de explicar la existencia de un comportamiento de saturación que correspondería a la captación de todos los electrones generados por el agente externo. Esta situación experimental es el fundamento de algunos de los medidores de radiación nuclear.

Otro mecanismo que fue introducido desde los primeros intentos de explicación de los resultados experimentales es lo que se conoce como emisión de electrones en el bombardeo del cátodo por los iones positivos acelerados por el campo. De esta forma pueden ser procesos internos al gas lo que explicaría la existencia de una cantidad extra de electrones que en su trayecto desde el cátodo al ánodo daría lugar a los procesos de ionización y de excitación de las partículas neutras que constituyen la mayor parte de las especies presentes en el gas.

Las medidas experimentales que se realizaron de la distribución del potencial eléctrico entre los electrodos mostraron que se producía una mayor caída en la zona próxima al cátodo, el espacio oscuro de Crookes, que en la zona contigua al ánodo conocida como columna positiva. En esta última el potencial era prácticamente constante lo que implicaba la ausencia de carga neta, situación que se da, para iones monopositivos, cuando las concentraciones iónica y electrónica coinciden.

## II. Plasmas

I. Langmuir, en sus trabajos iniciados a comienzos de los años veinte para desarrollar válvulas que permitieran el paso de corrientes elevadas, introdujo en 1929 la palabra «Plasma» para describir los gases ionizados. Con más precisión se puede definir como un gas de partículas neutras y cargadas que es casi neutro y que presenta un comportamiento colectivo.

Este comportamiento colectivo se debe al largo alcance de las fuerzas eléctricas y a que la existencia de cargas móviles puede provocar que se produzca una ligera pérdida local de la neutralidad espacial lo que origina campos eléctricos a los que se ven sometidas las cargas. También como consecuencia del movimiento de las mismas se producen campos magnéticos que ejercerán acciones dinámicas sobre las cargas.

Precisamente el nombre «plasma» parece estar relacionado con la posibilidad de «dar forma» (plasmar) empleando campos eléctricos y magnéticos evitando así la necesidad de un contenedor o recipiente como es el caso de los fluidos, líquidos o gases. Es frecuente utilizar el término cuarto estado de la materia para los Plasmas, además de los sólidos, líquidos y gases.

El estado sólido se caracteriza por poseer volumen y forma característica, los líquidos, por su elevada incompresibilidad tendrían volumen fijo pero adquieren la forma del recipiente [9] que los contiene (¡suponiendo existe gravitación!) y los gases por su elevada compresibilidad, tendrían un volumen que depende de la presión y temperatura a que están sometidos (ecuación de estado) y su forma la fijan las paredes del recinto que los confina.

Adoptando una visión terrícola, geocéntrica, podemos considerar los Plasmas como una rareza dado que no se presentan de forma natural en nuestro pequeño planeta azul. Sin embargo, todo parece indicar que el 99% de la materia del universo se encuentra en «estado Plasma». De aquí su enorme interés en Astrofísica y Cosmología, campos en los que se inició su estudio. Una indicación de su relevancia es el que el Premio Nobel de 1983 se otorgase a Subrahmanyan Chandrasekhar por sus estudios de los procesos físicos de importancia en la estructura y evolución de las estrellas.

Si nos elevamos un poco del suelo, no hay que olvidar que la capa superior de la atmósfera se denomina Ionosfera y estas investigaciones también merecieron un Premio Nobel: el otorgado a E. V. Appleton en 1947. Su existencia permitió las comunicaciones radioeléctricas entre puntos sobre la superficie terrestre no situados en línea recta, aprovechando la reflexión de las ondas electromagnéticas de radiofrecuencia (capa de Heaviside). Esta capa es una protección frente a las dañinas radiaciones extraterrestres que inciden sobre el globo terráqueo, la famosa capa de ozono cuyo adelgazamiento o destrucción tanta preocupación merece. La existencia del campo magnético provoca efectos singulares en lo que se conoce como Magnetosfera (cinturones de van Allen, auroras boreales...).

