

005790

2 g.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA

ESTUDIOS DE DEGRADACION DE RESIDUOS PELIGROSOS MEDIANTE PLASMA TERMICO

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERIA QUIMICA (PROCESOS)

PRESENTA ING. GERMAN COTA SANCHEZ

DIRECTOR DE TESIS: DR. RAFAEL HERRERA NAJERA



MEXICO, D. F.

264299.

1998

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.



ESTADOS UNIDOS MEXICANOS
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA

FACULTAD DE QUÍMICA
DIRECCIÓN

ING. LEOPOLDO SILVA GUTIÉRREZ
Director General de la Administración Escolar
Presente.

AT'N: Lic. Antonio Díaz García
Jefe de la Unidad de Administración del Posgrado.

Me es grato informarle que el alumno **IQ GERMÁN COTA SÁNCHEZ** presentará próximamente su examen para obtener el grado de Maestría en Ingeniería Química (Procesos) ante el siguiente jurado:

Presidente	Dr Sergio Trejo Martínez
Primer Vocal	Dr Tomás Viveros García (UAMI)
Secretario	Dr. Julio Landgrave Romero
Primer Suplente:	Dr Reynaldo Sandoval González
Segundo Suplente:	Dr Javier Audry Sánchez

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

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
Ciudad Universitaria, D. F., 22 de junio de 1998

El Director

Dr. Enrique R. Bazúa Rueda

- C c p. Integrantes del Jurado
- C.c.p. Coordinador de Área
- C.c.p. Departamento de Control Escolar
- C c p. Interesado
- *ggm

Dr
Recibi' 30 Jun 98

AGRADECIMIENTOS

A DIOS, por todas las bendiciones recibidas.

A LAURA y ALINA, mi razón de ser

A LUIS Y LUISA, mis padres, por todo su amor.

A MI HERMANA HIDEMI, por todo su amor, paciencia y ternura.
Ciro's, esto es algo que logré por ti.

A ALFONSO, SERGIO, HUGO, mis hermanos, por su fraternidad.

A EL DR. RAFAEL HERRERA NAJERA, por todos sus comentarios y consejos.

a Joel, Aurelio, Rosendo, Fortino, Fili, Fidel, Gabriel, Javier Reyes Luján, a todos los miembros del LAP'T y a todos mis profesores y amigos.

GRACIAS

Este trabajo se realizó en el Laboratorio de Aplicaciones de Plasma Térmico de la Gerencia de Ciencias Ambientales del Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, bajo la Dirección del Dr. Rafael Herrera Nájera, catedrático de la Facultad de Química de la Universidad Nacional Autónoma de México.

INDICE

PROLOGO.....	i
CAPITULO 1. CONCEPTOS BASICOS DE PLASMA.....	1
1.1. DEFINICION.....	2
1.2. GENERACION DE UN PLASMA TERMICO.....	4
1.2.1. Arcos Térmicos.....	4
1.2.2. Iniciación de Arcos.....	5
1.2.3. La columna de Arco.....	6
1.3. DISPOSITIVOS DE GENERACION DE PLASMA TERMICO.....	7
1.3.1. Antorchas No Transferidas de dc.....	9
1.3.2. Antorchas Transferidas de dc.....	10
1.3.3. Descargas Acopladas Inductivamente.....	11
1.3.4. Antorchas de Plasma Híbridas.....	12
1.4. APLICACIONES INDUSTRIALES DEL PLASMA TERMICO.....	12
CAPITULO 2. CONCEPTOS BASICOS DE RESIDUOS.....	16
2.1 GENERACION DE RESIDUOS PELIGROSOS.....	17

2.2. RESIDUOS ORGANO-HALOGENADOS.....	19
2.2.1. Características de los Bifenil Poli Clorados (PCB's).....	20
2.2.2. Riesgos a la Salud.....	20
2.2.3. Reactividad.....	21
2.2.4. Propiedades Físicas.....	22
2.2.5. Compuestos Modelo a Degradar en Lugar de PCB's.....	23
2.3. MECANISMOS DE DEGRADACION DE PCB's.....	24
2.3.1. Proceso de Degradación Térmica de PCB's a Baja Temperatura.....	24
2.3.2. Proceso de Degradación Térmica de PCB's a Alta Temperatura.....	25
<i>CAPITULO 3. DISEÑO CONCEPTUAL DEL EQUIPO EXPERIMENTAL.....</i>	<i>28</i>
3.1 SISTEMA PARA LA CARACTERIZACION TERMICA Y ELECTRICA DE ANTORCHAS DE PLASMA TERMICO.....	29
3.1.1. Línea de Alimentación de Gases Plasmágenos.....	29
3.1.2. Mezclador de Gas Plasmágeno.....	31
3.1.3. Línea de Alimentación de Mezcla de Gas Plasmágeno a la Antorcha.....	32
3.1.4. Indicadores de Temperatura de Agua de Enfriamiento.....	32
3.2. DESCRIPCION DEL EQUIPO PARA LA DEGRADACION DE RESIDUOS PELIGROSOS.....	32
3.2.1. Generador de Potencia.....	33
3.2.2. Cañón de Plasma Térmico.....	35
3.2.3. Reactor de Pirólisis.....	37
3.2.4. Intercambiador de Calor.....	38
3.2.5. Torre de Absorción de Gases.....	39
3.2.6. Puntos de Muestreo.....	40
3.2.7. Equipo Analizador de Gases Residuales.....	40

CAPITULO 4 CARACTERIZACION TERMICA Y ELECTRICA DE LA ANTORCHA DE PLASMA TERMICO.....42

4.1. DESARROLLO EXPERIMENTAL.....43

4.1.1. Correlación Clásica de la Conducta Eléctrica.....44

4.1.2. Parámetros Adimensionales.....45

4.1.3. Correlación Adimensional del Comportamiento Eléctrico.....48

4.1.4. Correlación Adimensional de la Eficiencia Térmica.....48

4.2 CARACTERIZACION ELECTRICA DE LA ANTORCHA DE PLASMA.....51

4.2.1 Correlación Clásica.....54

4.2.2. Correlación con Números Adimensionales.....55

4.3. CARACTERIZACION TERMICA DE LA ANTORCHA DE PLASMA.....58

CAPITULO 5. CONDICIONES DE OPERACIÓN Y RESULTADOS EXPERIMENTALES.....63

5.1. PRUEBAS PRELIMINARES.....64

5.2 DEGRADACION DE MOLECULAS MODELO.....66

5.2.1. Degradación de Tetracloruro de Carbono (CCl₄).....67

5.2.2. Degradación de Benceno (C₆H₆).....70

5.2.3. Degradación de Tetra Cloro Etileno (C₂Cl₄).....71

5.3. RESULTADOS EXPERIMENTALES DE LA DEGRADACION DE ACEITE COMERCIAL.....71

5.4. CALCULOS DE LA EFICIENCIA DE DEGRADACION.....76

5.4.1. Eficiencia de Degradación para Cada Uno de los Residuos Tratados.....	76
5.5. BALANCE DE MATERIA Y ENERGIA DEL EQUIPO EXPERIMENTAL.....	84
<i>CONCLUSIONES.....</i>	<i>87</i>
<i>ANEXOS.....</i>	<i>92</i>
<i>BIBLIOGRAFIA.....</i>	<i>104</i>

PROLOGO

La generación y el tratamiento de residuos peligrosos es un problema que afecta a todo el mundo. En junio de 1992, en Río de Janeiro, Brasil, se llevó a cabo la Conferencia de Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente, en donde México adoptó compromisos al respecto para incorporar en su legislación las disposiciones asentadas en la conferencia.

En México, la reglamentación, control y riesgos relacionados con los residuos peligrosos, ha sido abordado por diferentes dependencias de la Administración Pública (SSA, SEMARNAP Y SECOFI). Sin embargo, el sector privado, académico y social han permanecido prácticamente al margen de este aspecto.

Por otro lado, según estadísticas¹, se estima que en el país se generan 200 millones de toneladas de residuos peligrosos al año, de las cuales 170 millones son de origen industrial y 30 millones son de origen municipal, y no obstante la gran importancia que reviste el control, disposición y tratamiento de los residuos peligrosos, desafortunadamente, debido a la falta de una legislación adecuada y a la implementación de métodos eficientes para el tratamiento de residuos, solamente 7.4 millones de toneladas son dispuestas adecuadamente, lo que hace suponer que es muy poca la infraestructura para el tratamiento y disposición instalada.

Atendiendo esta problemática, el Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ) ha iniciado acciones para realizar estudios y desarrollo tecnológico para el tratamiento de residuos peligrosos, en la que se encuentra la tecnología del plasma térmico, el cual es usado como una fuente concentrada de energía para "romper" los enlaces de las moléculas de los residuos peligrosos, dando como resultado una mezcla de partículas constitutivas que al enfriarse se recombinan para formar gases de bajo peso molecular y sólidos semivitrificados.

¹ Bustani A. Curso-Taller, Manejo y Disposición de Residuos Peligrosos. UNAM. 1994.

En este escenario se encuentra la Comisión Federal de Electricidad (CFE) y Petróleos Mexicanos (PEMEX), quienes tienen un grave problema para la disposición y/o tratamiento de aceites dieléctricos gastados, los cuales tienen un alto contenido de compuestos cancerígenos, llamados Bifenilpoliclorados (PCB's). Se estima² que la cantidad de este tipo de residuo se encuentra en el orden de 7.5 a 8 millones de kilos de fluido.

Debido a que estas dos dependencias han mostrado un gran interés en el proceso de degradación de residuos peligrosos con plasma térmico, se plantea este trabajo para realizar el estudio de la degradación de este tipo de residuo, aunque vale la pena mencionar que el espectro de residuos que se pueden tratar con este método es bastante amplio. Es claro que, una vez que el equipo se encuentre instalado y en operación, se podrán realizar estudios de degradación sobre diferentes tipos de residuos, dependiendo de las necesidades existentes en la industria, ya que en la actualidad no existen muchos estudios al respecto.

Así pues, el objetivo principal de este trabajo es el diseño, la instalación y puesta en marcha de un equipo experimental de degradación de residuos peligrosos equipado con una antorcha de plasma térmico con capacidad controlable de 0 a 10 kW, así como mostrar los estudios experimentales de la degradación de compuestos modelo, usados para representar la degradación de los residuos peligrosos que generan las dependencias mencionadas arriba, es decir, demostrar la eficacia del proceso de degradación por plasma térmico con residuos peligrosos, como los bifenilpoliclorados.

En la primera parte de este trabajo se hace mención de los conceptos básicos del plasma, abordando temas como la definición de plasma, tipos de plasmas, formas de generación, y algunas aplicaciones industriales.

² Chávez G. H., Quijano H. R. Residuos Peligrosos: Manejo y Tratamiento de Bifenilos Policlorados (BCP's). Tesis UNAM. 1995.

También se hace mención de la problemática en la que se encuentra México, con respecto a la generación, disposición y/o tratamiento de los residuos peligrosos, poniendo especial atención a la generación, composición y propiedades de los bifenilpoliclorados.

Posteriormente se hace una amplia descripción del equipo experimental de degradación de residuos peligrosos construido, del proceso de degradación, de la antorcha de plasma usada en el equipo y del sistema usado para su caracterización térmica y eléctrica, ya que es de suma importancia conocer el comportamiento de las antorchas de plasma antes de utilizarlas en alguna aplicación específica.

En lo que respecta a la parte de degradación se muestran los resultados experimentales de la degradación de compuestos modelo y aceite lubricante comercial. En esta parte, también se hace una interpretación de los resultados obtenidos en los experimentos, con el fin de demostrar la efectividad de la degradación.

Por último, se presenta la eficiencia de la degradación para cada uno de los residuos degradados para demostrar la alta capacidad de degradación que tiene la tecnología de plasma térmico. Así mismo, se presentan los balances de materia energía del equipo experimental cuando se está degradando aceite, con el objeto de tener información para un futuro escalamiento de este sistema.

CAPITULO 1

CONCEPTOS BASICOS DE PLASMA.

La tecnología del plasma por arco se desarrolló durante los últimos años hasta llegar a ser considerada como una actividad científica interdisciplinaria, con un amplia gama de aplicaciones importantes en el procesamiento de materiales y en el tratamiento de residuos peligrosos³ ó radiactivos. Esta tecnología se utilizó en los E.U.⁴ en programas espaciales, para simular el reingreso de los vehículos espaciales a la atmósfera terrestre, ya que el escudo que estos requieren debe de ser suficientemente resistente para protegerlos del calor, y el plasma térmico es capaz de generar una atmósfera de alta temperatura que alcanza hasta los 20,000 °K en el centro, lo cual lo hace un método eficaz para simular dicho regreso.

1.1. DEFINICION.

El plasma es a veces referido como el cuarto estado de la materia; consiste en un gas ionizado compuesto de moléculas, átomos, iones, electrones y fotones.

En la Figura 1.1 se muestra un diagrama de la densidad de partículas n_p (cm^{-3}) contra la energía de las partículas ($\text{eV} \approx 8,000 \text{ }^\circ\text{C}$) para diversos casos de plasmas, ya sea formados naturalmente, o producidos para investigación y aplicaciones industriales.

En contraste con un gas ordinario, un plasma contiene cargas eléctricas libres, las cuales son producidas en el gas por una gran variedad de procesos de ionización. En régimen permanente, la rapidez de ionización en el plasma es balanceada por la rapidez de recombinación. Dependiendo del contenido energético del plasma, el grado de ionización puede ser tan alto que, prácticamente no contiene ninguna partícula neutra, es decir es un plasma completamente ionizado.

3 Freeman H.M. et al. Journal of Hazardous Materials, 14 (1987). Thermal Destruction of Hazardous Waste- A State of Art Review. Pag. 103-117.

4 Olof J.E. et al. Plasma Technology in Metallurgical Processing. (1988). Pag. 5-6.

En general se identifican dos tipos de plasma, el de equilibrio o plasma térmico y el de no-equilibrio o plasma frío. Algunas de las características más importantes en un plasma térmico son las siguientes:

- a) La igualdad entre las temperaturas de las partículas pesadas y los electrones ($T_e = T_h$);
- b) La existencia de equilibrio químico;
- c) Densidad electrónica alta (10^{13} a 10^{16} cm^{-3});
- d) Alta energías de los electrones, del orden de 1 a 2 eV.

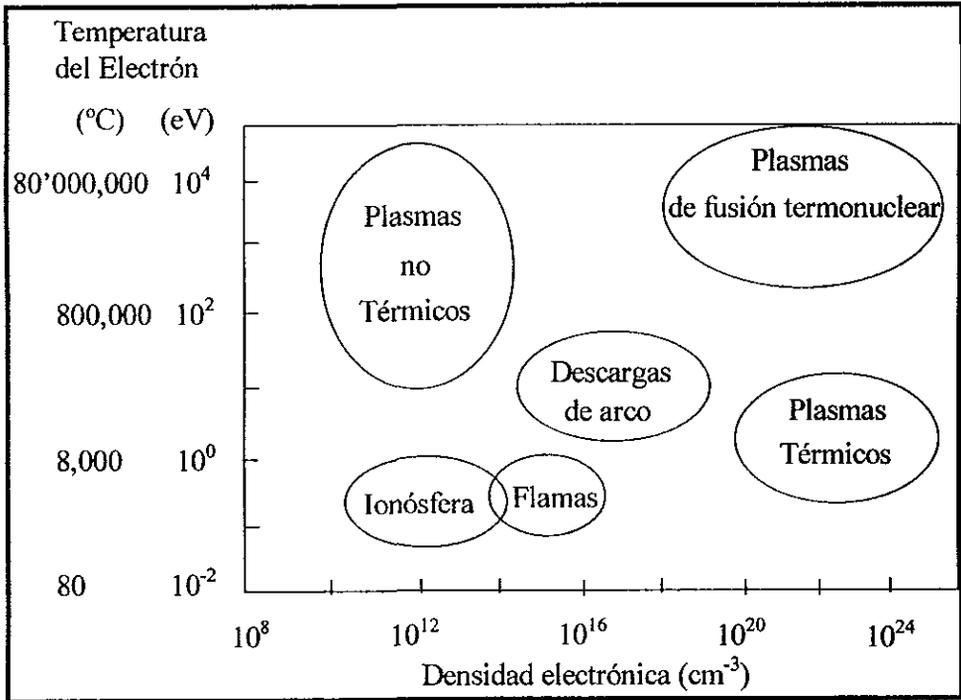


Fig. 1.1. Zonas de Operación de Diversos Plasmas.

Todo esto hace que la temperatura en la periferia del plasma sea superior a 4,000 °K, alcanzando 20,000 °K en el núcleo.

En contraste, los plasmas fríos son caracterizados por:

- a) Presentar fuertes desviaciones en la cinética de equilibrio ($T_e \gg T_h$);
- b) Bajas densidades electrónicas (10^9 a 10^{13} cm^{-3});
- c) Se presentan en ambientes de baja presión, incluso a la presión atmosférica.

1.2. GENERACION DE UN PLASMA TERMICO.

Los plasmas pueden ser generados al hacer pasar una corriente eléctrica a través de un gas. Los gases a temperatura ambiente son excelentes aislantes, sin embargo, un pequeño porcentaje de cargas pueden ser suficientes para hacer que el gas conduzca la electricidad. Este proceso es conocido como rompimiento eléctrico, y existen muchas formas por las cuales se puede lograr. El rompimiento eléctrico en un gas inicialmente no conductor establece el paso de una corriente eléctrica a través del gas ionizado entre dos electrodos; a este fenómeno se le conoce como descarga gaseosa.

1.2.1. Arcos Térmicos.

Una comparación con otras formas de descargas permite identificar tres hechos característicos de los arcos, que no se presentan en otro tipo de descargas, a saber:

- a) Densidad de corriente relativamente alta. La densidad de corriente en una columna de arco puede alcanzar valores de 100 A/cm^2 . Esta situación es aún más pronunciada en los

electrodos en donde pueden alcanzar densidades de corriente del orden de 10^6 A/cm². Por otro lado, las densidades de flux de calor se encuentran en el orden de 10^6 a 10^7 W/cm².

- b) Caída de cátodo baja. La distribución de potencial en un arco eléctrico exhibe un comportamiento muy peculiar (ver Figura 1.2): el potencial cambia rápidamente en los electrodos, formando lo que se llama las caídas de cátodo y ánodo. En este contexto, la caída del cátodo es de peculiar interés, ya que supone valores de alrededor de 10 a 20 V, mientras con las caídas de cátodo en descargas de incandescencia se exceden los 100 V. Esta caída de cátodo relativamente baja es una consecuencia de la mejor eficiencia de los mecanismos de emisión de electrones en el cátodo.
- c) Alta luminosidad de la columna. Este hecho representa una distinción clara entre una columna de arco y la columna de otras formas de descargas. La luminosidad extremadamente alta de la columna a alta presión ($p > 100$ kPa) de los arcos térmicos encuentra muchas aplicaciones en el campo de la luminosidad, como por ejemplo, lámparas de descarga a base de vapores de mercurio o sodio, las cuales son utilizadas en lugares en donde se necesita una alta luminosidad como aeropuertos, faros, laboratorios, etc.

1.2.2. Iniciación de Arcos.

Los arcos eléctricos pueden ser iniciados de diferentes formas:

- a) Por contacto de electrodos. Si uno o ambos electrodos son móviles, el contacto de los electrodos puede ser establecido después de que un potencial eléctrico ha sido aplicado a ellos, dando lugar a una corriente de corto circuito que fluye sobre el punto de contacto y lo calienta lo suficiente como para permitir una emisión termoiónica del cátodo. Al mismo tiempo, el material del electrodo es ionizado y evaporado en el punto de contacto, proporcionando así, el acarreador de descargas requerido para desarrollar un arco.

- b) Por pre-ionización de la abertura de descarga de los electrodos. Dicha pre-ionización reduce el voltaje requerido para iniciar el arco a valores convenientes. Existen varias formas para hacer que la región que separa los electrodos sea eléctricamente conductora, la más común es una chispa de alta frecuencia, capaz de generar el acarreador de carga necesaria entre los electrodos. El otro método frecuentemente usado es poner en contacto los electrodos a través de un alambre delgado para generar el arco. El voltaje aplicado hace que el alambre "explote", proporcionando el acarreador de cargas necesario para establecer un arco.

1.2.3. La Columna de Arco.

La distribución de potencial mostrada en la Figura 1.2 es típica para arcos largos (longitud del arco $>$ diámetro del arco) y divide el arco en tres regiones: la región del cátodo, con caída de potencial del orden de 20 V; la región de la columna de arco con caída de potencial de 5 V y la región del ánodo con caída de 5 V.

La columna de arco, con su pequeño gradiente de potencial, representa el cuerpo principal de un arco, mientras las regiones del cátodo y el ánodo pueden ser consideradas como capas límite delgadas. En contraste con las regiones del cátodo y del ánodo, en donde existen cargas espaciales netas, la columna del arco representa un plasma real en el cual prevalece la quasi-neutralidad, es decir, en un volumen de plasma lo suficientemente grande para contener un gran número de partículas y suficientemente pequeño como para considerar que no existen variaciones de densidad y temperatura y, en ausencia de fuerzas externas, el número de cargas positivas (iones positivos) y negativas (electrones) son iguales, por lo que la carga eléctrica total es cero.

La región entre los electrodos se define como la parte de paso de descarga que contiene la superficie del electrodo, la región de la carga espacial neta adyacente al electrodo y la zona de transición hacia la columna de arco, la cual es caracterizada por arcos de intensidades y presiones altas y establece la conexión hacia la columna de arco. Por otro lado, la capa límite es caracterizada por fuertes gradientes axiales de las propiedades del plasma (temperatura, potencial, densidad de partículas, densidad de corriente, etc.), en contraste con la columna de arco en la cual los gradientes axiales son pequeños.

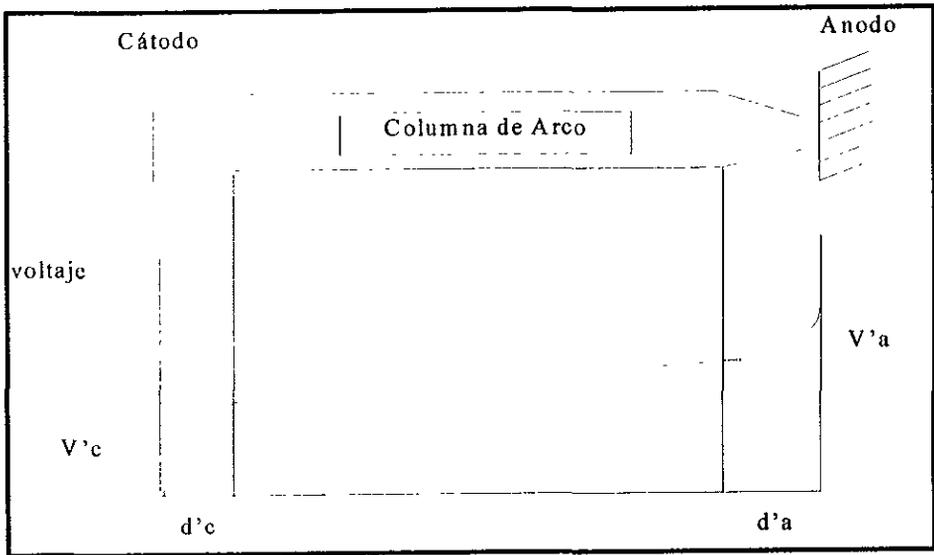


Fig. 1.2. Distribución de Potencial Típico a lo Largo de un Arco.

1.3. DISPOSITIVOS DE GENERACION DE PLASMA TERMICO.

El plasma térmico se puede generar mediante dispositivos denominados antorchas de plasma (Figura 1.3), estos dispositivos constan de dos electrodos y una entrada de gas. La combinación

adecuada de electricidad y de gas a través de los electrodos produce una flama de intensidad luminosa alta conocida como plasma.

Existen principalmente dos tipos característicos de antorchas dependiendo de la disposición de los electrodos, los cuales tienen como objetivo establecer una continuidad de la corriente eléctrica entre la fase sólida (el material conductor de la antorcha) y la fase gaseosa (el arco eléctrico), y donde la frontera entre estas dos fases es la superficie de los electrodos. Por otra parte, para mantener un arco eléctrico se requieren al menos de dos electrodos para completar la trayectoria de los portadores de carga (iones y electrones) dentro y fuera del espacio gaseoso del arco.

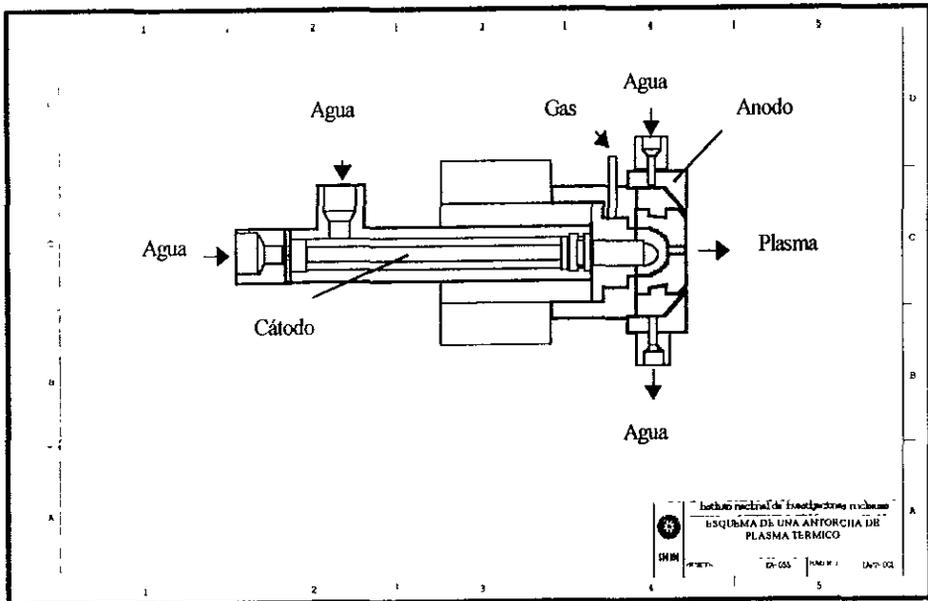


Fig. 1.3. Esquema de una Antorcha de Plasma Térmico

Entre los principales mecanismos de generación del plasma se encuentran:

- a) Las antorchas no transferidas en corriente directa (dc).
- b) Las antorchas transferidas por dc.
- c) Las antorchas de plasma acopladas inductivamente.
- d) Las combinaciones híbridas de los tipos anteriores.

1.3.1. Antorchas No Transferidas por dc.

Entre los mecanismos más comúnmente usados para la generación del plasma térmico se encuentran las antorchas de plasma no transferido por corriente directa, con las cuales se logra producir un plasma a muy altas temperaturas, del orden de 20,000 °C.

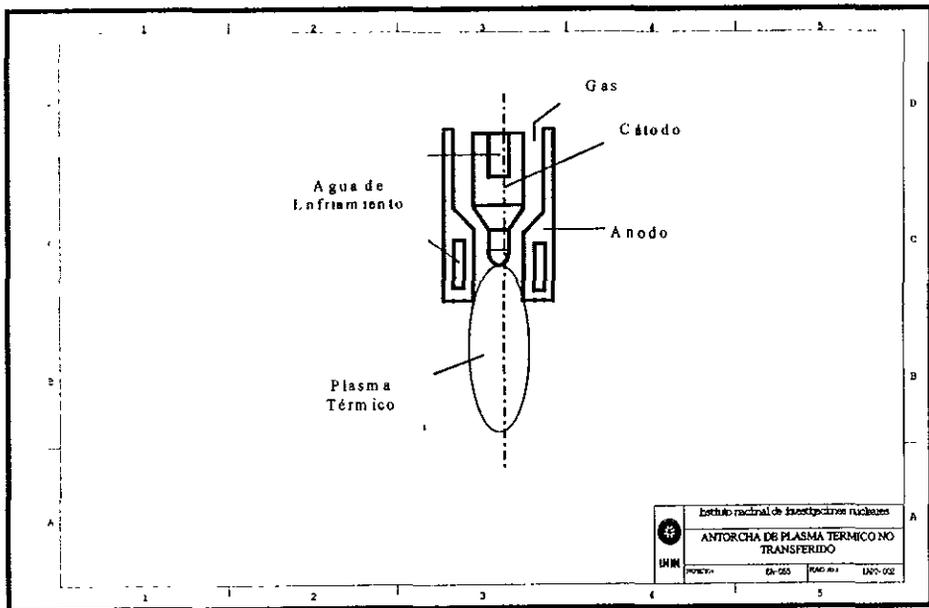


Fig. 1.4. Antorcha de Plasma Térmico No Transferido

Las antorchas con un cátodo de tungsteno toriado y un ánodo de cobre anular (Figura 1.4) son típicamente usadas en un nivel de potencia abajo de 100 kW. La razón de flujo total de gas está generalmente abajo de 100 l/min (a condiciones normales de temperatura y presión). Los gases más comúnmente usados son el Ar, He, N₂, H₂, y sus mezclas. No se usan gases oxidantes, puesto que pueden dañar el cátodo de tungsteno.

En la periferia del jet de plasma se tienen gradientes de temperatura y velocidad longitudinal en la dirección radial relativamente altos⁵, los cuales pueden alcanzar hasta 2,000-3,000 °K/mm y 30-80 m/s/mm, respectivamente.

1.3.2. Antorchas Transferidas por dc.

Son diseñadas para transferir energía térmica en forma directa desde el cátodo, que conforma la antorcha, hacia el ánodo, representado por el material a tratar (Figura 1.5). Los arcos transferidos se caracterizan por una separación física relativamente grande entre el cátodo y el ánodo que puede estar en el intervalo de unos pocos centímetros, hasta aproximadamente 1 metro de longitud en los hornos industriales de alto poder, lo cual permite incrementar el voltaje de operación y consecuentemente el poder del plasma para la misma corriente del arco. Esta separación es un parámetro clave durante la operación, ya que tiene una fuerte influencia sobre la eficiencia de la energía del arco y la vida del electrodo. El electrodo que actúa como cátodo está hecho de tungsteno toriado, con el fin de evitar la oxidación y alrededor de él, el gas plasmágeno (argón o nitrógeno) es inyectado para protegerlo del ambiente de los alrededores. Además, el flujo del gas junto con el campo eléctrico, contribuye a caracterizar la columna del arco, ya que con una variación de estos dos parámetros modifica la densidad de corriente y consecuentemente la temperatura máxima del plasma, la cual puede alcanzar valores tan altos como 20,000°K.

⁵ Boulos I. Thermal Plasma Processing. IEEE Transactions on Plasma Science. Vol.19 No. 6 1991. Pag 1078-1089.

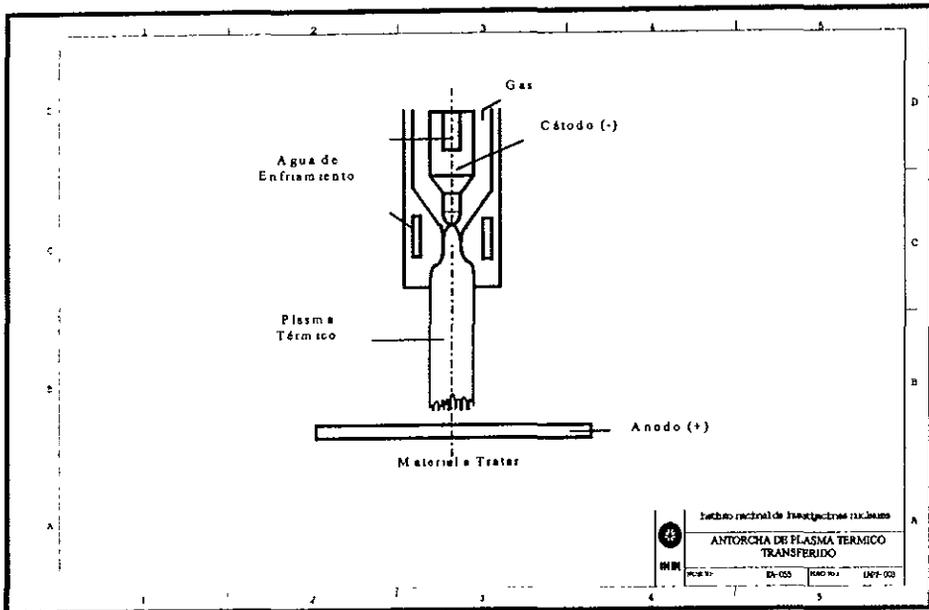


Fig. 1.5. Antorcha de Plasma Térmico Transferido.

1.3.3. Descargas Acopladas Inductivamente.

En antorchas de plasma de inducción, la energía que acompaña al plasma es producida a través del campo electromagnético de la espiral de inducción (ver Figura 1.6); sin embargo, es necesario ionizar el gas inicialmente por medio de una descarga de dc. En este tipo de plasma el gas plasmágeno no está en contacto con los electrodos, de esta manera se eliminan posibles fuentes de contaminación y permite la operación de la antorcha de plasma con un amplio rango de gases, incluyendo inertes, reductores, oxidantes, y otras atmósferas corrosivas. El argón puro ó sus mezclas con otros gases son los que se seleccionan usualmente como gas plasmágeno debido a su facilidad de ionización. Las unidades de laboratorio están en niveles de potencia en el orden de 30 - 50 kW.

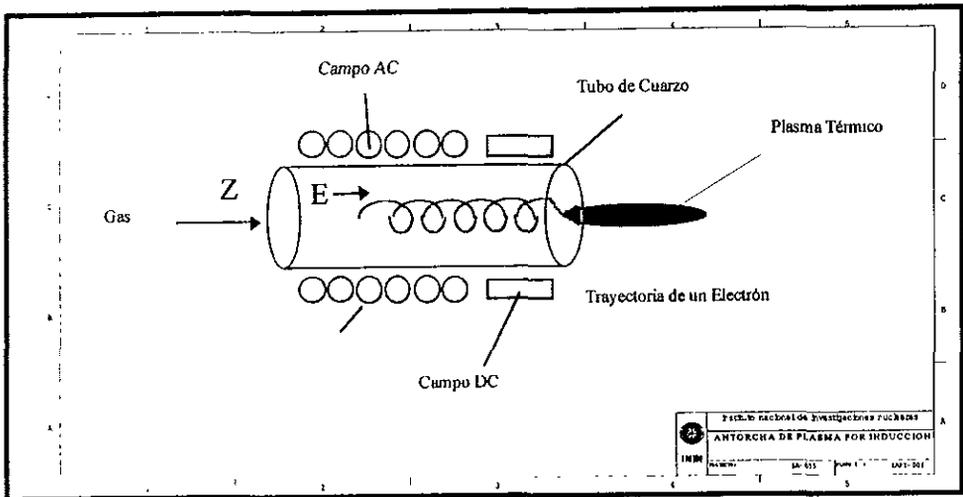


Fig. 1.6 Antorcha de Plasma por Inducción.

1.3.4. Antorchas de Plasma Híbridas.

Como su nombre lo indica, las antorchas de plasma híbridas consisten en la superposición de más de un mecanismo de generación de plasma, tal como la combinación de antorchas de dc y acopladas inductivamente, o bien, la combinación de dos antorchas inductivas operando a dos diferentes frecuencias. Ciertos sistemas híbridos son más flexibles y ofrecen numerosas ventajas en el procesamiento de materiales.

1.4. APLICACIONES INDUSTRIALES DEL PLASMA TÉRMICO⁶.

Debido a la alta concentración de energía, el plasma térmico se utiliza en procesos industriales que requieran una gran cantidad de calor. Por ejemplo, se utiliza en la soldadura de metales,

⁶ Laroche G. Les Plasmas dans L'Industrie. Electricité de France. 1991

aleaciones, y deposición ó revestimientos de materiales por proyección de polvos; durante el revestimiento los polvos son inyectados en el jet de plasma, por medio de un nebulizador a ultrasonido y, una vez en el plasma, las partículas son fundidas y aceleradas hacia el sustrato donde, al chocar transfieren su energía cinética y térmica y solidifican rápidamente, formándose una capa cuyo espesor se puede controlar. La naturaleza de consolidación y solidificación de las partículas permiten controlar parcialmente la microestructura del depósito y la composición. Esta técnica es capaz de depositar cualquier material que sea fundible (metal, aleación, cerámica, vidrio) sobre cualquier tipo de sustrato (metal, grafito, cerámica, madera), con un espesor ajustable de varias micras hasta varios milímetros (Figura 1.7).

Los calentadores de gas es otra de las aplicaciones del plasma térmico, allí, se utiliza la antorcha para aumentar la temperatura del gas reciclado de los altos hornos y para complementar la energía requerida; con lo cual se reduce el consumo de carbón e incrementa la capacidad de producción del horno.

Entre los procesos más sobresalientes se encuentran la síntesis química de materiales tal como pigmentos de TiO_2 , sílica sintética de alta pureza, y polvos cerámicos ultrafinos de alta pureza. En cada uno de estos casos se aprovecha la capacidad del plasma para calentar los reactantes a temperaturas relativamente altas, bajo condiciones que permiten controlar la composición química de las mezclas de reacción independientemente de su nivel de energía.

En el caso del tratamiento de residuos peligrosos (RP)⁷, el plasma es usado como una fuente de calor de altas temperaturas, las cuales se utilizan para el "rompimiento" de los enlaces de las moléculas de los compuestos que forman el RP, dando como resultado una mezcla de partículas que al enfriarse se recombinan para formar gases, principalmente aquellos considerados como permanentes (CO_2 , O_2 , H_2O , Ar, etc.) y sólidos estériles, provenientes de las partículas metálicas presentes. El rendimiento térmico de este proceso está estimado entre

7 Bonizzoni G. 1993. Plasma Arc Technology for Toxic Waste Treatment and Metal Production. Ist. Di Fisica del Plasma. CNR.

un 50 y 90% y puede adaptarse a varios tipos de residuos cumpliendo con las normas de calidad ambiental⁸.

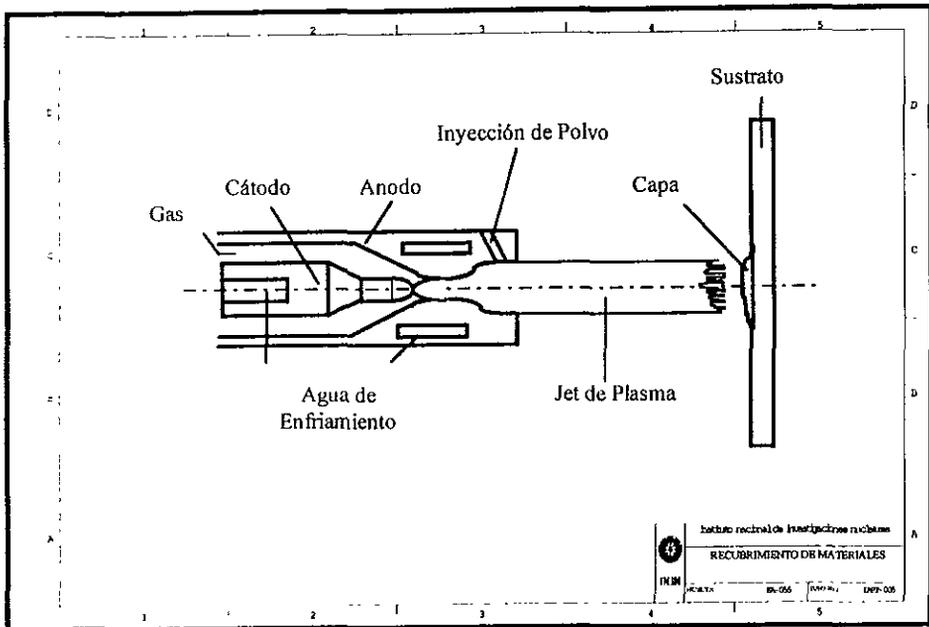


Fig. 1.7. Recubrimiento de Materiales por Plasma Térmico.

Una planta típica de degradación de residuos peligrosos por plasma térmico se muestra en la Figura 1.8; entre los componentes principales se encuentran el cañón de plasma, el generador de potencia y el reactor de degradación de residuos.

⁸ Norma Oficial Mexicana. NOM-CPR-001-ECOL/1993.

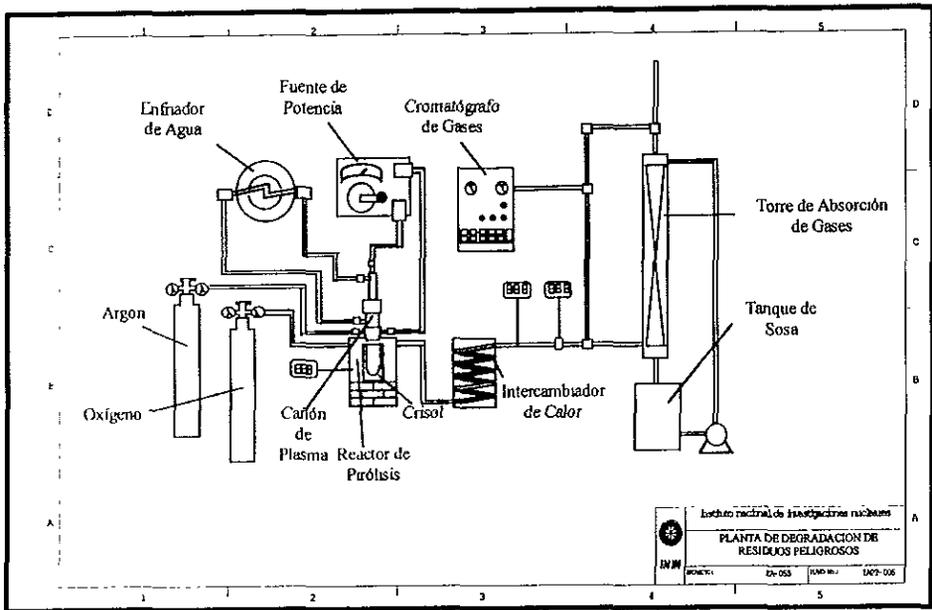


Fig. 1.8. Diagrama de una Planta de Degradación de Residuos Peligrosos.

Cabe señalar que debido a que el tratamiento de residuos peligrosos es el tema central de este trabajo, la descripción completa del método y el equipo de degradación que se utilizó, se mencionará a detalle en el capítulo 3.

CAPITULO 2

CONCEPTOS BASICOS DE RESIDUOS.