El interés teórico y fundamental por los gases ionizados y los Plasmas se intensificó a partir de los años cincuenta: propagación de las ondas electromagnéticas, Magnetohidrodinámica, dispositivos (generadores energéticos) magnetohidrodinámicos (MHD)...

Simultáneamente se generalizó el estudio experimental y aplicado produciendo Plasmas en el laboratorio. La primera gran aplicación, como en otros casos ocurre, desgraciadamente fue bélica. Tras el lanzamiento de las bombas atómicas sobre Hiroshima (6 de agosto de 1945) y Nagasaki (9 de agosto de 1945), se pensó en aprovechar la energía que produce la fisión del isótopo  $^{239}$  del plutonio en la producción de la fusión del deuterio y del tritio, isótopos del hidrógeno, proceso por el que se origina la energía solar. La bomba desarrollada se denominó bomba H y se experimentó por vez primera en el Océano Pacífico el 1 de noviembre de 1952, resultando mucho más destructiva que la bomba de fisión.

La crisis energética de finales de 1973, provocada por el incremento espectacular del precio del crudo acordada por la Organización de Países Exportadores de Petróleo (OPEP), dinamizó la búsqueda de otras fuentes energéticas. Los estudios básicos y aplicados de los procesos de fusión (¡caliente! no el fiasco de la fusión «fría») encontraron un claro aliciente para la propuesta de reactores nucleares de fusión, tratando de reproducir en la Tierra los procesos energéticos que ocurren en el Sol y en otras estrellas. Volveremos sobre este tema en el apartado de Aplicaciones. [10]

## II. 1. Caracterización y Clasificación de los Plasmas

De una forma general, los parámetros que caracterizan al Plasma serán la concentración media de electrones que suponemos igual a la de iones (monopositivos), y la concentración de neutros, o equivalentemente el grado de ionización, y por otra las distribuciones energéticas y las energías medias o la temperatura equivalente. Estos valores se suelen indicar en unidades energéticas, electronvoltios (eV), en valores absolutos, grados Kelvin (K). La equivalencia de estas unidades con la normada en el Sistema Internacional, julio (J) es  $1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$ ,  $1 \text{ K} = 1,36 \times 10^{-23} \text{ J}$ , o bien la relación entre las unidades de uso  $1 \text{ eV} = 11765 \text{ K}$  y a la inversa  $1 \text{ K} = 8,5 \times 10^{-5} \text{ eV}$ .

La introducción de temperaturas y energías medias se basa en el supuesto de conocer la función de distribución en función de las energías de los componentes de un sistema y en las que aparece el parámetro temperatura, como ocurre en la distribución maxwelliana que se deduce para los gases (no ionizados) en la teoría cinética. En el caso de los Plasmas se complica el problema porque frecuentemente los tres subsistemas, -electrones, iones y partículas neutras- no se encuentran en equilibrio termodinámico entre sí.

Así se habla de temperatura electrónica y de temperatura iónica. Una complicación adicional es emplear distintas temperaturas para las especies (masivas) iones y neutros: temperatura del gas, que refleja la energía traslacional, temperatura de excitación, que indica la situación de las partículas excitadas (energía «interna»), las temperaturas de ionización y de disociación, que caracterizan estos procesos, y la temperatura de radiación que cuantifica la energía radiada, esto es el intercambio con el entorno por emisión de fotones.

Los enfoques teóricos generales de la interacción de gases ionizados con campos electromagnéticos son tres. El primero es la teoría del equilibrio que se basa en la hipótesis de que las colisiones entre las partículas cargadas conducen a una distribución tipo Maxwell-Boltzmann. El segundo es la teoría orbital que parte del estudio del movimiento de los electrones y de los iones. El tercero es la formulación hidromagnética en el que combinan las ecuaciones clásicas (de Maxwell) del Electromagnetismo con las ecuaciones clásicas del movimiento de fluidos y es un buen punto de partida para analizar los aspectos dinámicos asociados al carácter colectivo de los Plasmas.

En los Plasmas se introduce, por analogía con el tratamiento de los electrolitos, la longitud de Debye que está relacionada con la concentración volúmica de cargas y con la temperatura. Es muy habitual que en las descargas de laboratorio se introduzcan distintos valores para la temperatura que caracteriza la energía media de los electrones, los iones y las partículas neutras, situación que evidentemente no se presenta en los electrolitos. La longitud de Debye es una medida del apantallamiento que hace un plasma de una alteración electrostática como puede ser un electrodo. En su proximidad se genera una región de carga espacial o vaina. Para poder considerar que existe un plasma se tiene que cumplir que sus dimensiones sean mucho mayores que la longitud de Debye, pues en caso contrario estamos en una situación de gas ionizado. Una forma equivalente de hablar de un Plasma es indicar que el número de partículas dentro de una esfera cuyo radio es la longitud de Debye es muy elevado. [11]

Un aspecto dinámico a indicar es la frecuencia propia de las oscilaciones de plasma debidas al carácter colectivo. La denominada frecuencia de plasma es directamente proporcional a la raíz cuadrada de la concentración de las especies cargadas e inversamente proporcional a la raíz cuadrada de la masa. Sus valores para electrones e iones son bastante diferentes: para el ión menos pesado, el protón, su valor es unas 43 veces menor.

Si el Plasma se somete a una perturbación de frecuencia menor que la frecuencia de plasma de las partículas cargadas (electrones e iones), éstas responderán tratando de mantener la neutralidad del Plasma, cosa que no ocurrirá en las situaciones en que sea la frecuencia mayor. La diferencia entre frecuencias de plasma de los electrones e iones es el origen del comportamiento tan variado de los Plasmas para la propagación de ondas electromagnéticas según sea el valor de la frecuencia. Este fenómeno se conoce como dispersión. La presencia de campos magnéticos provoca que el Plasma, medio magnetoactivo, se comporte de forma anisótropa, .

Hasta ahora hemos supuesto que el Plasma es homogéneo, esto es que las concentraciones y temperaturas son las mismas en todos los puntos. Frecuentemente existen inhomogeneidades, lo que exige introducir los procesos de difusión asociados a los gradientes de estas magnitudes características del Plasma.

Para clasificar los Plasmas se pueden utilizar distintos enfoques. Aquí vamos a utilizar el Termodinámico. Existen Plasmas en equilibrio termodinámico global (CTE-Complete Thermodynamie Equilibrium-Plasmas) para los que las distintas temperaturas antes introducidas coinciden, que sólo existen en las estrellas y durante brevísimos intervalos temporales en explosiones violentas. También se distinguen Plasmas en equilibrio termodinámico local (LTE-Local Thermodynamic Equilibrium-Plasmas) en los que todas las temperaturas coinciden a excepción de la temperatura de radiación, por lo que también conocen como Plasmas térmicos («Thermal Plasmas» o «calientes»). Los Plasmas «calientes» se presentan en los sistemas de depositación de recubrimientos y de reducción y fusión de gangas metalúrgicas (antorcha o soplete de plasma) y en los reactores experimentales de fusión termonuclear. Por fin tenemos los Plasmas más frecuentes en el laboratorio en los que no existe equilibrio local y que se denominan «fríos». Éste es el caso de las descargas en gases a baja presión.

## II. 2. Producción de los Plasmas

En el universo se presentan Plasmas cuyas características varían en un rango amplísimo: las concentraciones electrónicas, entre 1 y  $10^{20}$  cm<sup>-3</sup> (¡20 órdenes de magnitud!) y las temperaturas electrónicas entre  $10^{-2}$  y 105 eV (¡sólo 7 órdenes de magnitud = 10 millones!). El espacio interestelar contiene un plasma de hidrógeno con una concentración 1 electrón por centímetro cúbico pero en la ionosfera la concentración es un millón de veces mayor y la temperatura electrónica 0.1 eV. En el Sol y otras estrellas las temperaturas en la superficie varían entre 0.5 y 7 eV (5000 y 70000 K). El núcleo del Sol se admite que es un [12] plasma completamente ionizado con una temperatura de unos 2 keV (¡unos 24 millones de grados Kelvin!).