Los residuos peligrosos⁹ son aquellos con propiedades corrosivas, reactivas, explosivas, tóxicas, inflamables o biológica-infecciosas (CRETIB) y usualmente se encuentran como subproductos de procesos productivos.

El riesgo para el ambiente y la salud humana que resulta de la generación y manejo de los residuos peligrosos hace indispensable el desarrollo de buenos procesos de reducción, tratamiento y disposición final.

En esta parte del trabajo se hace una descripción de la situación actual de los residuos en México, con el fin de mostrar un panorama general de los tipos de residuos peligrosos y ubicar aquellos sobre los que se realizaron los experimentos.

2.1. GENERACIÓN DE RESIDUOS PELIGROSOS.

En el país se generan¹⁰ diariamente 525,000 toneladas de residuos de los cuales 465,000 son residuos industriales y 60,000 son considerados como municipales (ver Figura 2.1).

De las 525,885 toneladas de residuos generadas, 67,830 son consideradas como residuos peligrosos, de las cuales 13,325 toneladas de residuos industriales y 24,014 toneladas de residuos municipales no son dispuestas adecuadamente. Es decir, de la cantidad total de residuos generados en el país, el 11% son considerados peligrosos y sólo el 4% son dispuestos adecuadamente. Se considera que, la infraestructura instalada para el tratamiento de estos residuos se ha clasificado como:

- a) Plantas de reciclaje de solventes.
- b) Plantas de reciclaje de baterías para la recuperación de plomo.

9 Norma Oficial Mexicana. NOM-CPR-001_ECOL/1993.

10 Bustani A. Curso - Taller, Manejo y Disposición de Residuos Peligrosos. UNAM. 1994

- c) Planta para la recuperación de zinc.
- d) Planta para la recuperación de aceites lubricantes.
- e) Plantas para la recuperación de chatarra de aluminio.
- f) Planta para la recuperación de níquel.
- g) Plantas incineradoras, dos de las cuales son privadas.
- h) Confinamientos controlados públicos para la disposición de residuos peligrosos.
- i) Confinamientos controlados privados para la disposición de residuos no peligrosos.

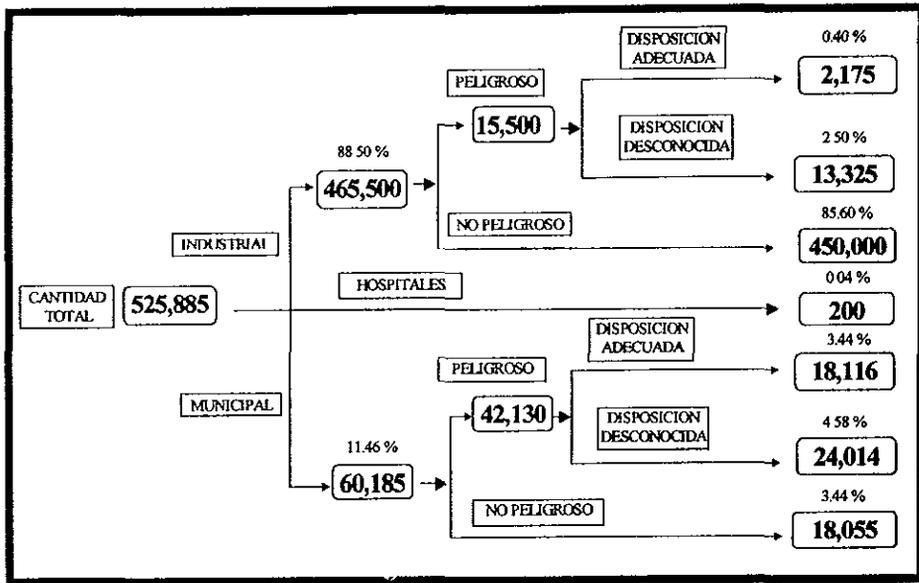


Fig. 2.1. Cantidad de Residuos Generados en el País (Ton/Día).

Cabe señalar, que las plantas incineradoras existentes son a base de combustión, presentando una serie de inconvenientes, dentro de los cuales podemos citar los siguientes:

- a) Bajo Rendimiento; solamente de 5 al 20% de la energía total aplicada se aprovecha como energía útil.
- b) Proceso Lento; la inercia de los incineradores por combustión es muy grande, ya que en este proceso las temperaturas difícilmente exceden los 1,200 °C. En estas condiciones los coeficientes de transferencia térmica son reducidos y, consecuentemente las reacciones de combustión son lentas.
- c) Degradación Parcial de Residuos; la distribución de la temperatura en los incineradores es heterogénea y en estas condiciones las reacciones de combustión no llegan a consumirse, dando como resultado que la combustión sea un proceso contaminante que genera humos y cenizas en suspensión, que afectan atmósfera y suelos.

En este escenario se encuentra inmersa la industria eléctrica, la cual tiene un grave problema con el almacenamiento de aceites dieléctricos gastados, los cuales tienen un alto contenido de Askareles (bifenilos policlorados PCB), que son compuestos altamente cancerígenos y debido a que tienen una estabilidad térmica muy alta, no es posible degradar dichos compuestos con los métodos convencionales de incineración, ya que sus productos de combustión son dioxinas y furanos, los cuales son aún más peligrosos que sus precursores.

Tanto Comisión Federal de Electricidad (CFE), como Petróleos Mexicanos (PEMEX) han mostrado un alto interés en la eficiencia de degradación de este tipo de residuos, ya que tienen grandes cantidades de ellos almacenados, esperando por un método adecuado de tratamiento. Por lo tanto, se consideró interesante enfocar los experimentos de degradación en este trabajo, al estudio del tratamiento de aceites dieléctricos conteniendo PCB's mediante plasma térmico.

2.2. RESIDUOS ORGANO-HALOGENADOS.

Dentro de esta categoría de residuos peligrosos se encuentran compuestos químicos usados en procesos industriales como son solventes de pinturas, agentes limpiadores, así como

compuestos usados en aceites dieléctricos como los bifenil policlorados (PCB's), productos usados en agricultura, y últimamente aquellos que tienen un impacto directo al ambiente como son los clorofluorocarbonos (CFC's) que afectan la capa superior de ozono.

Entre los residuos orgánicos halogenados más difíciles de degradar, por a su alta estabilidad térmica, y considerados mas cancerígenos, se encuentran los PCB's, razón por la cual los experimentos realizados en este trabajo se enfocaron a demostrar la degradación de estos compuestos por medio del plasma térmico.

2.2.1. Características de los Bifenil Poli Clorados (PCB's)¹¹.

Este material es también llamado Aroclor y/o Askarel (Askar que significa que no se quema); son utilizados principalmente como aislante eléctrico, como medio de transferencia de calor, fluidos hidráulicos, lubricante y plastificantes. Su fórmula química es $C_{12}H_6Cl_4$, pudiendo variar el número de átomos de cloro presente en la molécula. En la Figura 2.2 se puede observar la estructura de una molécula de PCB con cuatro cloros.

2.2.2. Riesgos a la Salud.

Dentro de los riesgos a la salud de estos compuestos se encuentran los siguientes:

- a) Valor Límite de Umbral (TLV/TWA): 0.5 mg/m³ (54 % cloro); 1.0 mg/m³ (42 % cloro).
- b) Límite Permissible de Exposición (PEL): 0.5 mg/m³ (54 % cloro); 1.0 mg/m³ (42 % cloro).
- c) Toxicidad de los Componentes: Dosis, LD50 (oral para ratas) 1320 mg/kg. Se ha encontrado que a mayor contenido de cloro en el PCB, son más difíciles de degradar y son más tóxicos, además de que se van bioacumulando en el tejido graso.
- d) Carcinogenicidad. Evidencia limitada en humanos, pero suficiente en animales de

¹¹ Domínguez A. E. Datos de Seguridad de Clorodifenilos. Informe Técnico CA-95-02. 1995.

laboratorio.

- e) Efectos Reproductivos. Pruebas en gallinas de laboratorio demostraron una disminución en la capacidad de empollar y efectos teratogénicos en los embriones.

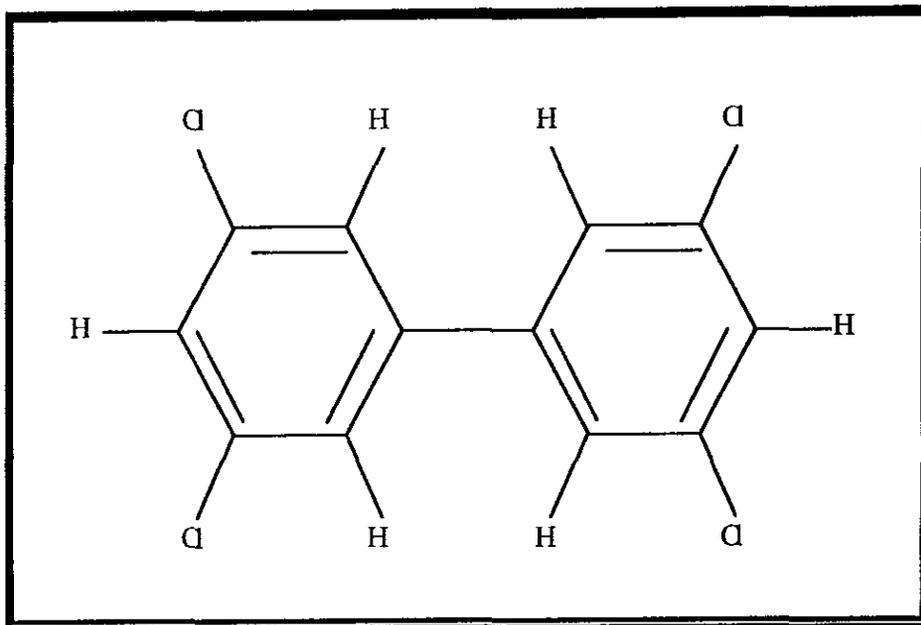


Fig. 2.2. Molécula de PCB.

2.2.3. Reactividad.

Los PCB's presentan las siguientes características reactivas:

- a) Estabilidad: se consideran químicamente inertes, es decir, estables.

- b) Polimerización: No ocurre.
- c) Productos de su descomposición térmica (combustión): Policlorodibenzofuranos y policlorodibenzodioxinas. Por lo tanto, se debe evitar las condiciones de flama, calor u otras fuentes de ignición.

2.2.4. Propiedades Físicas.

En la Tabla 2.1 se presenta un resumen de algunas propiedades físicas para PCB's con cuatro átomos de cloro en la molécula.

Tabla 2.1. Propiedades Físicas de PCB's Tetraclorados.

	Aroclor 1232	Aroclor 1242	Aroclor 1248	Aroclor 1254	Aroclor 1260
Estado Físico	Líquido	Líquido	Líquido	Líquido Viscoso	Resina
Densidad (g/cm ³)	1.24	1.35	1.41	1.5	1.58
Peso Específico a 15.5 °C		1.41			1.41
Punto de Ebullición (°C)		340-375		365-390	385-420
Punto de Inflamación (°C)		176-180		195	
Presión de Vapor (mm Hg a 225 °C)		55			50
Presión de Vapor (Pa a 20 °C)	0.54	0.05-0.13	0.0085-0.11	0.008-0.02	0.0002-0.012
Solubilidad (Agua, Glicerina y Glicoles)	Insoluble	Insoluble	Insoluble	Insoluble	Insoluble
Solubilidad en Solventes Orgánicos	Soluble	Soluble	Soluble	Soluble	Soluble
Aroclor = Nombre Comercial					

2.2.5. Compuestos Modelo a Degradar en Lugar de PCB.

Debido a la toxicidad de los PCB's, se realizaron las pruebas de degradación utilizando diferentes compuestos modelo que representan algunas de las propiedades de los PCB's. Los compuestos tratados fueron los siguientes:

- a) *Tetracloruro de Carbono* (CCl_4); la similitud consiste en que presenta una alta estabilidad térmica y esta saturado de cloro.
- b) *Benceno* (C_6H_6). Es de la familia de hidrocarburos aromáticos, al igual que el PCB, por lo que presenta una resonancia similar por anillo aromático.
- c) *Tetracloroetileno* (C_2Cl_4): Presenta una doble ligadura la cual simula la doble ligadura en la resonancia del anillo aromático del PCB, además de que está saturado en cloro.
- d) *Aceite Lubricante*. Simula la composición del aceite dieléctrico en el cual está contenido el PCB, con lo cual se demuestra que la eficiencia del plasma térmico para degradar todo tipo de aceites.

Con los compuestos mencionados anteriormente, se pudo demostrar paso a paso la degradación de los aceites conteniendo PCB, ya que primero, para no arriesgar la salud de las personas involucradas en los experimentos por alguna falla del equipo, se degradaron compuestos que poseían características similares a los PCB's (Compuestos Modelo) y una vez que se comprobó que se tenía una alta eficiencia de degradación en estos compuestos se realizaron los experimentos con aceite lubricante.

Los parámetros de operación del equipo de degradación para cada una de las corridas, así como resultados experimentales de la degradación de los diferentes compuestos, se muestran en el capítulo 5.

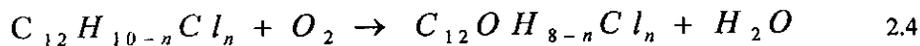
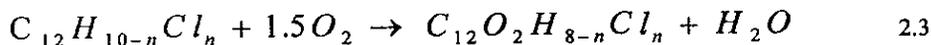
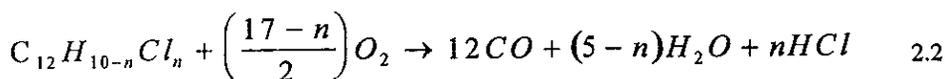
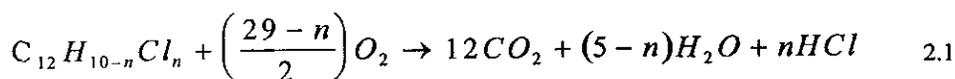
2.3. MECANISMOS DE DEGRADACION DE PCB's.

Durante la degradación térmica de PCB's se pueden identificar dos procesos: a baja temperatura (400 a 850 °C), como es el proceso de combustión y de alta temperatura (3,000 a 20,000 °C), como es el proceso de degradación por medio de plasma térmico.

2.3.1. Proceso de Degradación Térmica de PCB's a Baja Temperatura.

La temperatura máxima que se puede alcanzar en una flama de combustión es de 2,500 °C en el núcleo, sin embargo los hornos de incineración a base de flama por combustión presentan grandes gradientes de temperatura, llegando a tener zonas desde 200 °C hasta 800 °C. En estas condiciones, los productos de la combustión de PCB's genera principalmente polidibenzodioxinas y polidibenzofuranos, los cuales presentan características toxicológicas, consideradas más graves que aquellas provocadas por el mismo PCB.

Las principales reacciones que se presentan durante la combustión de PCB's a temperaturas menores de 1200 °C son las siguientes:



En donde las ecuaciones 2.3 y 2.4 representan la formación de dioxinas y furanos, cuyas estructuras se muestran en las Figuras 2.3 y 2.4, respectivamente.

Por otro lado, la eficiencia de la degradación durante la combustión de los PCB's a temperaturas entre 850 y 1200 °C es de un 95 % aproximadamente, sin embargo, este porcentaje tiende a disminuir a medida que la temperatura disminuye, lo cual indica que la formación de dioxinas y furanos aumenta.

2.3.2. Proceso de Degradación Térmica de PCB's a Alta Temperatura.

La disposición de los PCB's es un problema que tiende a empeorar, ya que se estima que en los próximos 15 años se acumularán 180,000 ton en Europa, mientras que se producirán otras 500,000 ton de transformadores y capacitores conteniendo PCB's.

El plasma térmico es un proceso en el cual se logran temperaturas altas del orden de 20,000 °C y bajo estas condiciones se puede atomizar cientos de tipos de moléculas complejas y peligrosas, para transformarlas en compuestos simples como nitrógeno, hidrógeno, monóxido de carbono, dióxido de carbono, ácido clorhídrico, los cuales pueden tener aún un precio de mercado.

Dentro de las moléculas complejas y peligrosas que se pueden degradar con la alta temperatura que se genera en el plasma, se encuentran los bifenilpoliclorados.

Los principales compuestos generados¹² durante la degradación de PCB's por plasma térmico se muestran en la Tabla 2.2.

12 Kostic Z.G. et al. Thermodynamic Consideration of Polychlorinated Biphenyls Decomposition in Thermal Plasma. 3rd. European Congress on Thermal Plasma Processes. 1994. No. 1166. 1995. Pag.643-650.

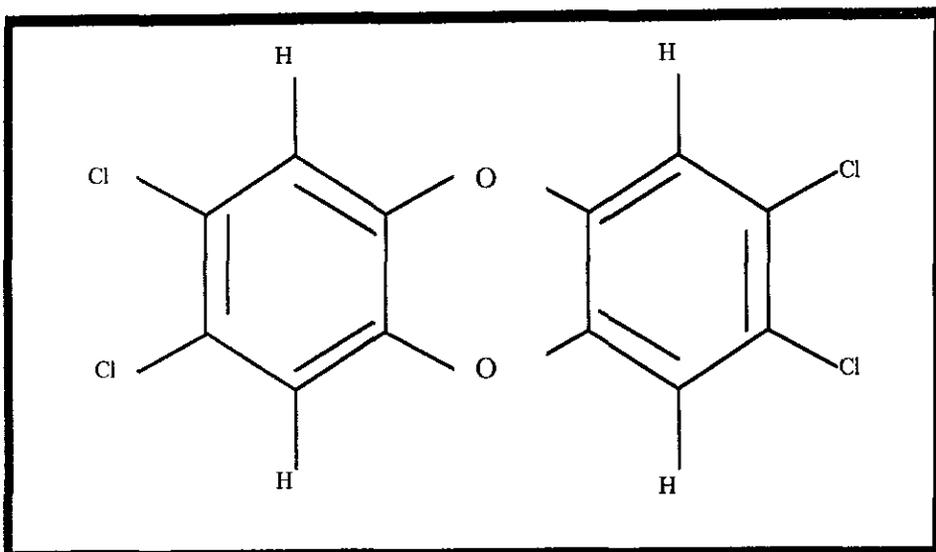


Fig. 2.3. Molécula de Cloro Dibenzo Dioxina.

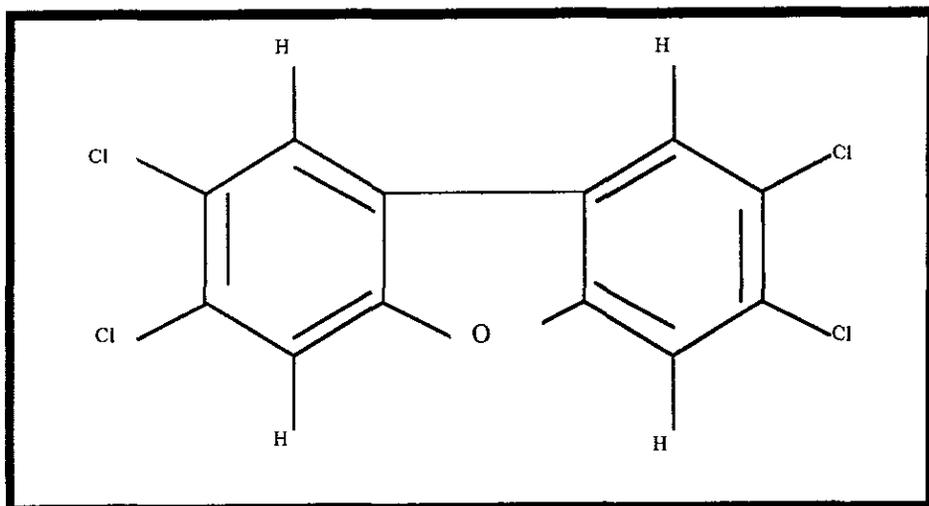


Fig. 2.4. Molécula de Cloro Dibenzo Furano.

Tabla 2.2. Principales Productos de la Degradación de PCB's.

COMPUESTO PRODUCIDO	CONCENTRACION Fracción mol	JUSTIFICACION
HCl, Cl, Cl ₂	1.0 X 10 ⁻²	Formado debido a la considerable cantidad de cloro presente en la molécula de PCB.
CO, CO ₂ , H, H ₂	1.0 X 10 ⁻¹	Formado debido a la considerable cantidad de carbono e hidrógeno presente en la molécula de PCB.
Cl ₂ CO	1.5 X 10 ⁻¹¹	Fósgeno, formado debido a una mala degradación de la molécula de PCB.
CCl, CCl ₂ , C ₂ Cl	1.0 X 10 ⁻¹⁰	Compuestos clorocarbónicos, formados debido a una mala degradación de la molécula de PCB.
HCICO, CHCl, CH ₂ Cl, C ₂ HCl, CH ₃ Cl	1.5 X 10 ⁻¹⁰	Otras especies organocloradas, formadas debido a una mala degradación de la molécula de PCB.

Como se ve en la Tabla 2.2, los principales compuestos de la degradación de PCB's por plasma, son compuestos de masa atómica pequeña, lo cual indica una completa atomización de la molécula de PCB.

En capítulos posteriores se mostrará la eficiencia del proceso de plasma para degradar diferentes compuestos químicos, así como aceites lubricantes, los cuales fueron usados con el fin de representar la degradación de los PCB's.

CAPITULO 3

DISEÑO CONCEPTUAL DEL EQUIPO EXPERIMENTAL

En el Laboratorio de Aplicaciones de Plasma Térmico (LAPT) del Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares se cuenta con un sistema para la caracterización térmica y eléctrica de las antorchas de plasma térmico, algunas de las cuales se han diseñado y construido en este laboratorio; así como también con un equipo experimental de degradación de residuos peligrosos por plasma térmico, con una potencia de 0-10 kW, en el cual se llevan a cabo los estudios de degradación de residuos.

En este capítulo se describen brevemente el sistema de caracterización de antorchas de plasma y el equipo de degradación de residuos peligrosos.

3.1. SISTEMA PARA LA CARACTERIZACION TERMICA Y ELECTRICA DE ANTORCHAS DE PLASMA TERMICO.

El sistema de caracterización térmica y eléctrica de antorchas de plasma térmico que se usó en este trabajo, fue diseñado y construido con el objeto de determinar el comportamiento eléctrico y térmico de las antorchas de plasma que se diseñan y construyen en el LAPT. Su función es monitorear; los parámetros de potencia eléctrica, como son la corriente y el voltaje; los parámetros del gas plasmágeno, como son el gasto, la presión y la composición en el caso de mezclas; y los parámetros de calor removido en el agua del enfriamiento del cátodo y ánodo, como son la temperatura de entrada y salida de cada uno de ellos. En la Figura 3.1 se muestra un diagrama del sistema en su conjunto, el cual está formado por los equipos que se describen brevemente enseguida:

3.1.1. Líneas de Alimentación de Gases Plasmágenos.

En cada una de las líneas de alimentación de gas se tienen cilindros de gases comprimidos (Ar, N₂, H₂) de 6 m³ de capacidad; regulador de presión de dos pasos, con presión de entrada

de 0 - 3000 psig y presión de salida de 0 - 100 psig; válvula de aguja Withey mod. MIR56 para controlar el gasto de gas; transductor de caudal, con indicador analógico Teledyne Hasting-Raydist modelo All-50K, con intervalo de 0 - 50,000 sccm; y válvula check Nupro de 1 psig.

3.1.2. Mezclador de Gas Plasmágeno.

Consta de entrada tangencial de los gases plasmágenos individuales; dos platos de mezclado, con orificios de borboteo de 1/8 plg.; y válvula check de 1 psig a la salida (ver Figura 3.2). La entrada tangencial de los gases es con el objeto de producir turbulencia para favorecer el mezclado.

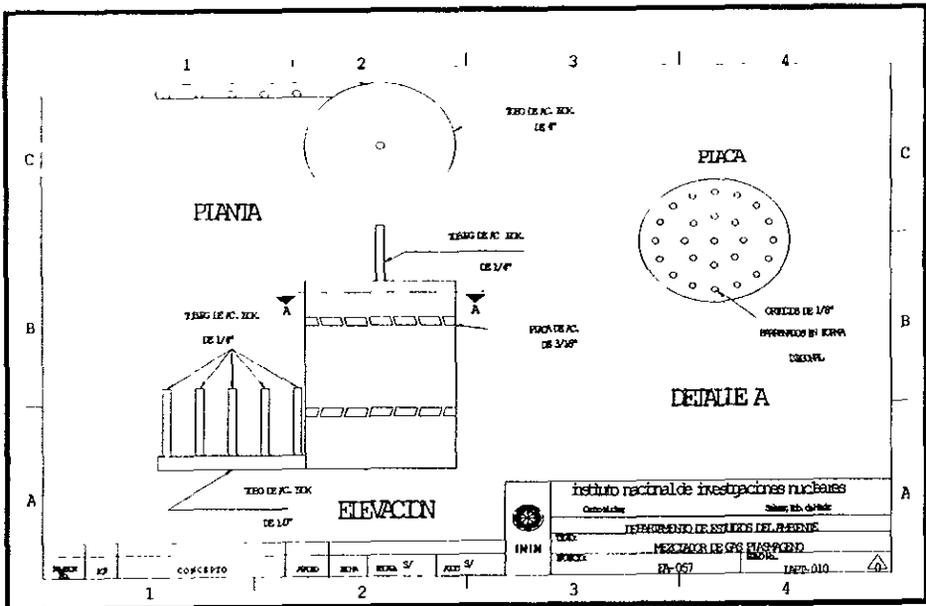


Fig. 3.2. Mezclador de Gas Plasmágeno.

Una imagen fotográfica de la instalación y distribución del sistema para el mezclado de gases plasmágenos, la cual incluye las líneas de alimentación de gas, con todos sus accesorios, así como el mezclador de gases conectado, se muestra en la Figura A.1 del Anexo 1.

3.1.3. Línea de Alimentación de Mezcla de Gas Plasmágeno a la Antorcha.

Esta línea consta de una válvula reguladora de presión de un paso (Linde mod. SG3831-150), con una presión de salida de 0 - 100 psig; válvula de aguja (Nupro mod. M-4BG) para controlar el gasto de gas plasmágeno; transductor de caudal con indicador digital (Teledyne Hasting-Raydist modelo All-50KP), con rango de 0 - 50,000 sccm; y válvula check (Nupro de 1 psig).

3.1.4. Indicadores de Temperatura de Agua de Enfriamiento.

Consta de cuatro termistores de temperatura tipo LM335 instalados en las entradas y salidas de agua de enfriamiento del cátodo y el ánodo. Estos termistores están conectados a una tarjeta de adquisición de datos tipo PCL818 con el objeto de monitorear la temperatura por medio del programa de cómputo Genie. En esta misma tarjeta, también se monitorean los caudales de gas plasmágeno. La imagen de la pantalla de la computadora en la cual se monitorean los datos arriba mencionados, se muestra en la Figura A.2 del Anexo 1.

3.2. DESCRIPCION DEL EQUIPO PARA LA DEGRADACION DE RESIDUOS PELIGROSOS.

El equipo experimental¹³ está fabricado en acero inoxidable principalmente y está integrado por los siguientes componentes:

13 Cota G. et al. Equipo Experimental para Estudios de Degradación de Muestras de RP por Plasma Térmico. Informe Técnico CA-95-05. ININ. 1995.

- Generador de potencia.
- Cañón de plasma térmico.
- Cilindros de gases plasmágenos.
- Cilindro de aire oxidante u oxígeno.
- Mezclador de gases plasmágenos.
- Reactor de pirólisis.
- Intercambiador de calor.
- Equipo analizador de gases.
- Torre de absorción de gases.
- Contenedor de agua.
- Bomba de recirculación.

En la Figura 3.3 se muestra el diagrama de flujo de dicho equipo, mientras en la Figura A.3 del Anexo 2 se muestra una fotografía, en la cual se pueden identificar principalmente, el reactor de pirólisis, la antorcha de plasma térmico, el intercambiador de calor y la torre de absorción de gases.

3.2.1. Generador de Potencia.

La fuente de potencia¹⁴ del cañón del plasma está constituida por un transformador de potencia regulable en el intervalo de 0 a 10 kW; el primario del transformador está controlado por un banco de rectificadores controlados de silicio (SCR's) trifásico y el disparo de estos es por medio de un control de fase, para regular el voltaje del secundario. En el secundario se cuenta con diodos de potencia (puente trifásico) para rectificar el voltaje de salida. Además, como es

¹⁴ Díaz Z. S. Fuente de Alimentación Controlada para la Generación de un Plasma. Tesis de Licenciatura., Ing. Electrónica. ITT 1996. Pag. 24, 27.

necesario controlar la corriente, se construyó y se adaptó una bobina en serie, con lo cual se obtuvo una mayor estabilidad del plasma. Y con el objeto de proteger la fuente de los transitorios que se generan al formar el arco eléctrico, se adaptaron filtros de alta frecuencia antes y después de la bobina.

Cabe señalar que la fuente opera en modo manual o automático; mediante un interruptor de selección, se elige la opción deseada. En ambos casos, la corriente se controla variando el ángulo de disparo de los tiristores. En modo manual, la corriente se controla por medio de un circuito que funciona como un control de ancho pulso, mientras en forma automática el control de la corriente se realiza por medio de un microcontrolador (MC68HC11) que fue programado en lenguaje de ensamblador, y cuya función es hacer que la variación del ángulo de disparo sea automática, para mantener la corriente constante.

También se tiene un circuito electrónico¹⁵ como una alternativa para los ignitores de chispa o "spark gap" gaseosos utilizados para generar descargas eléctricas. Con este dispositivo se logra pre-ionizar el medio gaseoso presente entre dos electrodos, mediante la aplicación de un convertidor resonante en serie, permitiendo así la entrada automática de la fuente de sostenimiento para la formación del plasma térmico. El dispositivo presenta un sistema de autoprotección y permite el restablecimiento del plasma, en caso de que se produzca una interrupción.

3.2.2. Cañón de Plasma Térmico.

El cañón de plasma térmico utilizado fue diseñado y construido usando la geometría más común¹⁶, la cual consiste básicamente de dos cilindros concéntricos, como se muestra en la Figura 3.4.

¹⁵ Peña E. L. Convertidor Resonante de Medio Punte para la Ignición de Plasmas Térmicos. Tesis de Licenciatura. Ing. Electrónica. ITT. 1997.

¹⁶ Olof J.E. et al. Plasma Technology in Metallurgical Processing. 1988. Pag 78-87.

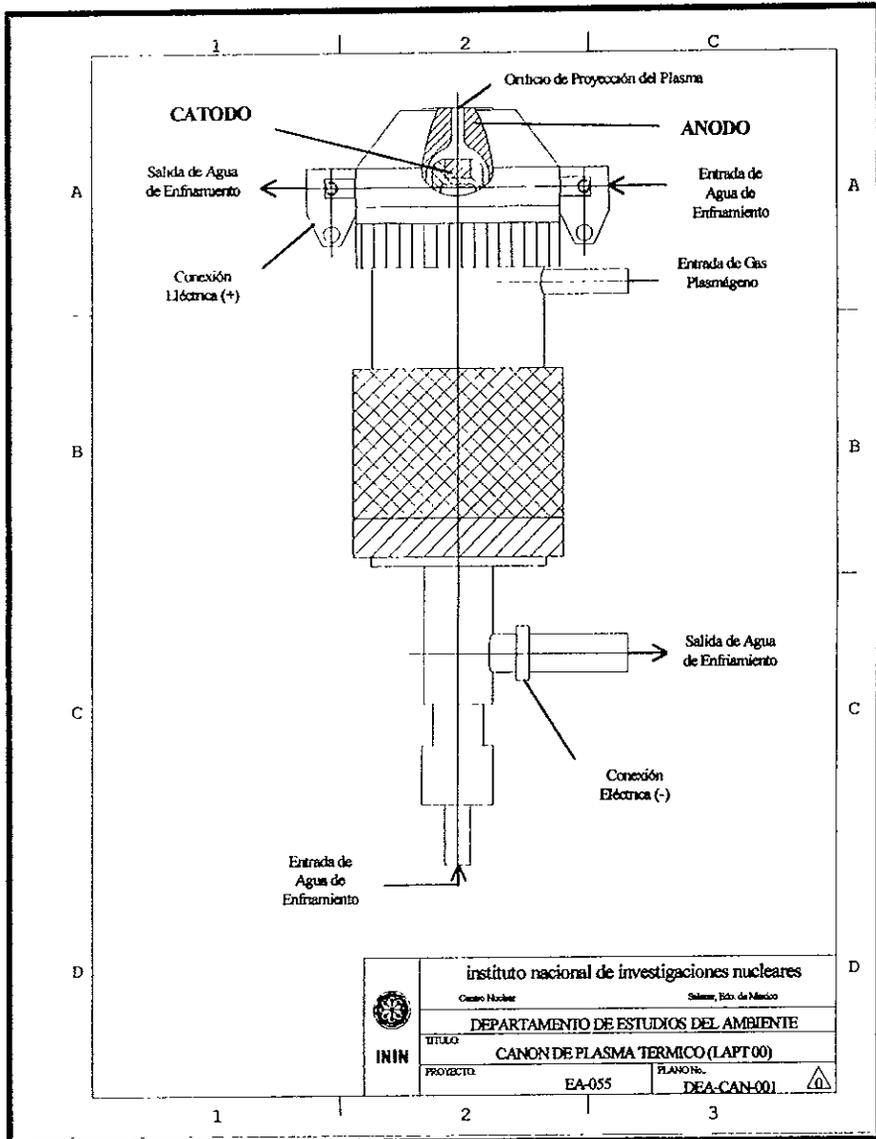


Figura 3.4. Diseño del Cañón de Plasma Térmico.

El cátodo es el cilindro interno, está fabricado de cobre electrolítico con un cilindro de tungsteno incrustado en la punta, para poder manejar grandes densidades de corriente por unidad de área; además, este arreglo tiene una vida útil larga. El ánodo es el cilindro externo y también está fabricado de cobre electrolítico; es la parte que se observa como el cañón del plasma. El diseño se realizó considerando la necesidad de enfriar el cañón, por lo que cuenta con dos sistemas de enfriamiento, uno de ellos enfría el cátodo y el otro el ánodo. Además se utilizó nylon como material aislante tanto en el mango como en la cubierta del cátodo.

Para generar el plasma térmico, el gas plasmágeno se introduce a través del ánulo formado entre el ánodo y el cátodo, y con el objeto de establecer el rompimiento y generar la ionización, se establece una diferencia de potencial entre ellos, formándose el jet de plasma y proyectándose en forma de dardo, a través de un pequeño orificio de 5 mm, el cual está presente en la punta del ánodo.

Dos imágenes fotográficas del cañón de plasma, son mostradas en la Figuras A.4 y A.5 de los Anexos 2 y 3.

3.2.3. Reactor de Pirólisis.

El reactor de pirólisis es básicamente la cámara en la cual se lleva a cabo la degradación, ya que es aquí en donde tiene lugar la atomización de los residuos, por medio de la acción del plasma; así como de la recombinación de las especies atomizadas.

El proceso de pirólisis consiste inicialmente, en la atomización de los residuos, debido a las altas temperaturas a las que son sometidos al pasar a través del jet de plasma; posteriormente, se forman gases conteniendo átomos libres, los cuales estaban presentes en las moléculas del residuo original. Durante el proceso, se adiciona oxígeno al reactor con el fin de favorecer la

recombinación de átomos libres, la cual se lleva a cabo finalmente, debido al enfriamiento brusco de los gases.

El reactor de pirólisis está fabricado de acero inoxidable con una altura de 34.8 cm y un diámetro de 22.8 cm. Cuenta con sistema de enfriamiento tanto en la pared, como en la tapa del mismo. En la tapa se encuentra un orificio para la entrada del cañón de plasma, ambos se unen por medio de un sello que sirve de aislamiento eléctrico y que está fabricado con acero inoxidable y celoron; también cuenta con un sistema de enfriamiento para evitar que se funda por el efecto de la temperatura; sobre él se coloca el cañón y se fija con un dispositivo que ejerce presión sobre el cañón. El cañón tiene una entrada de residuos que se encuentra en el ánodo. Una fotografía que muestra las partes esenciales del reactor es mostrada en la Figura A.6 del anexo.

Además, en el reactor se encuentra una entrada de aire u oxígeno que se utiliza para la recombinación de los gases obtenidos en la degradación, la salida de los gases residuales se encuentra ubicada en la tapa del reactor, la cual está conectada al intercambiador de calor. Allí mismo se encuentra un termopozo, el cual contiene un termopar de inconel tipo K con un indicador de temperatura que opera en un intervalo de 0°C a 1,500°C y sirve para censar la temperatura de los gases residuales a la salida del mismo.

3.2.4. Intercambiador de Calor.

El intercambiador de calor está ubicado después del reactor de pirólisis y su función es enfriar bruscamente los gases de pirólisis provenientes del reactor, con el fin de favorecer la recombinación de los átomos atomizados, con el oxígeno suministrado durante la degradación.

Para lograr el enfriamiento brusco, el intercambiador utiliza agua corriente, la cual es suministrada a una temperatura entre 3 y 10 °C, con un gasto de 6.42 lt/min.

Es un intercambiador del tipo de tubos concéntricos a contracorriente y está fabricado con tubos de acero inoxidable cédula 40; el tubo interior tiene un diámetro de 3/4 de plg, mientras el exterior tiene un diámetro de 3 plg.

Los gases residuales fluyen por el tubo interior, mientras el agua por el ánulo; para medir la temperatura de los gases residuales a la salida del intercambiador de calor, se tiene conectado un termopar tipo T con un indicador de temperatura que opera en un intervalo de 0°C a 200°C. La Imagen fotográfica de este componente se muestra en la Figura A.7 del anexo.

3.2.5. Torre de Absorción de Gases.

Debido a que algunos residuos presentan átomos de halógenos en sus estructuras moleculares, durante la degradación se pueden llegar a formar compuestos ácidos como HCl, H₂S, HF, etc., a los cuales no se les puede permitir la salida a la atmósfera.

Por lo tanto, el equipo cuenta con una torre de absorción para llevar a cabo la separación de esos gases ácidos principalmente; está fabricada de vidrio pyrex y cuenta con platos de acero inoxidable perforados como borboteadores. Tiene un diámetro interno de 5 cm y 8 platos separados una distancia de 10 cm uno de otro; la altura total de la torre es de 1.70 m y se operó con flujo a contracorriente

Cuenta también con una bomba de recirculación de fluido absorbente con un caudal de 1 a 10 l/min. El fluido absorbente que se utiliza puede ser agua o una solución de sosa a temperatura ambiente.

La salida de la torre de absorción esta conectada a un extractor centrifugo, el cual tiene como función, ayudar a evacuar los gases del equipo de degradación, así como de formar una presión

negativa en toda la tubería del equipo y, de esta forma, asegurar el flujo continuo de gases y evitar fugas de gases peligrosos del sistema. Una imagen de la torre de absorción en operación, es mostrada en la Figura A.8 del anexo.

3.2.6. Puntos de Muestreo.

Existen dos puntos de muestreo; uno a la salida del intercambiador de calor, con el fin de verificar si la etapa de atomización- recombinación es adecuada, y otro a la salida de la torre de absorción, para verificar que no existan gases ácidos a la salida del equipo de degradación.

Cada punto de muestreo está conectado en línea al sistema analizador de gases, el cual consiste en un espectrómetro de masas marca MKS, con sensor cuadrupolo para registro de 300 uma, modelo PPT 300 EM. Además, debido a que ocasionalmente se requiere analizar el gas residual en analizadores de otros laboratorios, en los puntos de muestreo, también se tiene colocadas unas balas para gases, con el objetivo de tomar muestras y poder transportarlas. El proceso de toma de muestra en las balas, consiste en purgarlas con helio, calentándolas a 120 °C durante una hora; posteriormente se les hace vacío por medio de una bomba de vacío mecánica; después, se conectan en cada punto de muestreo y finalmente se toma la muestra por diferencia de presión.

3.2.7. Equipo Analizador de Gases Residuales.

Una parte integral del equipo de degradación de residuos, es el sistema para analizar los gases residuales producidos durante el proceso; para esto, el equipo cuenta con un sistema analizador de gases residuales conectado en línea, el cual consiste en un espectrómetro de masas marca MKS, con sensor cuadrupolo PPT RESIDUAL GAS ANALYZER para registro de 300 uma,

modelo PPT 300 EM. Una imagen de este equipo es mostrada en la Figura A.9 del anexo, mientras una más de un espectro de masas típico es mostrada en la Figura A.10.

También, ocasionalmente se analiza el gas residual en un espectrómetro de masas Leybold John, con sensor cuadrupolo Cuadrex 200 para registro de 200 uma, modelo 901-002-C2, el cual está instalado en el Laboratorio de Plasmas de Fusión.

Además, para el análisis de las muestras de sólido vitrificado o ceniza residual, el cual queda como remanente en el crisol del reactor, se utiliza un microscopio electrónico de barrido marca PHILIPS modelo XL 30, con funcionamiento al alto vacío, voltaje de aceleración de 30 kV, capacidad de ampliación de 400,000 X, un detector de electrones secundarios, uno de electrones retrodispersados y uno de rayos-X; que está instalado en el Laboratorio de Microscopía Electrónica.

Por último, es importante aclarar que ambos laboratorios pertenecen al Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares.

CAPITULO 4

CARACTERIZACION TERMICA Y
ELECTRICA DE LA ANTORCHA
DE PLASMA TERMICO.

La implementación de sistemas basados en plasma térmico en el medio industrial, implica conocer sus características de funcionamiento, así como el impacto sobre los procesos en los que se implantarán.

Desde un punto de vista industrial, entre las características más importantes del comportamiento de las antorchas de plasma, se encuentran aquellas que relacionan parámetros tales como: la potencia eléctrica suministrada a la antorcha; y los parámetros del gas plasmágeno, así como las relaciones de potencia eléctrica y eficiencia térmica.

Ya que se considera que la antorcha de plasma es la parte principal del equipo de degradación de residuos, en esta parte del trabajo se realizó un estudio sobre la caracterización eléctrica y térmica de la antorcha de plasma utilizada en los experimentos de degradación.

Las siguientes dos secciones versan sobre la búsqueda de correlaciones generalizadas de los parámetros eléctricos de funcionamiento de las antorchas de plasma térmico y del desarrollo de correlaciones en términos de parámetros energéticos.

4.1. DESARROLLO EXPERIMENTAL.

La caracterización de la antorcha de plasma se llevó a cabo a diferentes condiciones de potencia eléctrica y de alimentación de gas plasmágeno. Todas las pruebas realizadas a la antorcha fueron al aire libre, en el sistema para la caracterización de antorchas de plasma mostrado en la Figura 3.1.