El fundamento de los métodos de producción de Plasmas en el Laboratorio es muy simple: aportar energía a un gas, provocando su ionización, o a un sólido para conseguir una sublimación ionizante. En el cuadro que se acompaña se recogen distintas aproximaciones para conseguir este objetivo. Los sistemas o reactores que realizan estos diseños conceptuales son enormemente variados y no podemos entrar en la descripción de sus elementos constitutivos, materiales empleados, problemáticas...

[13]

Para los Plasmas «fríos» ya hemos indicado que se producen en las descargas eléctricas al aplicar una diferencia de potencial (voltaje) de corriente continua (cc) a un gas a presión reducida. También se puede emplear como excitación voltajes de corriente alterna (ca) bien de RF (radiofrecuencia asignada para uso industrial 13,56 MHz), o bien microondas (frecuencia asignada 2,45 GHz). En el caso de voltajes variables con el tiempo se puede recurrir a aplicarlos directamente a electrodos en contacto con el gas o al acoplamiento inductivo o capacitivo sin electrodos.

Para los Plasmas Termonucleares («calientes») existen dos propuestas base: el confinamiento por campos eléctricos y magnéticos empleando estructuras toroidales (Tokamaks -en terminología rusa, que se utiliza genéricamente- Stellarators y Reversed Field Pinches - RFP) y el confinamiento inercial, en el que se enfocan sobre microesferas de tritio haces de láser de potencia elevadísima. Esta última aproximación se incluía dentro de la propuesta norteamericana de «Guerra de las Galaxias» (Star Wars, Strategic Defence Initiative - SDI).

## III. Aplicaciones

Tratar de presentar una simple panorámica del campo de las aplicaciones de los Plasmas es tarea harto difícil dada su enorme variedad. Voy a intentar resumirlas en cuatro grupos:

1) Fuentes de radiaciones corpusculares, como son los cañones de iones que producen haces de iones positivos o negativos con energía traslacional dirigida y diversa - desde eV hasta MeV- que normalmente son extraídas de una descarga o de un Plasma. Otro ejemplo son las antorchas o sopletes de plasma, ya mencionados.

2) Fuentes de radiaciones fotónicas, como son los tubos de neón publicitarios, los tubos fluorescentes, empleados en luminotecnia, los láseres de gas, las espectroscopías de emisión por Plasma con Acoplamiento Inductivo (ICP) de interés analítico.

3) Plasmas y Fusión Nuclear, tanto para estudios básicos en Astrofísica como aplicados para generar energía -reactores nucleares. Se utilizan de forma muy expresiva los términos espejos y botellas magnéticas para referirse a estas estructuras del campo. Aunque se han descrito varias posibilidades, la más frecuente es la de toroide, o tokamak en su denominación soviética. Se están desarrollando distintos proyectos a nivel europeo JET, NET e internacional. ITER. En España en el CIEMAT de Madrid, están experimentando con un reactor toroidal de tamaño reducido, TJII.

El futuro de todas estas investigaciones es dudoso por la retirada de los Estados Unidos en octubre de 1998 del proyecto internacional ITER que se estaba desarrollando en colaboración con la Unión Europea, Japón y Rusia. Los tres socios que permanecen desean continuar pero las probabilidades son una incógnita. [14]

4) Plasmas y Materiales. Este es un campo con un desarrollo potentísimo tanto en Microelectrónica como en Ciencia e Ingeniería de los Materiales. En el cuadro se recogen algunas de las posibilidades, derivadas del hecho de que siendo «fríos» la existencia de especies excitadas y reactivas permiten la producción de reacciones o procesos singulares para la «baja temperatura», .

[15]

Como métodos de depositación de películas delgadas o capas finas cada vez son más frecuentes los que utilizan plasma bien sea para reducir la temperatura de depósito, bien sea para encontrar compuestos que en condiciones de equilibrio no se obtendrían.

Pero donde han encontrado una aplicación muy extendida es en la fabricación de circuitos integrados de muy elevado nivel de integración (VLSI por sus iniciales en inglés) o ultra elevado (ULSI). En éstos las dimensiones de los elementos del circuito son micrométricas, esto es la millonésima del metro, e incluso inferiores. Los métodos habituales de producción, conocidos como húmedos, porque emplean disoluciones están siendo sustituidos por los secos en los que se produce un plasma que permite el grabado en estas dimensiones. Estamos hablando de la Microelectrónica que es la base de los sorprendentes incrementos en memoria y velocidad de proceso de los ordenadores como ejemplo más conocido.

#### IV. Estudios y trabajos relacionados con los Plasmas en la Universidad de Alicante

Para terminar intentaré presentar las actividades tanto docentes como de investigación que se desarrollan en esta Universidad relacionadas con Plasmas. Posiblemente mi información no sea totalmente correcta y agradecería que me suministren las correcciones y las adiciones pertinentes.

La docencia es inexistente, tanto a nivel de primer ciclo, lo que puede ser lógico tratándose de un tema relativamente especializado, como de segundo o tercer ciclo. En este último caso es muy fácil que aparezca incluyéndola en un Programa de Doctorado como Ciencia de Materiales. En segundo ciclo, es posible que en un futuro no muy lejano la Facultad de Ciencias imparta la Licenciatura en Física. Los otros posibles estudios, los de Ciencia e Ingeniería de los Materiales ya están implantados desde este curso académico en la Universidad Miguel Hernández. Cuando me incorporé a la Universidad de Alicante, curso 1981-82, la Facultad de Ciencias ¡ya había solicitado la Licenciatura en Ciencias Físicas, como entonces se llamaba!

La investigación es variada y dispersa. En el Departamento de Física Aplicada, el Laboratorio de Capas Finas y Colisiones Atómicas, constituido al incorporarse a esta Universidad los Profs. Gras Martí y Vallés Abarca, trabaja en procesos de Grabado Seco en Microelectrónica. También en nuestro Departamento, este Laboratorio en colaboración con el Laboratorio de Materiales Fotosensibles, que dirige el Prof. Quintana Arévalo, están trabajando en el revelado seco de la Gelatina Dicromatada. Desde hace dos años estos dos grupos colaboran con los Profs. Aldaz Riera y Feliu Martínez, del Departamento de Química Física en metrología de estructuras micrométricas poliméricas y en su aplicación a la producción de microelectrodos de aplicación electroquímica.

En el Departamento de Física, Ingeniería de Sistemas y Teoría de la Señal, el Grupo de Astrofísica y Tecnología Espacial, que dirige el Prof. Bernabeu Pastor, en colaboración con el grupo del Prof. Strazzulla de la Universidad de Catania, se trabaja sobre la detección de O<sub>2</sub> y N<sub>2</sub> en granos interestelares. [16]

En el Departamento de Química Inorgánica, el Laboratorio de Adhesivos que dirige el Prof. Martín Martínez se está estudiando la aplicación de los plasmas de baja presión para el tratamiento de cauchos vulcanizados de estireno-butadieno. En el Departamento de Química Analítica, el Grupo de Espectroscopía Atómica que dirigen los Profs. Hernandis Martínez y Canals Hernández se trabaja en la evaluación de las microondas en espectroscopía de masas en ICP.

---

**[Facilitado por la Biblioteca Virtual Miguel de Cervantes](#)**

Súmese como **[voluntario](#)** o **[donante](#)** , para promover el crecimiento y la difusión de la **[Biblioteca Virtual Universal](#)**.

Si se advierte algún tipo de error, o desea realizar alguna sugerencia le solicitamos visite el siguiente [enlace](#).