El comportamiento del plasma está dado por las relaciones que existen entre los parámetros característicos de las antorchas, los cuales se pueden agrupar de la siguiente manera:

- a) Eléctricos: Voltaje (U) y corriente del arco (I).

- b) Geométricos: Diámetro del orificio de salida del ánodo (D) y distancia entre electrodos (S).
- c) Particulares del gas utilizado: Tipo de gas (Ar, He, N₂, etc.), caudal (Q), viscosidad (μ_0), conductividad térmica (k_0), conductividad eléctrica (σ_0), temperatura característica (T_0) y entalpía (H_0).

Estos parámetros pueden agruparse por medio de ecuaciones semiempíricas comúnmente usadas o por otras más complejas que implican números adimensionales.

4.1.1. Correlación Clásica de la Conducta Eléctrica.

La correlación clásica¹⁷ de los parámetros relacionados con la evolución de la potencia eléctrica de la antorcha del plasma está dada por la siguiente ecuación:

$$U = aI^\alpha Q^\beta \quad 4.1$$

donde:

U - Voltaje (V).

I - Corriente eléctrica (A).

Q - Caudal de gas plasmágeno (m³/h).

a, α , β - Constantes a determinar.

Los resultados experimentales permiten determinar los coeficientes a, α , β (por medio de regresión multilíneal, por ejemplo), para contar con una expresión que permita definir el comportamiento eléctrico del sistema.

4.1.2. Parámetros Adimensionales.

Debido a las limitaciones en cuanto al cálculo de la potencia que exhibe la correlación clásica de la conducta eléctrica, se utiliza otro método¹⁸ basado en números adimensionales, con los que se pueden correlacionar los datos obtenidos de manera experimental sobre el voltaje, la corriente, las características del de gas y los parámetros geométricos. Los parámetros característicos a utilizar, sus unidades y sus dimensiones se presentan en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1. Parámetros Usados en la Correlación con Números Adimensionales de la Conducta Eléctrica

PARAMETRO	NOTACION	UNIDADES	DIMENSIONES
Voltaje del Arco	U	volt	$m L^2 / Q t^2$
Corriente del Arco	I	A	Q / t
Gasto del Gas	G	g / s	m / t
Presión	P	g / m ²	m / L t ²
Diámetro del Orificio de Salida del Anodo	D	m	L
Sección de los Inyectores	S	m ²	L ²
Viscosidad del Gas a la temperatura T ₀	μ ₀	g / m s	m / L t
Conductividad Térmica del Gas a la Temperatura T ₀	k ₀	J / s m °K	m L / t ³ T
Conductividad Eléctrica del Gas a la Temperatura T ₀	σ ₀	l / ohm m	Q ² t / m L ³
Temperatura de Referencia (temperatura a la cual el gas presenta al menos el 1% de ionización)	T ₀	°K	T
Entalpia del Gas a la Temperatura T ₀	h ₀	J / g	L ² / t ²
Característica de Radiación	ε ₀	g / s ³ T ⁴	m / t ³ T ⁴

17 Kassabji F. et al. Comportement de Torches à Plasma Industrielles à Arc Soufflé avec Différents Types de Gaz. Journal of High Temperature Chemical Processes. No. 3. Vol. 1. 1992. Pag. 613-621.

18 Laroche G. Les Plasmas dans l'Industrie. Electricité de France. 1991. Pag. 490-508.

De acuerdo con el teorema de Buckingham¹⁹, se tienen 12 variables y 5 dimensiones, por lo que resultan 7 números adimensionales, los cuáles dan una expresión de la forma:

$$\pi_i = U^a I^b G^c P^d D^e S^f \mu_0^g k_0^h \sigma_0^j T_0^j h_0^k \varepsilon_0^l \quad 4.2$$

Haciendo el análisis correspondiente, los números adimensionales que resultan son los siguientes:

- a) Primer número de Yask'o; permite definir la evolución de la resistencia característica del arco: $1/\sigma_0 D$.

$$\pi_1 = \frac{D \sigma_0 U}{I} \quad 4.3$$

- b) Segundo número de Yask'o; define la razón de la potencia proporcionada por efecto joule $I^2/\sigma_0 D$, con respecto de la entalpia del gas Gh_0 .

$$\pi_2 = \frac{I^2}{\sigma_0 D G h_0} \quad 4.4$$

- c) Número de Souvent (N); representa la razón del flujo de energía de radiación y el flujo de energía por conducción.

$$\pi_3 = \frac{\varepsilon_0 D T_0^3}{k_0} \quad 4.5$$

¹⁹ Mills A.F. Transferencia de Calor. 1995. Pag. 261-274

d) El número de Reynolds; representa la relación de las fuerzas viscosas y de inercia del fluido

$$\pi_4 = \frac{G}{\mu_0 D} \quad 4.6$$

e) El número de Prandtl, representa la relación de la difusividad de cantidad de movimiento, con respecto a la difusividad térmica del fluido.

$$\pi_5 = \frac{\mu_0 h_0}{k_0 T_0} \quad 4.7$$

f) El número original; permite definir la razón de la magnitud $\mu_0 h_0^{1/2}$ y el producto DP característico de descargas en gases.

$$\pi_6 = \frac{\mu_0 h_0^{1/2}}{DP} \quad 4.8$$

g) Número característico de la vorticidad, S; permite relacionar la cantidad de movimiento azimutal, con respecto a la cantidad de movimiento axial.

$$\pi_7 = \frac{I\phi}{R I_x} \quad 4.9$$

donde:

$I\phi$ - par de cantidad de movimiento azimutal.

R - radio del orificio de salida.

I_x - la cantidad de movimiento axial.

Los números π_3 y π_5 son expresados en función de las características físicas del gas a la temperatura de referencia T_0 ; mientras π_7 es definido por las características geométricas, sin embargo, su influencia no fue tomada en cuenta en este estudio. De hecho, solamente los números π_1 , π_2 , π_3 , y π_4 son los que fueron involucrados en los estudios de comportamiento eléctrico y eficiencia térmica.

4.1.3. Correlación Adimensional del Comportamiento Eléctrico.

Es una correlación entre el primero y el segundo número de Yask'o, y por el número de Reynolds; permite correlacionar la resistencia del arco, la potencia por efecto Joule y la entalpía del gas, así como las fuerzas viscosas y de inercia del fluido.

Por lo tanto, la ecuación a correlacionar está dada por:

$$\frac{UD\sigma_0}{I} = k \left(\frac{I^2}{GDh_0\sigma_0} \right)^a \left(\frac{G}{\mu_0 D} \right)^b \quad 4.10$$

donde k, a y b son las constantes empíricas que se determinan a partir de datos experimentales.

4.1.4. Correlación Adimensional de la Eficiencia Térmica.

Esta correlación está basada en un balance de energía a la antorcha, el cual se presenta enseguida, tomando como referencia la Figura 4.1.

El balance de energía aplicado a la antorcha de plasma térmico es:

$$(Potencia\ Eléctrica) + (Gas) + (Agua\ de\ Entrada\ al\ Cátodo) + (Agua\ de\ Entrada\ al\ Anodo) = \\ (Plasma) + (Agua\ de\ salida\ del\ Cátodo) + (Agua\ de\ Salida\ del\ Anodo) + (Radiación) + (Convección)$$

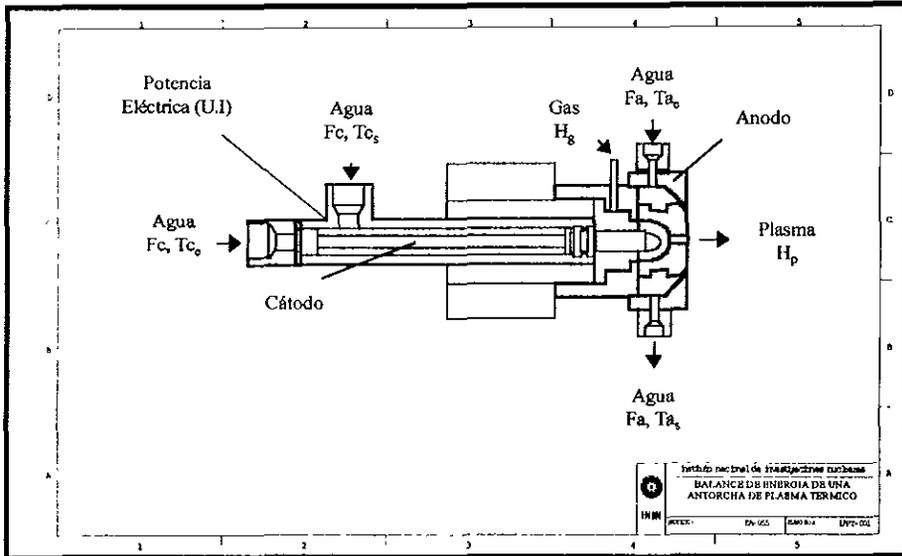


Fig. 4.1. Balance de Energía de una Antorcha de Plasma Térmico.

Considerando que la energía que se pierde por radiación y por convección de la corriente del proceso son mucho menores que la energía del plasma, el balance queda de la siguiente forma:

$$(Potencia\ Eléctrica) = (Plasma) - (Gas) + (Agua\ de\ salida\ del\ Cátodo) - (Agua\ de\ Entrada\ al\ Cátodo) \\ + (Agua\ de\ Salida\ del\ Anodo) - (Agua\ de\ Entrada\ al\ Anodo)$$

Es decir,

$$UI = G_g (H_p - H_g) + F_c Cp (T_{c_s} - T_{c_e}) + F_a Cp (T_{a_s} - T_{a_e}) \quad 4.11$$

donde:

U - Voltaje (v)

I - Corriente (A)

G_g - Caudal másico del gas plasmágeno (g/s)

H_p - Entalpia específica del gas plasma (J/g)

H_g - Enalpia específica del gas plasmágeno (J/g)

F_c - Caudal másico de agua de enfriamiento en el cátodo (g/s)

F_a - Caudal másico de agua de enfriamiento en el ánodo (g/s)

C_p - Calor específico del agua (J/g °C)

T_{c_e} - Temperatura del agua de enfriamiento a la entrada del cátodo (°C)

T_{c_s} - Temperatura del agua de enfriamiento a la salida del cátodo (°C)

T_{a_e} - Temperatura del agua de enfriamiento a la entrada del ánodo (°C)

T_{a_s} - Temperatura del agua de enfriamiento a la salida del ánodo (°C)

Llamando (P_e) a las pérdidas de energía por enfriamiento, tenemos:

$$P_e = F_c C_p (T_{c_s} - T_{c_e}) + F_a C_p (T_{a_s} - T_{a_e}) \quad 4.12$$

Sustituyendo 4.12 en 4.11, entonces:

$$UI = G_g (H_p - H_g) + P_e \quad 4.13$$

Donde UI es la energía suministrada por la fuente de potencia; $G_g(H_p - H_g)$ es la energía transformada en plasma; y P_e es la energía eliminada por los sistemas de enfriamiento.

Entonces, multiplicando 4.13 por (1/UI), la ecuación resultante es:

$$\frac{G_g(H_p - H_g) + P_e}{UI} = 1 \quad 4.14$$

Definiendo como eficiencia (η) a la fracción de energía recuperada por el plasma, la cual resulta ser el primer miembro de la ecuación 4.14, entonces, la eficiencia térmica de la antorcha de plasma está dada por:

$$\eta = 1 - \frac{P_e}{UI} \quad 4.15$$

Así, la ecuación de correlación está dada por la eficiencia en función de el segundo número de Yask'o, el número de Reynolds, así como por el número de Prandtl, con el objeto de relacionar la potencia y la entalpía del gas, las fuerzas viscosas y de inercia del fluido; y la difusividad de cantidad de movimiento, con respecto a la difusividad térmica del fluido.

La ecuación es entonces:

$$\eta = k \left(\frac{I^2}{GD \sigma_0 h_0} \right)^a \left(\frac{G}{\mu_0 D} \right)^b \left(\frac{\mu_0 h_0}{k_0 T_0} \right)^c \quad 4.16$$

4.2. CARACTERIZACIÓN ELÉCTRICA DE LA ANTORCHA DE PLASMA.

En la Tabla 4.2 se muestran los resultados experimentales de la caracterización de la antorcha de plasma, los cuales se obtuvieron usando Argón como gas plasmágeno en cuatro caudales diferentes (0.864, 1.310, 1.950 y 2.952 m³/h) y variando la corriente eléctrica de 70 a 190 amperes, para obtener un voltaje entre 20 y 35 volts. Además, se muestran los resultados de las

Tabla 4.2. Resultados Experimentales de la Caracterización de la Antorcha de Plasma Térmico.

U (volt)	I (ampere)	G (m ³ /h)	T _{c1} (°C)	T _{c2} (°C)	T _{a1} (°C)	T _{a2} (°C)	η
27,20	70	0,864	17,1	19,2	17,1	21,9	0,433
25,50	80	0,864	18,2	21,5	18,2	22,4	0,408
24,50	90	0,864	18,8	22,4	18,8	23,6	0,388
23,20	100	0,864	19,4	22,3	19,4	25,8	0,371
21,00	110	0,864	20,5	24,0	20,5	26,5	0,347
20,60	120	0,864	21,4	25,8	21,4	27,2	0,336
20,05	130	0,864	22,4	26,1	22,4	29,8	0,329
19,80	140	0,864	22,9	26,8	22,9	30,6	0,340
19,70	150	0,864	23,4	27,9	23,4	31,6	0,320
19,60	160	0,864	24,4	29,8	24,4	32,5	0,312
19,60	170	0,864	25,4	31,7	25,4	34,0	0,282
19,90	180	0,864	25,4	31,6	25,4	35,1	0,292
19,80	190	0,864	26,1	32,4	26,1	37,2	0,267
34,20	50	1,31	17,2	18,3	17,2	21,0	0,559
32,40	60	1,31	18,5	20,6	18,5	22,0	0,542
30,60	70	1,31	18,9	21,1	18,9	23,5	0,501
29,80	80	1,31	18,9	21,2	18,9	24,5	0,483
29,40	90	1,31	19,2	21,5	19,2	26,0	0,468
28,80	100	1,31	20,0	23,5	20,0	26,5	0,451
28,40	110	1,31	20,1	24,2	20,1	27,0	0,441
28,10	120	1,31	20,3	24,8	20,3	28,1	0,421
39,70	40	1,95	14,2	14,7	14,2	17,5	0,645
37,40	50	1,95	14,9	15,8	14,9	18,9	0,607
33,30	60	1,95	15,4	16,6	15,4	19,8	0,577
32,20	70	1,95	16,2	17,8	16,2	20,9	0,567
29,80	80	1,95	16,9	18,3	16,9	22,6	0,546
28,60	90	1,95	18,2	20,6	18,2	23,4	0,537
28,00	100	1,95	18,2	20,6	18,2	24,5	0,517
27,40	110	1,95	18,6	21,6	18,6	25,5	0,487
26,40	120	1,95	19,2	23,0	19,2	25,6	0,488
26,30	130	1,95	19,9	24,2	19,9	27,0	0,468
25,60	140	1,95	20,3	25,0	20,3	28,0	0,448
25,30	150	1,95	21,4	26,9	21,4	29,2	0,438
25,30	160	1,95	22,1	28,6	22,1	29,9	0,431
25,20	170	1,95	22,7	29,2	22,7	31,4	0,428
25,00	180	1,95	23,1	29,9	23,1	32,7	0,418
24,80	190	1,95	23,4	30,0	23,4	34,1	0,418
41,00	40	2,952	16,6	17,3	16,6	19,1	0,698
39,26	50	2,952	17,8	19,5	17,8	19,9	0,688
37,90	60	2,952	17,8	20,4	17,8	20,0	0,650
37,00	70	2,952	18,5	21,1	18,5	21,7	0,639
35,50	80	2,952	20,2	24,3	20,2	22,7	0,611
34,90	90	2,952	20,2	24,5	20,2	24,0	0,580
34,70	100	2,952	20,5	24,9	20,5	25,1	0,579
34,60	110	2,952	21,6	27,6	21,6	25,9	0,550
34,43	120	2,952	21,6	27,7	21,6	27,1	0,540
34,30	130	2,952	22,4	29,0	22,4	28,6	0,529
34,40	140	2,952	23,1	30,4	23,1	29,9	0,520
33,7	150	2,952	23,3	30,2	23,3	31,5	0,519
33,45	160	2,952	24,1	31,8	24,1	32,6	0,509
33,5	170	2,952	24,1	31,9	24,1	34	0,499
33,2	180	2,952	24,6	33,0	24,6	34,8	0,499

temperaturas de entrada y salida de agua de enfriamiento tanto del cátodo, como del ánodo y el resultado de los cálculos de la eficiencia térmica.

En la Figura 4.2 se muestra la gráfica del desarrollo del voltaje con respecto a la variación de la corriente para los cuatro diferentes caudales de gas utilizados, observándose que para un mismo caudal de gas, a medida que aumenta la corriente eléctrica, el voltaje disminuye, lo cual es debido a que se produce una mayor ionización de las moléculas y átomos volviendo al gas mas conductor y por tanto, el voltaje disminuye.

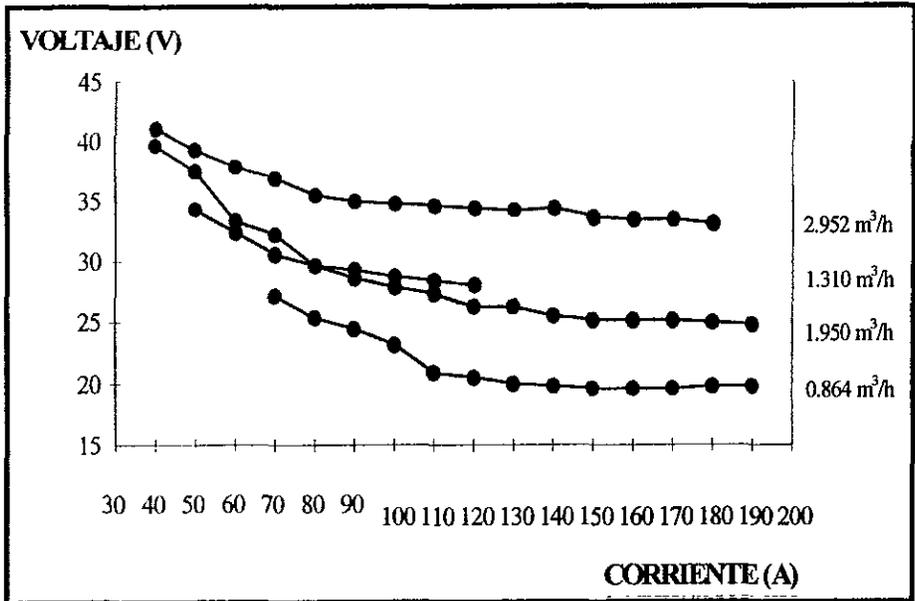


Fig. 4.2. Comportamiento Eléctrico de la Antorcha de Plasma.

Por otro lado, para un mismo valor de corriente eléctrica, el voltaje aumenta al aumentar el caudal de gas, ya que se ha aumentado la resistencia del medio y por lo tanto, se necesita una mayor energía para volver el medio conductor.

4.2.1. Correlación Clásica del Comportamiento Eléctrico de la Antorcha de Plasma.

El modelo de correlación clásica de los parámetros eléctricos de la antorcha de plasma fue realizado para cada uno de los caudales utilizados y el ajuste de las ecuaciones se realizó con el método de mínimos cuadrados, utilizando un modelo de regresión multilínea.

Las ecuaciones ajustadas, los coeficientes de correlación para cada una de ellas y el error estándar que presentan se muestran en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3. Ecuaciones Clásicas Ajustadas del Comportamiento Eléctrico.

CAUDAL DE GAS (m ³ /h)	ECUACION AJUSTADA	COEFICIENTE DE CORRELACION (r)	ERROR ESTANDAR (S _i)
0.864	$U = 46.02I^{-0.35}Q^{-6.21}$	0.93	2.44
1.310	$U = 95.24I^{-0.22}Q^{-0.64}$	0.97	2.08
1.950	$U = 15.66I^{-0.31}Q^{3.02}$	0.97	4.15
2.952	$U = 0.19I^{-0.12}Q^{5.32}$	0.90	2.11

Las ecuaciones ajustadas muestran que el voltaje eléctrico es inversamente proporcional a la corriente. Por otro lado, los coeficientes de correlación encontrados son aceptables ya que varían desde 0.90 hasta 0.97 con desviaciones estándar pequeñas, lo que indica que los modelos ajustados son buenos. Sin embargo, con el propósito de disponer de ecuaciones más generales, se llevo a cabo un ajuste adimensional.

Una gráfica de datos estimados con los modelos ajustados, sobre los datos experimentales se muestra en la Figura 4.3.

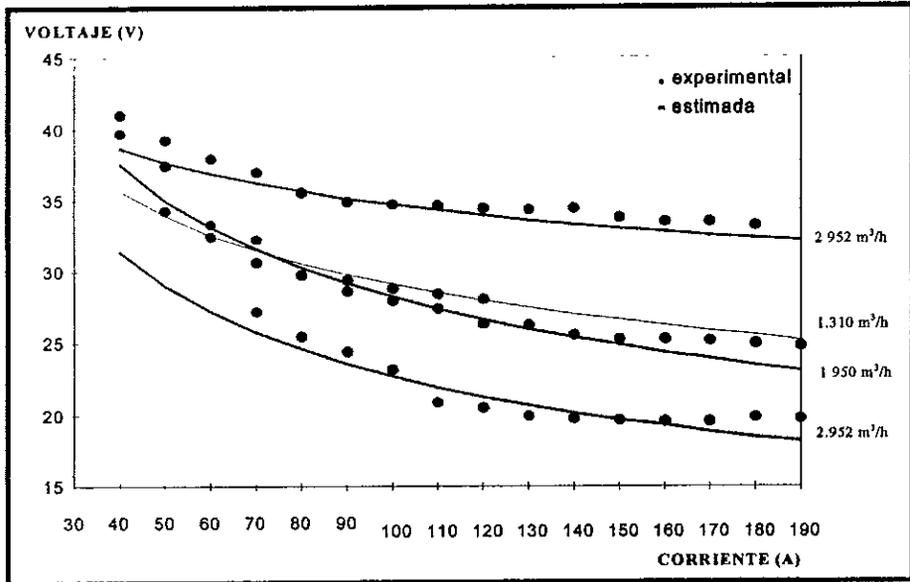


Fig. 4.3. Comportamiento Eléctrico de la Antorcha de Plasma.
Datos Experimentales y Estimados.

4.2.2. Correlación con Números Adimensionales del Comportamiento Eléctrico.

No obstante que la correlación clásica del comportamiento eléctrico es fácil y rápida de utilizar, solo incluye parámetros generales de la potencia eléctrica y del gas que se está utilizando, por lo que el alcance de la aplicación está muy limitado.

Para aplicaciones en las cuales se necesita tomar en cuenta las propiedades del gas o las características geométricas de la antorcha, se debe desarrollar un modelo matemático que sea práctico y que incluya estas propiedades.

En el caso de una correlación con números adimensionales se incluyen parámetros específicos del gas, considerando que se encuentra en el estado de plasma, así como parámetros geométricos de la antorcha, y parámetros eléctricos.

El modelo matemático desarrollado está dado en la ecuación 4.17.

$$Su = kSi^a Re^b \quad 4.17$$

donde:

$$Su = \frac{UD\sigma_o}{I} \quad 4.18$$

$$Si = \frac{I^2}{GDh_o\sigma_o} \quad 4.19$$

$$Re = \frac{G}{\mu_o D} \quad 4.20$$

k, a, b son constantes que se determinan a partir de datos experimentales.

Los datos usados se muestran en la Tabla 4.2, mientras los datos de las propiedades termodinámicas del plasma (ver Tabla 4.4) se obtuvieron²⁰ a una temperatura de referencia de 9,400 °K, a la cual se considera que por lo menos el 1% de especies están ionizadas.

Tabla 4.4. Propiedades Termodinámicas de un Plasma de Argón.

PROPIEDAD	VALOR
Temperatura de Referencia (T_0)	9,400 °K
Conductividad Eléctrica (σ_0)	25,000 mhos/m
Entalpia (h_0)	5 J/g
Viscosidad (μ_0)	240,000 g/m s
Conductividad Térmica (k_0)	0.5 J/m s °K
Diámetro de Salida del Anodo (d)	0.002 m

La correlación del comportamiento eléctrico en función de números adimensionales resultó:

$$Su = 8.847 Si^{-0.632} Re^{-0.295} \quad 4.21$$

Con un coeficiente de correlación de 0.99 y un error estándar de 1.65.

Una gráfica de los valores experimentales contra los valores estimados de **Su** se muestra en la Figura 4.4, y se observa que los puntos se encuentran en la línea diagonal, lo cual indica que la ecuación estimada ajusta muy bien los datos experimentales.

Con la expresión calculada es posible simular el comportamiento eléctrico de la antorcha de plasma, teniendo como parámetros la resistencia del arco, la potencia, la entalpia del gas, así como las fuerzas viscosas y de inercia del fluido.

²⁰ Olof J.E. et al. Plasma Technology in Metallurgical Processing. 1988. Pag.11-26.

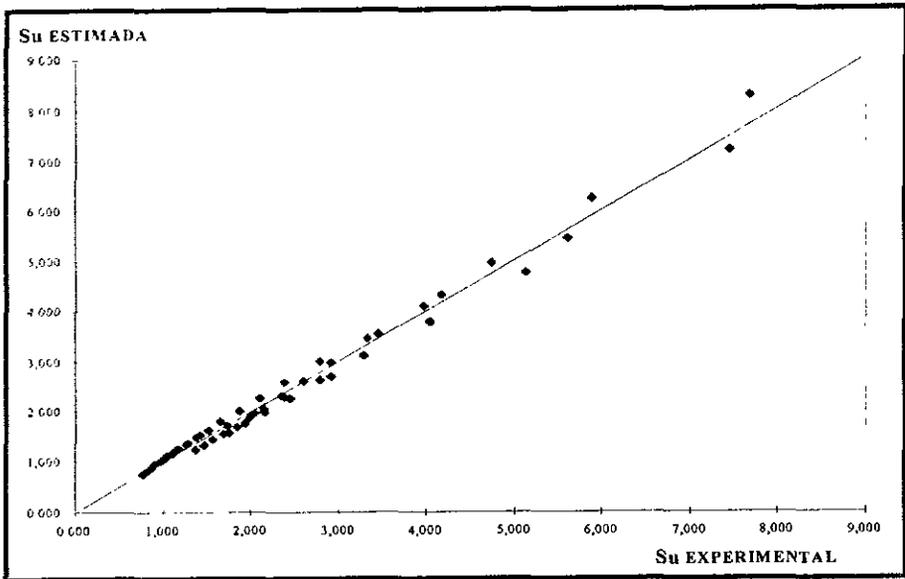


Fig. 4.4. Valores Experimentales vs Estimados de Su.

4.3. CARACTERIZACIÓN TÉRMICA DE LA ANTORCHA DE PLASMA.

La caracterización térmica de la antorcha de plasma se realiza con el objeto de desarrollar una ecuación que nos permita conocer el comportamiento térmico que presenta dicha antorcha en diferentes condiciones de operación. Para esto, a partir de una balance de materia realizado a la antorcha de plasma (ver punto 4.1.4), se determina la energía transformada en plasma y con esto, la eficiencia térmica.

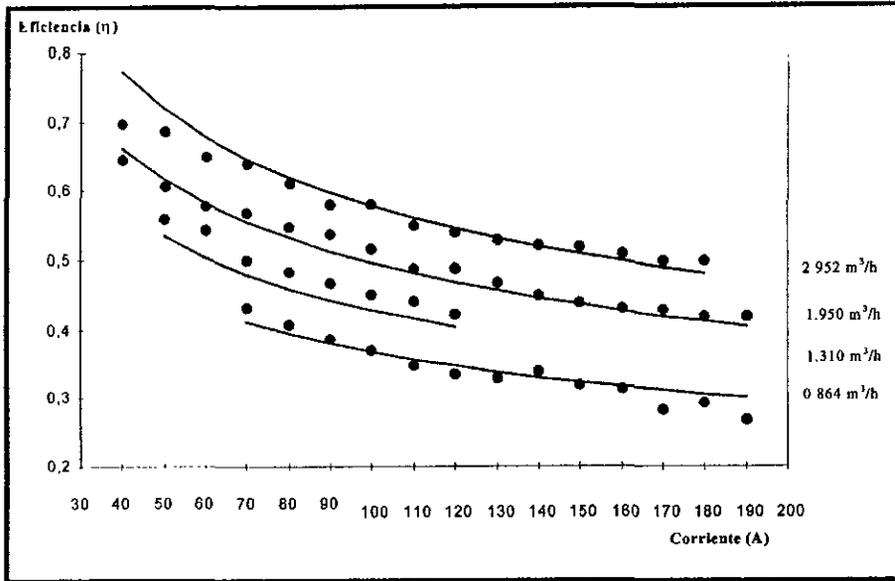


Fig. 4.5. Comportamiento Térmico de la Antorcha de Plasma Térmico.

En la Tabla 4.2 se muestran los resultados de las corridas experimentales, así como la eficiencia térmica, calculada con la ecuación 4.15, para cada una de ellas. Además, en la Figura 4.5 se muestra el desarrollo de la eficiencia térmica con respecto a la variación de la corriente para los cuatro diferentes caudales de gas utilizados, observándose que para un mismo caudal de gas, a medida que aumenta la corriente eléctrica, eficiencia térmica disminuye, lo cual es debido a la mayor cantidad de calor retirada por el agua de enfriamiento al aumentar la corriente.

Por otro lado, para un mismo valor de corriente eléctrica, la eficiencia térmica aumenta al aumentar el caudal de gas, ya que se ha aumentado la cantidad de masa de gas que pasa a través del arco y por tanto existe una mayor ionización aumentando la energía del plasma.

Un modelo matemático que describa el comportamiento térmico de la antorcha de plasma mostrado en la Figura 4.5 y que además, tome en cuenta las propiedades del gas y las características geométricas de la antorcha, se desarrolló en el punto 4.1.4 y quedó determinado por la ecuación 4.22.

$$\eta = k Si^\alpha Re^\beta Pr^\gamma \quad 4.22$$

donde:

$$Si = \frac{I^2}{GDh_o\sigma_o} \quad 4.23$$

$$Re = \frac{G}{\mu_o D} \quad 4.24$$

$$Pr = \frac{\mu_o h_o}{k_o T_o} \quad 4.25$$

k, α, β, γ son constantes que se determinan a partir de datos experimentales.

Los datos usados se muestran en la Tabla 4.2, mientras los datos de las propiedades termodinámicas del plasma en la Tabla 4.4.

La correlación del comportamiento de la eficiencia térmica en función de números adimensionales resultó:

$$\eta = 0.08Si^{-0.159} Re^{0.208} Pr^{0.692}$$

4.26

con un coeficiente de correlación de 0.985 y un error estándar de 0.10.

Una gráfica de los valores experimentales contra los valores estimados de η se muestra en la Figura 4.6, y se observa que los puntos se encuentran en la línea diagonal, lo cual indica que la ecuación estimada ajusta muy bien los datos experimentales.

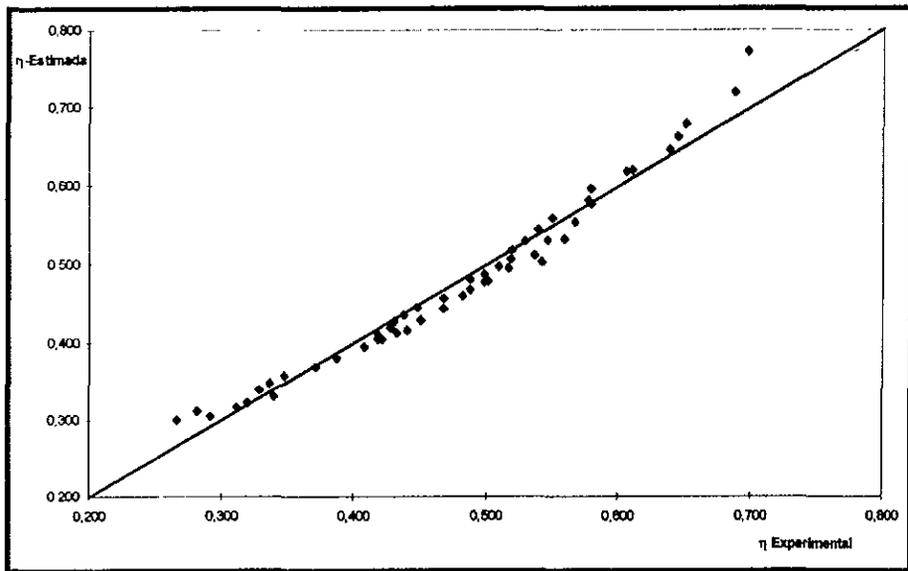


Fig. 4.6. Gráfica de Eficiencia Térmica Experimental vs Estimada.

Con la expresión encontrada es posible simular la eficiencia térmica de la antorcha de plasma, teniendo como parámetros la resistencia del arco, la potencia, la entalpia del gas, las fuerzas

CARACTERIZACION TERMICA Y ELECTRICA DE LA ANTORCHA DE PLASMA TERMICO

viscosas y de inercia del fluido, así como la difusividad de cantidad de movimiento, con respecto a la difusividad térmica del fluido.

Con los cálculos y las expresiones encontradas en este capítulo, se logra tener un conocimiento completo del comportamiento de la antorcha de plasma térmico, con lo que es posible estimar las propiedades del plasma en el momento que se estén llevando a cabo los experimentos de degradación, así como estimar la cantidad de energía eléctrica que se está transformando en energía en forma de plasma.

CAPITULO 5

CONDICIONES DE OPERACIÓN Y
RESULTADOS
EXPERIMENTALES.

Una vez que se realizó la caracterización de la antorcha de plasma, se procedió a efectuar las corridas preliminares, para establecer las condiciones de operación del equipo de degradación de los diferentes tipos de residuos. Posteriormente se llevó a cabo la degradación sistemática de los compuestos modelo (CCl_4 , C_6H_6 , C_2Cl_4) y finalmente las corridas de degradación de aceite comercial. Durante estas corridas se monitorearon varios parámetros, tales como: caudales de gas plasmágeno y gas de recombinación, temperaturas de los gases a la salida del reactor y del intercambiador de calor y alimentación eléctrica.

En este capítulo se presentan los resultados de los experimentos realizados con el equipo de degradación.

5.1. PRUEBAS PRELIMINARES.

Con el propósito de determinar las condiciones de operación que permitieran la degradación eficiente de residuos organohalogenados, se operó el sistema bajo diferentes condiciones.

Durante la degradación de residuos orgánicos halogenados se utilizó la antorcha mostrada en la Figura 3.4, la cual, como ya se mencionó, permite la alimentación del residuo líquido en el jet de plasma formado a través de la boquilla del ánodo. La alimentación del residuo líquido se hizo por medio de una jeringa de inyección, a través del "septum" o por medio de una bomba peristáltica, las cuales están colocadas en la línea de alimentación de residuo en el ánodo de la antorcha.

La potencia eléctrica de la antorcha se varió con el objeto de encontrar aquellas condiciones que permitieran la degradación de residuos sin la extinción del jet de plasma.

En la Tabla 5.1 se muestran los intervalos de las condiciones de operación a las cuales se realizaron los experimentos de degradación de compuestos modelo organohalogenados. Bajo estas condiciones se considera que se alcanza régimen permanente, tanto en las temperaturas

como en los caudales de gases, así como en función de la potencia necesaria para degradar los residuos alimentados.

Tabla 5.1. Condiciones de Operación en Régimen Permanente en la Degradación de Residuos Organohalogenados.

Gas Plasmágeno	Gas Caudal Presión	Argón 20 - 30 lt/min 1 - 2 kg/cm ²
Gas de Recombinación	Gas Caudal Presión	Oxígeno 15 - 25 lt/min 1 - 3 kg/cm ²
Potencia Eléctrica	Corriente Voltaje	150 - 240A 25 - 45 v
Temperatura de los Gases a la Salida del Reactor	T ₁	1000 - 1250 °C
Temperatura de los Gases a la Salida del Intercambiador	T ₂	15 - 40 °C
Agua en la Torre de Absorción	Caudal	1 - 2 lt/min
Agua de Enfriamiento en el Intercambiador	Caudal	5 - 7
Tiempo para Alcanzar Régimen Permanente	T	25 - 35 min

Durante las corridas preliminares también se revisó el equipo para comprobar que no hubiera fuga de gases en el sistema.

Por otro lado, con el objeto de verificar si se estaba llevando a cabo la degradación se realizaron inyecciones de tetracloruro de carbono (CCl₄) y de benceno (C₆H₆), en ausencia de gas de recombinación (oxígeno). La degradación quedó confirmada, ya que durante los experimentos con CCl₄ se observó una gran cantidad de carbono en forma de ceniza en la torre de absorción, además de un fuerte olor a cloro, lo que indica la descomposición del CCl₄ en sus partículas constitutivas y posteriormente la recombinación en carbono y cloro gaseoso.

Algo similar ocurrió en el caso de la degradación de C_6H_6 , ya que también se observó una gran cantidad de carbono en la torre de absorción, sin embargo, como se esperaba, no se detectó el olor a cloro, porque el benceno no lo tiene en su estructura.

Con estos experimentos se pudo corroborar que el proceso de degradación fue efectivo, ya que en esas condiciones el plasma térmico fue capaz de descomponer los compuestos introducidos en él, en sus partículas constitutivas e incluso ionizarlos, formando átomos de carbón y cloro durante la degradación de CCl_4 y carbono e hidrógeno en el caso del C_6H_6 , mientras el enfriamiento en el intercambiador de calor se observó una buena recombinación, formando ceniza, cloro gaseoso e hidrógeno gaseoso.

5.2. DEGRADACIÓN DE MOLECULAS MODELO.

Las moléculas o compuestos modelo que se usaron en estos experimentos fueron: tetracloruro de carbono (CCl_4), benceno (C_6H_6) y tetracloetileno (C_2Cl_4), con el objeto de simular la degradación de los residuos organohalogenados.

Los caudales de alimentación de agua de enfriamiento al intercambiador de calor y a la torre de absorción de gases fueron constantes en todas las corridas e iguales a 6 lt/min y 4.5 lt/min, respectivamente.

Los gases residuales se analizaron en dos puntos del proceso; uno a la salida del intercambiador de calor, para verificar la eficiencia de la degradación/recombinación; y otro a la salida de la torre de absorción, para verificar la retención de los gases ácidos formados y de las partículas suspendidas.

El análisis de los gases residuales se hizo en un espectrómetro de masas Leybold John, Cuadrex 200, modelo 901 -002-C2.

5.2.1. Degradación de Tetracloruro de Carbono (CCl₄).

Se realizaron cinco corridas con CCl₄, para estudiar su degradación. Las condiciones de operación de cada uno de los experimentos se muestran en la Tabla 5.2.

Tabla 5.2. Condiciones de Operación en los Experimentos de Degradación de CCl₄.

	Alimentación de Residuos	Gas Plasmágeno	Gas de Recombinación	Potencia Eléctrica	Temperatura de los Gases (T ₁)	Temperatura de los Gases (T ₂)
Corrida 1	2.5 ml/min	Argón 20 lt/min 1.36 kg/cm ²	Sin Adicionar	120 A 30 v	980 °C	40 °C
Corrida 2	2.2 ml/min	Argón 30 lt/min 1.36 kg/cm ²	Sin Adicionar	120 A 36 v	1100 °C	60 °C
Corrida 3	5.0 ml/min	Argón 30 lt/min 1.36 kg/cm ²	Oxígeno 15 lt/min 2.0 kg/cm ²	150 A 40 v	1050 °C	60 °C
Corrida 4	5.0 ml/min	Argón 25 lt/min 1.36 kg/cm ²	Oxígeno 15 lt/min 2.0 kg/cm ²	150 A 40 v	1000 °C	40 °C
Corrida 5	0.6 ml/min	Argón 25 lt/min 1.5 kg/cm ²	Oxígeno 14 lt/min 3.2 kg/cm ²	180 A 30 v	1150 °C	110 °C

Nota: La potencia utilizada promedio fue de 5 kw con una duración aproximada de una hora en cada corrida experimental.

Los resultados de los análisis de los gases a la salida del intercambiador de calor y a la salida de la torre de absorción, por medio de espectrometría de masas, se muestran en las Tablas 5.3 y 5.4; los espectros correspondientes se muestran en las Figuras 5.1 y 5.2, respectivamente.

Estos resultados muestran la efectividad del proceso para degradar el CCl₄; los principales compuestos encontrados en los gases residuales fueron: dióxido de carbono (CO₂), monóxido de carbono (CO), cloro (Cl), oxígeno (O₂), Argón (Ar), carbono (C); por otro lado, como se verá más adelante, la concentración de CCl₄ es relativamente pequeña, pero aún así se cuantificó para calcular la eficiencia de la degradación.

Tabla 5.3. Presiones Parciales en la Espectrometría de Masas de los Gases a la Salida del Intercambiador de Calor, durante la Degradación de CCL₄.

PRESION PARCIAL EMUL 1.90 KV UNIDAD 1		
	1.16 SEG N T/MA 5.0	4.0X10 ⁻⁵ TORR
COMPUESTO/MASA	FACTOR	TORR
Hidrógeno	2.319	3.7 X 10 ⁻⁶
Helio	7.143	6.4 X 10 ⁻⁸
Agua	1.333	2.1 X 10 ⁻⁴
N ₂ / CO	1.000	6.5 X 10 ⁻⁵
Oxígeno	1.053	4.0 X 10 ⁻³
Argón	0.947	4.2 X 10 ⁻³
34	1.000	3.1 X 10 ⁻⁵
36	1.000	7.6 X 10 ⁻⁵
154	1.000	2.1 X 10 ⁻⁹
71	1.000	2.8 X 10 ⁻⁸
38	1.000	1.7 X 10 ⁻⁵
44	1.000	7.3 X 10 ⁻⁵

Nota: Los factores de respuesta son establecidos en función de la superficie específica de la molécula dada, ya que el cuadrupolo está calibrado para la superficie específica del nitrógeno.

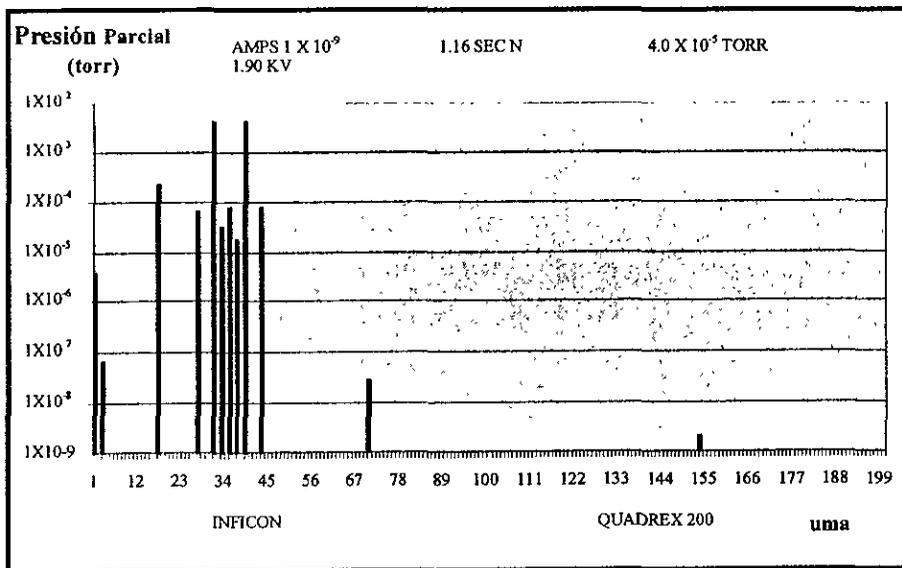


Fig. 5.1. Espectro de Masas de los Gases a la Salida del Intercambiador de Calor durante la Degradación de CCL₄.

Tabla 5.4. Presiones Parciales en la Espectrometría de Masas de los Gases a la Salida de la Torre de Absorción de Gases, durante la Degradación de CCl_4 .

PRESION PARCIAL		
EMUL 1.90 KV	0.815 SEG N	5.0×10^{-5} TORR
UNIDAD 1	T/MA 5.0	
COMPUESTO/MASA	FACTOR	TORR
Hidrógeno	2.319	2.8×10^{-3}
Helio	7.143	1.2×10^{-4}
Agua	1.333	3.4×10^{-3}
N_2 / CO	1.000	2.3×10^{-3}
Oxígeno	1.053	2.5×10^{-4}
Argón	0.947	4.1×10^{-3}
154	1.000	1.5×10^{-9}
35	1.000	3.5×10^{-3}
12	1.000	5.8×10^{-5}
20	1.000	2.7×10^{-3}
1	1.000	3.1×10^{-4}
44	1.000	9.0×10^{-4}

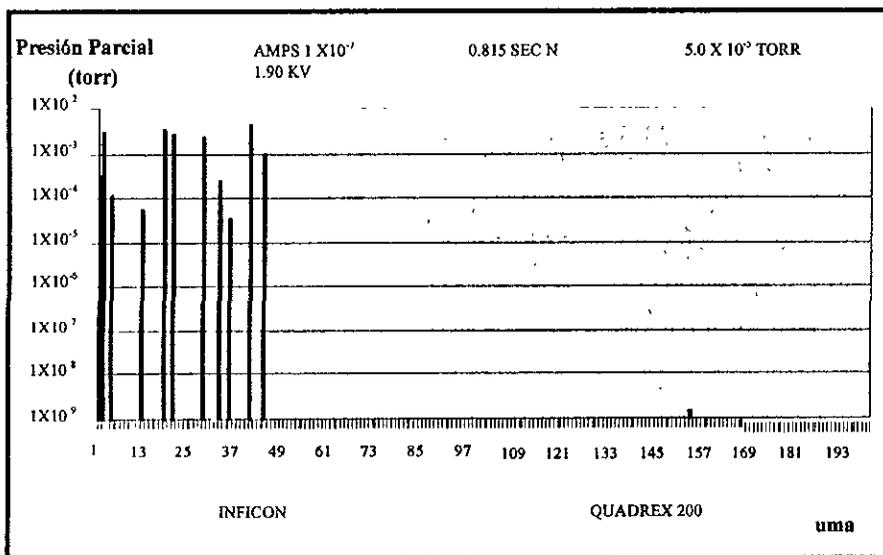


Fig. 5.2. Espectro de Masas de los Gases a la Salida de la Torre de Absorción Durante la Degradación de CCl_4 .

Es claro que, la degradación se llevó a cabo de forma tal que sólo se formaron compuestos de peso molecular bajo (menores de 50 uma) y que la cantidad remanente de CCl_4 está en el límite de detección del espectrómetro de masas utilizado.

5.2.2. Degradación de Benceno (C_6H_6).

En el caso de la degradación de benceno se realizaron tres corridas bajo condiciones de operación diferentes, las cuales se muestran en la Tabla 5.5; además, es pertinente mencionar que la potencia promedio utilizada fue 4.3 kw, con una duración aproximada de una hora en cada una de las corridas realizadas.

Tabla 5.5. Condiciones de Operación en los Experimentos de Degradación de C_6H_6 .

	Alimentación de Residuos	Gas Plasmágeno	Gas de Recombinación	Potencia Eléctrica	Temperatura de los Gases (T_1)	Temperatura de los Gases (T_2)
Corrida 1	2.0 ml/min	Argón 30 lt/min 1.36 kg/cm ²	S/A	120 A 30 v	1000 °C	50 °C
Corrida 2	2.5 ml/min	Argón 27 lt/min 1.36 kg/cm ²	Oxígeno 10 lt/min 1.36 kg/cm ²	100 A 40 v	900 °C	40 °C
Corrida 3	0.5 ml/min	Argón 27 lt/min 1.49 kg/cm ²	Oxígeno 14 lt/min 3.26 kg/cm ²	180 A 30 v	1150 °C	40 °C

Al igual que en caso del CCl_4 , se tomaron muestras de gases residuales en los mismos dos puntos, y los resultados de los análisis por espectrometría de masas, tanto a la salida del intercambiador de calor, como a la salida de la torre de absorción (Anexo 6 y 7, respectivamente), muestran que también en este caso se formaron compuestos de peso molecular bajo: dióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO), oxígeno (O_2), argón (Ar), carbono (C), e hidrógeno. Así mismo, también se observa que la concentración de C_6H_6 es muy pequeña, y se cuantificó para calcular la eficiencia de la degradación.

5.2.3. Degradación de Tetracloroetileno (C₂Cl₄).

Para estudiar el fenómeno de degradación de este compuesto se realizaron dos corridas experimentales, en las cuales se establecieron las condiciones de operación que se muestran en la Tabla 5.6 y también se tomaron dos muestras de gases residuales para analizarlas por espectrometría de masas. La potencia eléctrica utilizada se estableció en 4.2 kw aproximadamente y cada una de las corridas tuvo una duración de 40 minutos, aproximadamente.

Tabla 5.6. Condiciones de Operación en los Experimentos de Degradación de C₂Cl₄.

	Alimentación de Residuos	Gas Plasmágeno	Gas de Recombinación	Potencia Eléctrica	Temperatura de los Gases (T ₁)	Temperatura de los Gases (T ₂)
Corrida 1	0.7 ml/min	Argón 25 lt/min 1.36 kg/cm ²	Oxígeno 16.5 lt/min 2.2 kg/cm ²	170 A 24 v	1150 °C	85 °C
Corrida 2	0.9 ml/min	Argón 25 lt/min 1.36 kg/cm ²	Oxígeno 16.5 lt/min 2.2 kg/cm ²	170 A 26 v	1100 °C	92 °C

Los resultados de los análisis por espectrometría de masas de las muestras tomadas a la salida del intercambiador de calor y de la torre de absorción de gases se muestran en los Anexos 8 y 9, respectivamente, y nos indican que se realizó una buena degradación, ya que los compuestos principalmente formados fueron CO, CO₂, O, O₂, H₂, y Cl.

5.3. RESULTADOS EXPERIMENTALES DE LA DEGRADACIÓN DE ACEITE COMERCIAL.

Se consideró pertinente determinar la capacidad del plasma térmico para degradar aceite comercial, ya que este tipo de aceite es el vehículo principal de los bifenilos policlorados

(PCB's) en los transformadores; es decir, los aceites dieléctricos de los transformadores están formados principalmente de aceite con aditivos compuestos por PCB's. Es claro que estos experimentos permiten representar la capacidad del plasma térmico en el tratamiento de aceites industriales.

Para los experimentos de degradación de aceite, se utilizó el aceite MOBIL OIL DTE-24, Grado ISO 32. Los caudales de alimentación de agua de enfriamiento al intercambiador de calor y de circulación en la torre de absorción de gases fueron constantes en todas las corridas e iguales a 6 lt/min y 1.5 lt/min, respectivamente.

Como en los casos anteriores, los gases residuales se analizaron en dos puntos del proceso: uno a la salida del intercambiador de calor, para verificar la eficiencia de la degradación/recombinación; y otro a la salida de la torre de absorción, para verificar la retención de los gases ácidos formados y de las partículas suspendidas.

Se realizaron tres corridas de degradación con alimentación continua de aceite, utilizando para ello una bomba peristáltica marca Monostat, con un flujo de alimentación variable entre 3 y 5 ml/min.

Tabla 5.7. Condiciones de Operación en los Experimentos de Degradación de Aceite Comercial.

	Alimentación de Residuos	Gas Plasmágeno	Gas de Recombinación	Potencia Eléctrica	Temperatura de los Gases (T ₁)	Temperatura de los Gases (T ₂)
Corrida 1	4.0 ml/min	Argón 14.0 lt/min 1.36 kg/cm ²	Oxígeno 12.0 lt/min 1.36 kg/cm ²	202 A 42 v	1200 °C	37 °C
Corrida 2	4.7. ml/min	Argón 15.5 lt/min 1.36 kg/cm ²	Oxígeno 6.0 lt/min 1.36 kg/cm ²	210 A 42 v	1250 °C	32 °C
Corrida 3	3.0 ml/min	Argón 20 lt/min 1.36 kg/cm ²	Oxígeno 6.4 lt/min 1.36 kg/cm ²	190 A 43 v	1100 °C	38 °C

La potencia promedio utilizada fue de 7.8 kw, con una duración aproximada de una hora en cada corrida experimental. En la Tabla 5.7, se muestran las condiciones de operación de cada uno de los experimentos.

El equipo utilizado para el análisis de los gases residuales fue un espectrómetro de masas de gases residuales MKS RESIDUAL GAS, con cuádruplo para 300 uma, marca PPT TYPE 300 EM y software ECU VERSION 7.2.

Los valores de los análisis de los gases a la salida del intercambiador de calor y a la salida de la torre de absorción, se muestran en los Anexos 10 y 11, respectivamente.

En los espectros se observa que, al igual que en la degradación de los compuestos orgánicos halogenados, existe una gran formación de CO₂, CO, C, O₂, y una pequeña porción de aceite no degradado, representado por todos aquellos picos de masa atómica de 60 unidades y superiores, que son característicos de las fracciones de compuestos pesados, es decir, de masa atómica grande. Además, se observa que la eficiencia de la torre de absorción es buena, ya que en el espectro de los gases a la salida de dicha torre, no se presentan estos mismos picos con unidades de masa atómica superior a 60.

Finalmente, con las corridas experimentales de los compuestos orgánicos halogenados y el aceite comercial, se pudo comprobar que la degradación se lleva a cabo de forma tal que, cualquier compuesto que se ponga en contacto con el jet de plasma térmico es separado en sus partículas constitutivas, debido a los altos niveles de energía a las que son sometidas. Además, a causa del enfriamiento repentino, estas mismas se recombinan rápidamente, dando como resultado la formación de moléculas estables de baja masa molecular, principalmente.

Cabe señalar, que todos los espectros de masas fueron realizados en ejes semilogarítmicos con la finalidad de que las fracciones de residuos no degradados fueran evidentes, ya que debido a que se encuentran en pequeñas cantidades, su presión parcial era casi insignificante.

Además, como un complemento al análisis, se tomaron dos muestras de los residuos de ceniza que quedaron adheridos en la pared del reactor durante la degradación de CCl_4 , con la finalidad de determinar la composición principal. Los análisis fueron realizados con un microscopio electrónico de barrido marca PHILIPS modelo XL 30, con funcionamiento al alto vacío, voltaje de aceleración de 30 kv, capacidad de ampliación de 400,000 X, un detector de electrones secundarios, uno de electrones retrodispersados y uno de rayos-X.

La micrografía y la gráfica del espectro de emisión del microscopio electrónico para el CCl_4 , se muestran en las Figuras 5.3 y 5.4, respectivamente.

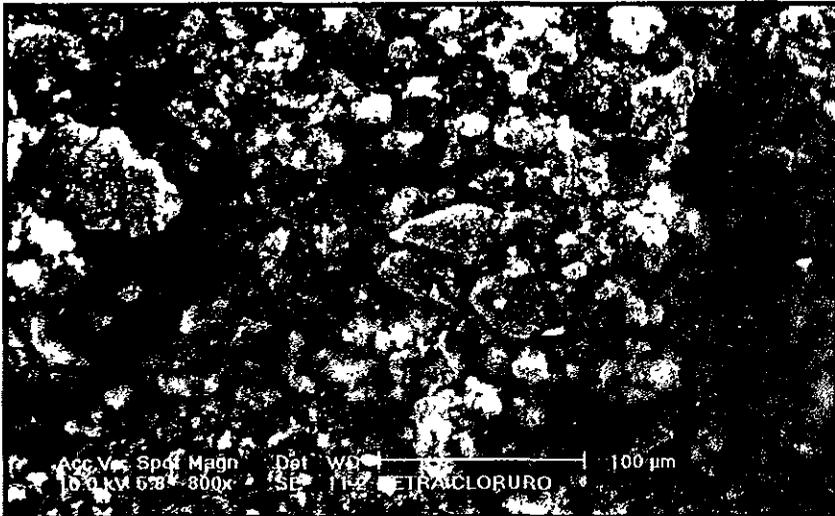


Fig.5.3. Micrografía del Residuo Sólido de la Degradación de CCl_4 .

La micrografía muestra principalmente la presencia de grumos de carbono, en donde las partes luminosas son características de la plata, la cual es utilizada para que la muestra sólida quede adherida al soporte del microscopio.

Por otro lado, el espectro de emisión de la muestra indica la presencia, principalmente de carbono, oxígeno, calcio, silicio, hierro y cloro, de los cuales, la presencia de carbono y cloro tiene una explicación lógica, ya que estos elementos forman el CCl_4 , mientras el hierro proviene de la oxidación del reactor y el calcio y el silicio del desprendimiento de material del crisol del reactor, además, el oxígeno es proporcionado por el gas de recombinación.

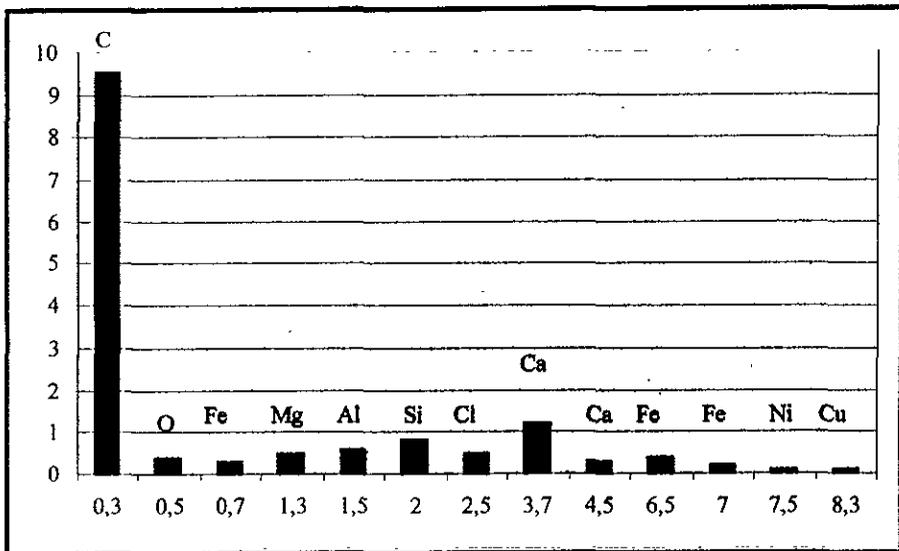


Fig. 5.4. Espectro de Emisión del Microscopio Electrónico de Barrido para la Muestra Sólida de CCl_4 .

En la Tabla 5.8 se muestran los elementos presentes en la muestra sólida, así como su composición.

En estos análisis se observa que el constituyente principal es carbono, lo cual demuestra que la degradación de este residuo es completa.

**Tabla 5.8. Determinación de Elementos y Composición de la Muestra Sólida
Por Medio del Microscopio Electrónico de Barrido.**

ELEMENTO	% PESO	% MOL
C	86.33	92.99
O	5.15	4.19
Mg	0.58	0.31
Al	0.56	0.27
Si	0.94	0.44
Cl	0.59	0.22
Ca	2.60	0.84
Fe	2.35	0.55
Ni	0.34	0.08
Cu	0.55	0.11
TOTAL	100.00	100.00

5.4. CALCULOS DE LA EFICIENCIA DE DEGRADACION.

Con la finalidad de tener una idea de la eficiencia de la degradación del proceso, se realizó el cálculo de balance de materia parcial para cada uno de las corridas realizadas, en términos de los diferentes tipos de residuos.

Por otro lado, debido a que se considera la etapa degradación/recombinación, como la parte esencial del proceso, entonces, los cálculos de eficiencia de degradación se realizaron considerando un balance de materia para el reactor y el intercambiador de calor.

5.4.1. Eficiencias de Degradación para Cada Uno de los Residuos Tratados.

La eficiencia de la degradación se calculó de acuerdo a la siguiente definición:

$$\eta_d = \frac{n_a - n_s}{n_a} \times 100 \quad 5.1.$$

en donde:

η_d – Eficiencia de la degradación (%).

n_a – Número de moles de residuo en la alimentación.

n_s – Número de moles de residuo en los gases de salida.

En todos los experimentos de residuos orgánicos halogenados se tomaron muestras de los gases producto de la degradación, en las balas de toma de muestra. El procedimiento consistió en purgar la bala con helio a una temperatura de 120 a 150 °C, seguida de una evacuación por medio de una bomba de vacío mecánica. En estas condiciones la bala se colocó en la tubería a la salida del intercambiador de calor y aprovechando la diferencia de presión que existe entre la bala y la tubería del equipo, se llenó.

Como ejemplo ilustrativo se presentan los cálculos de la eficiencia de degradación para una corrida de CCl_4 ; las condiciones de operación del tercer experimento de degradación de CCl_4 se resumen a continuación.

Alimentación de Residuo: 5.0 ml/min.

Presión de Vacío (P_1): 0.668 at.

Presión de Llenado de Muestra (P_2): 1.36 at.

Volumen de la Bala: 0.5 lt.

Temperatura: 22 °C = 295 °K.

Tiempo de Toma de Muestra: 10 segundos.

Densidad²¹ del CCl_4 (ρ): 1.595 g/ml.

Peso Molecular²¹ del CCl_4 (PM): 153.84 g/molg.

21 Perry R. and Green D. Chemical Engineers Handbook. 6th Edition. 1984. Pag. 3-29.

Constante de los Gases (R): 0.08205 at·lt/mol °K.

Además, en la Tabla 5.9 se muestra la fracción mol de los principales compuestos encontrados en los gases a la salida del intercambiador de calor, obtenido por medio del espectrómetro de masas.

Tabla 5.9. Fracción Mol de los Gases Residuales a la Salida del Intercambiador de Calor Durante la Degradación de CCl₄.

COMPUESTO	PRESION PARCIAL	FRACCION MOL
He	4.8×10^{-4}	0.02996066
H ₂ O	3.4×10^{-3}	0.21222137
CO	3.4×10^{-3}	0.21222137
O ₂	4.0×10^{-3}	0.24967220
Ar	4.2×10^{-3}	0.26215581
Cl ₂	2.1×10^{-5}	0.00131078
CO ₂	5.2×10^{-4}	0.03245739
CCl ₄	6.6×10^{-9}	0.00000041
Presión Total	1.6021×10^{-2}	1.00000000

De esta forma, el número de moles de gas presentes en la bala de muestra es:

$$n_s = \frac{(2.03 \text{at})(0.5 \text{lt})}{\left(0.08205 \frac{\text{at} \cdot \text{lt}}{\text{mol} \cdot ^\circ \text{K}}\right)(295^\circ \text{K})} \quad 5.2$$

$$n_s = 0.041933918 \text{ mol}$$

Es decir, entraron 0.0419 moles de gas a la bala en 10 segundos, por lo tanto, el número de moles por segundo es:

$$n_s = 0.0041933918 \text{ mol/s}$$

Pero como la fracción mol de CCl_4 , determinada por espectrometría de masas es 4.11×10^{-7} , entonces los moles de CCl_4 en la corriente de gas es:

$$n_s = 1.723484 \times 10^{-9} \text{ mol/s}$$

Por otro lado, el número de moles por segundo de alimentación es:

$$n_a = \frac{(0.083333 \text{ ml/s})(1595 \text{ g/ml})}{153.84 \text{ g/mol}} \quad 5.3$$

Es decir,

$$n_a = 8.6399255 \times 10^{-4} \text{ mol/s}$$

De esta forma, con la ecuación 5.1, se calcula la eficiencia de la degradación del residuo problema, la cual queda de la forma:

$$\eta = \frac{8.6399255 \times 10^{-4} - 1.723484 \times 10^{-9}}{8.6399255 \times 10^{-4}} \times 100 \quad 5.4$$

Por lo tanto,

$$\eta = 99.999800 \%$$

Procediendo de la misma forma que en el ejemplo mostrado, se calcularon todas las eficiencias de degradación para cada uno de los residuos tratados. La Tabla 5.10 resume los porcentajes de eficiencia para cada uno de los experimentos.

Tabla 5.10. Resumen de las Condiciones de Toma de Muestra de Gases y Eficiencia de Degradación para el CCL₄.

PESO MOLECULAR, PM (g/mol)	153.84				
DENSIDAD, ρ (g/ml)	1.595				
EXPERIMENTO	1	2	3	4	5
ALIMENTACIÓN DE RESIDUO (ml/min)	2.5	2.2	5.0	5.0	0.6
PRESIÓN DE VACÍO, P ₁ (at)	0.668	0.668	0.668	0.668	0.668
PRESIÓN DE LLENADO, P ₂ (at)	1.10	1.20	1.36	1.22	1.20
VOLUMEN DE LA BALA, V (lt)	0.5	0.3	0.5	0.5	0.3
TEMPERATURA, T (°K)	293	293	295	295	280
TIEMPO DE TOMA DE MUESTRA, t (s)	7	8	10	10	5
EFICIENCIA (%)	99.999873	99.999902	99.999800	99.999925	99.999980

De la misma forma, en las Tablas 5.11 y 5.12 se resumen las condiciones en las cuales se tomo las muestras de gases en las balas, así como las eficiencias de degradación calculadas para el benceno y el tetracloroetileno, respectivamente.

Tabla 5.11. Resumen de las Condiciones de Toma de Muestra de Gases y Eficiencia de Degradación para el C₆H₆.

PESO MOLECULAR, PM (g/mol)	78.11		
DENSIDAD, ρ (g/ml)	0.879		
EXPERIMENTO	1	2	0.5
ALIMENTACIÓN DE RESIDUO (ml/min)	2.0	2.5	5.0
PRESIÓN DE VACÍO, P ₁ (at)	0.668	0.668	0.668
PRESIÓN DE LLENADO, P ₂ (at)	0.25	0.00	0.25
VOLUMEN DE LA BALA, V (lt)	0.5	0.5	0.3
TEMPERATURA, T (°K)	301	301	295
TIEMPO DE TOMA DE MUESTRA, t (s)	15	15	10
EFICIENCIA (%)	99.999165	99.999802	99.999902

Tabla 5.12. Resumen de las Condiciones de Toma de Muestra de Gases y Eficiencia de Degradación para el C_2Cl_4 .

PESO MOLECULAR, PM (g/mol)	78.11	
DENSIDAD, ρ (g/ml)	0.879	
EXPERIMENTO	1	2
ALIMENTACIÓN DE RESIDUO (ml/min)	0.7	0.9
PRESIÓN DE VACÍO, P_1 (at)	0.668	0.668
PRESIÓN DE LLENADO, P_2 (at)	0.041	0.021
VOLUMEN DE LA BALA, V (lt)	0.5	0.5
TEMPERATURA, T (°K)	288	288
TIEMPO DE TOMA DE MUESTRA, t (s)	7	7
EFICIENCIA (%)	99.999915	99.9999802

Por otro lado, para el caso de la de los experimentos con aceite lubricante, los cálculos de eficiencia de degradación, se realizaron con el espectrómetro de masas de gases residuales MKS RESIDUAL GAS, conectado en línea de forma tal que el monitoreo se puede realizar con un retraso de 15 segundos entre el punto de toma de muestra y el espectrómetro de masas, es decir se puede realizar prácticamente en tiempo real.

Para esto, el espectrómetro cuenta con un tubo capilar de acero inoxidable de 2 m por 1/16 plg, en forma de rizo, con el fin de mantener una gran caída de presión en la alimentación y evitar que el cuadrupolo se dañe, ya que este trabaja a presiones tan reducidas como 10^{-6} torr. Cuenta además, con una válvula micrométrica marca BALZERS modelo 010 H1, la cual es usada para controlar el flujo de gas que entra en el cuadrupolo.

Como ejemplo ilustrativo de este procedimiento se realizaron los cálculos de la primera corrida de degradación de aceite, en donde los parámetros de operación fueron:

Alimentación de Residuo: 4.0 ml/min.

Presión a la Entrada de la Válvula Micrométrica (P_1): 0.668 at.

Escala de la Válvula Micrométrica: 0 revoluciones 40 unidades de revolución.

Caudal de Gas Alimentado al Cuadrupolo: 0.2 mbar lt/s (1.97×10^{-4} at lt/s).

Temperatura: 38 °C = 310 °K.

Densidad²² del Aceite Comercial (ρ): 0.928 g/ml.

Peso Molecular²² del Aceite Comercial (PM): 320 g/molg.

La fracción mol de los principales compuestos encontrados en los gases a la salida del intercambiador de calor, se muestran en la Tabla 5.13.

Tabla 5.13. Fracción Mol de los Gases Residuales a la Salida del Intercambiador de Calor Durante la Degradación de Aceite Comercial.

COMPUESTO	PRESION PARCIAL	FRACCION MOL
H ₂	5.0×10^{-8}	2.36×10^{-3}
C	2.0×10^{-8}	9.45×10^{-4}
CH ₄	6.0×10^{-7}	2.83×10^{-2}
H ₂ O	2.0×10^{-6}	9.45×10^{-2}
CO	1.0×10^{-6}	4.72×10^{-2}
O ₂	7.0×10^{-6}	3.31×10^{-1}
Ar	1.0×10^{-3}	4.72×10^{-1}
CO ₂	5.0×10^{-7}	2.36×10^{-2}
ACEITE	1.0×10^{-12}	4.72×10^{-8}
Presión Total	2.1170001×10^{-3}	1.00000000

Tomando como referencia el Argón por ser un gas inerte, entonces, la relación aceite/Argón a la salida del intercambiador es:

$$\frac{\text{mol de aceite}}{\text{mol de argon}} = \frac{4.72 \times 10^{-8}}{3.31 \times 10^{-1}} \quad 5.5$$

$$\frac{\text{mol de aceite}}{\text{mol de argon}} = 1.427275 \times 10^{-7}$$

22 Himmelblau D. Principios y Cálculos Básicos de la Ingeniería Química. 1982. Pag. 424-432.

Por otro lado, los moles de aceite y argón en la alimentación son, respectivamente:

$$\text{mol de aceite} = \frac{\left(4 \frac{\text{ml}}{\text{min}}\right) \left(0.928 \frac{\text{g}}{\text{ml}}\right)}{\left(320 \frac{\text{g}}{\text{mol}}\right)} \quad 5.6$$

$$\text{mol de aceite en la alimentación} = 0.0116 \text{ molg/min}$$

$$\text{mol de argon} = \frac{(14 \text{ lt})(1.36 \text{ at})}{\left(0.08205 \frac{\text{at lt}}{\text{mol}^\circ\text{K}}\right)(288^\circ\text{K})} \quad 5.7$$

$$\text{mol de argón} = 0.805748 \text{ molg/min}$$

por lo tanto, la relación aceite/argón en la alimentación es:

$$\frac{\text{mol de aceite}}{\text{mol de argon}} = \frac{0.0116}{0.805748} \quad 5.8$$

$$\frac{\text{mol de aceite}}{\text{mol de argon}} = 0.014396561$$

De esta forma, la eficiencia de la degradación para el aceite comercial es:

$$\eta = \frac{0.014396561 - 1.427275 \times 10^{-7}}{0.014396561} \times 100 \quad 5.9$$

Por lo tanto,

$$\eta = 99,999008 \%$$

De esta forma, se calcularon todas las eficiencias de degradación para cada una de las corridas con aceite. La Tabla 5.14 resume los porcentajes de eficiencia para cada uno de los experimentos, así como las condiciones a las cuales se trabajó el espectrómetro de masas.

Tabla 5.14. Resumen de las Condiciones del Espectrómetro de Masas MKS y Eficiencia de Degradación para el Aceite Comercial.

EXPERIMENTO	1	2	3
ALIMENTACIÓN DE RESIDUO (ml/min)	4.0	4.7	6.0
PRESIÓN EN LA VÁLVULA MICROMÉTRICA, P ₁ (at)	0.668	0.668	0.668
ESCALA DE LA VÁLVULA MICROMÉTRICA (rev).	0,40	0,40	0,40
CAUDAL DE GAS EN EL CUADRUPOLO (mbar lt/s)	0.2	0.2	0.2
TEMPERATURA, T (°K)	310	315	305
EFICIENCIA (%)	99.999008	99.999422	99.999210

Es importante resaltar los altos porcentajes de eficiencia de degradación que se lograron en todos los experimentos, ya que fueron superiores a 99.999% en todos los casos.

Por otra parte, con estos resultados numéricos y los obtenidos cuantitativamente a partir de la interpretación de los espectros de masas, se demuestra la capacidad que tiene el plasma térmico para degradar una gran variedad de residuos peligrosos.

5.5. BALANCE DE MATERIA Y DE ENERGIA DEL EQUIPO EXPERIMENTAL.

Con la finalidad de tener valores de referencia que muestren el comportamiento del equipo experimental de degradación de residuos peligrosos, se realizó un balance de materia y

energía, considerando una de las corridas de degradación de aceite comercial. Los resultados se muestran en la Figura 5.5.

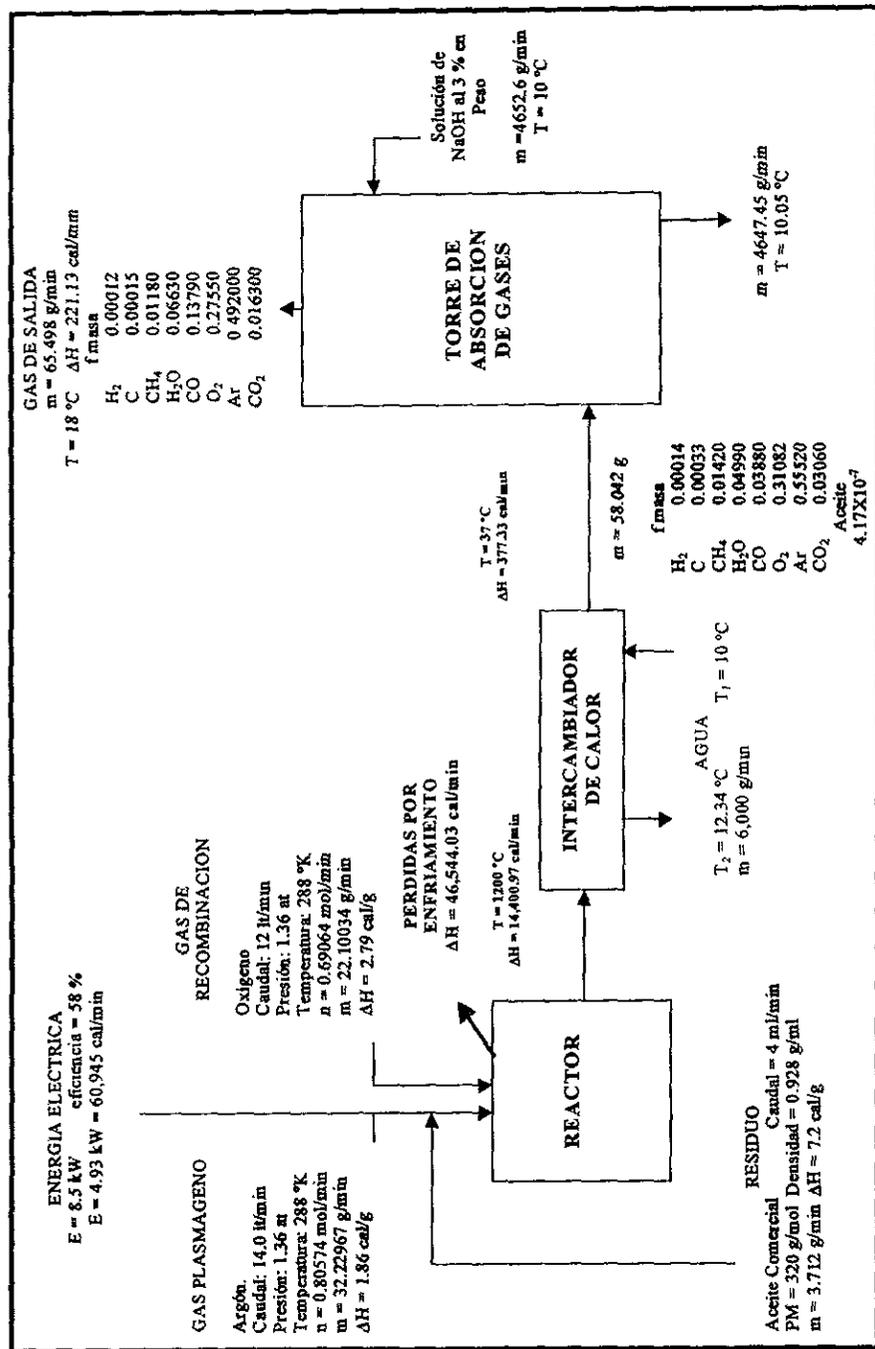


Fig. 5.5. Balance de Materia y Energía del Equipo Durante la Degradación de Aceite Comercial.

CONCLUSIONES

Es evidente que la generación y disposición de residuos es un problema que aumenta día con día en el país, debido a varias razones, entre las que destacan la poca educación en materia de contaminación ambiental con la que cuenta la población así como la industria en general; la poca e insuficiente infraestructura con la que cuenta el país para la disposición y tratamiento de los residuos generados y la reducida legislación ambiental por parte de las autoridades responsables. Con esto, cualquier método de manejo, tratamiento y/o disposición propuesto, que cumpla con los requisitos de seguridad y las regulaciones ambientales nacionales e internacionales, es una buena opción que ayudará de manera significativa a solucionar el problema de la acumulación de residuos en el país.

El método de degradación de residuos peligrosos propuesto, consistió básicamente en la utilización de una antorcha de plasma térmico como una fuente concentrada de energía para la desintegración de las moléculas que componen los residuos, y su operación permitió convertirlos prácticamente en átomos libres, los cuales al enfriarse súbitamente se recombinan en compuestos no tóxicos.

De esta forma, los estudios presentados en este trabajo permiten apreciar el comportamiento eléctrico y térmico de la antorcha de plasma, en corrientes que fluctúan de 40 a 190 amp, tensiones de 31 a 19 volt y gastos de 0.864, 1.31, 1.95 y 2.952 m³/h; demostrando su capacidad para la degradación por plasma de moléculas modelo como, CCl₄, C₆H₆, C₂Cl₄ y aceite comercial, representantes de residuos peligrosos.

En lo que respecta a la caracterización del comportamiento eléctrico, se puede concluir que para un flujo de gas dado, a medida que se aumenta la corriente, el gas plasmágeno se vuelve más conductor, ya que se produce una mayor ionización en las moléculas, lo cual trae como consecuencia la disminución del voltaje del arco. Mientras que al aumentar el gasto de gas, se aumenta la resistencia del medio al existir más moléculas que se deben de ionizar, lo que se refleja en un aumento en el voltaje del arco. Es decir, para aplicaciones en las cuales se necesita tener una potencia eléctrica elevada, se debe mantener intensidades de corriente altas, con gastos de gas plasmágeno elevados. Este comportamiento también se vio reflejado en las

ecuaciones de correlación clásica que se encontraron en el trabajo, ya que se puede observar cómo los exponentes de las variables corriente y gasto aumentan a medida que aumenta el gasto de gas empleado. No obstante, en el exponente de la corriente para la segunda ecuación (gasto de $1.310 \text{ m}^3/\text{h}$), se observa que no disminuye conforme lo hace el gasto, si se compara con la primera y la tercera ecuación (0.864 y $1.950 \text{ m}^3/\text{h}$, respectivamente), lo cual es debido a los problemas de estabilización de la potencia del plasma en ese experimento. Por otro lado, los valores del coeficiente de correlación calculados para cada una de las ecuaciones varían de 0.90 a 0.97 , y las desviaciones estándar de 2.08 a 4.15 , lo que demuestra que los modelos ajustados son buenos.

Sin embargo, no obstante que el modelo de correlación clásica es fácil de utilizar, el alcance de este fue muy limitado, ya que sólo incluye parámetros de potencia eléctrica y de gasto de gas plasmágeno; por lo tanto, se desarrolló también, un modelo más general en números adimensionales, el cual involucró propiedades del gas y características geométricas de la antorcha. El modelo encontrado mostró valores de coeficiente de correlación de 0.99 y de desviación estándar de 1.66 , lo cual indica que la ecuación ajustada es excelente. En esta ecuación se observó que la evolución de la resistencia eléctrica es inversamente proporcional a la potencia proporcionada por efecto Joule y a las fuerzas de inercia e inversamente proporcional a las fuerzas viscosas del fluido.

Por otro lado, se desarrolló el modelo de la eficiencia térmica con el fin de conocer el grado en el cual la antorcha de plasma transforma la energía eléctrica en energía en forma de plasma. En este caso, la ecuación calculada tuvo un coeficiente de correlación de 0.985 y un error estándar de 0.10 , con lo cual se consideró un excelente ajuste. En esta ecuación se observó que la evolución de la eficiencia térmica y por tanto de la entalpía promedio del plasma, es proporcional a la potencia por efecto Joule, a las fuerzas viscosa y a la difusividad térmica del fluido e inversamente proporcional a las fuerzas de inercia, y a la difusividad de cantidad de movimiento.

Con respecto a los experimentos de degradación se concluye que el proceso con plasma térmico es eficaz para la degradación de residuos peligrosos, ya que en todos los experimentos realizados, la eficiencia de degradación fue superior a 99.9998 %; y las normas ambientales de Nacionales e Internacionales como las de Environmental Protection Agency (EPA), indican que para que un proceso de tratamiento de residuos pueda considerarse efectivo debe tener al menos, un 99.99% de eficiencia en la degradación del componente principal; y como es evidente, el plasma térmico lo logró holgadamente.

Además, los resultados mostraron que la degradación de residuos por medio del plasma es completa, ya que como se esperaba, las moléculas de los residuos peligrosos fueron desintegradas en sus partículas constitutivas, las cuales por medio de un cambio súbito de temperatura, se recombinaron en compuestos de masa atómica pequeña, formando gases compuestos principalmente de CO, CO₂, H₂O, HCl, H₂, CH₄, Ar, O₂, N₂, N₂O, y NO. También se observó que la ceniza formada durante el proceso está compuesta principalmente de carbón, con pequeñas trazas de metales, los cuales quedan adheridos a las paredes del crisol y del reactor; esto es un indicio de que en el momento que el proceso se encuentre degradando aceites gastados con un alto contenido de metales, estos eventualmente se fundirán y se solidificarán en las paredes del reactor, evitando con esto salir a la atmósfera.

Es importante mencionar que este equipo es el primero y el único a base de plasma térmico que ha sido diseñado y construido en el País y que estos son los primeros experimentos de degradación que se llevan a cabo. Es claro que falta realizar estudios de degradación sobre otro tipo de residuos como pueden ser los pesticidas y fungicidas, lodos contaminados, residuos radiactivos, entre otros; además de realizar estudios de optimización de parámetros de operación como puede ser la potencia de la antorcha de plasma en función del tipo de residuo a tratar, el tipo o la mezcla de gas plasmágeno que se debe de utilizar en función del tipo de residuo, la relación que existe entre la cantidad de residuo alimentado y la eficiencia de degradación para diferentes condiciones de potencias, entre otros.

Finalmente, se puede decir que el objetivo general del trabajo fue logrado, ya que se realizó la instalación completa del equipo experimental de degradación de residuos peligrosos, el cual puede operar de manera continua y analizar el efluente gaseoso en tiempo real, además de determinar el comportamiento eléctrico y térmico de la antorcha de plasma, la cual ha servido para establecer las condiciones de operación durante los experimentos y por último, demostrar que el proceso de plasma térmico es una tecnología que muestra amplias posibilidades para el tratamiento de residuos peligrosos como los bifenil policlorados, entre otros.

ANEXOS

ANEXO 1

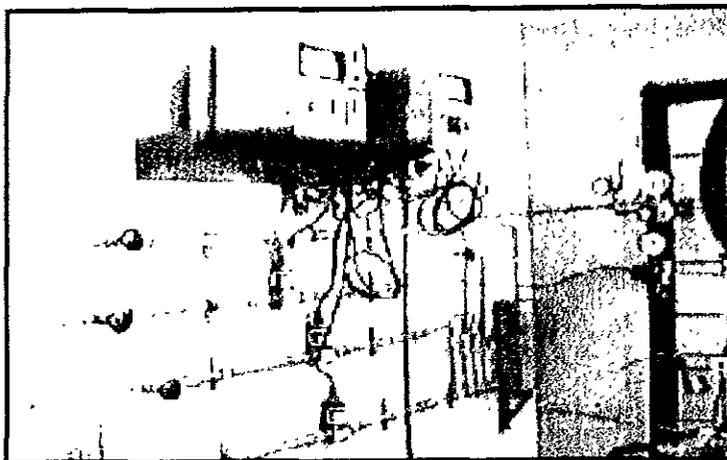


Fig. A.1. Sistema Mezclador de Gas Plasmágeno

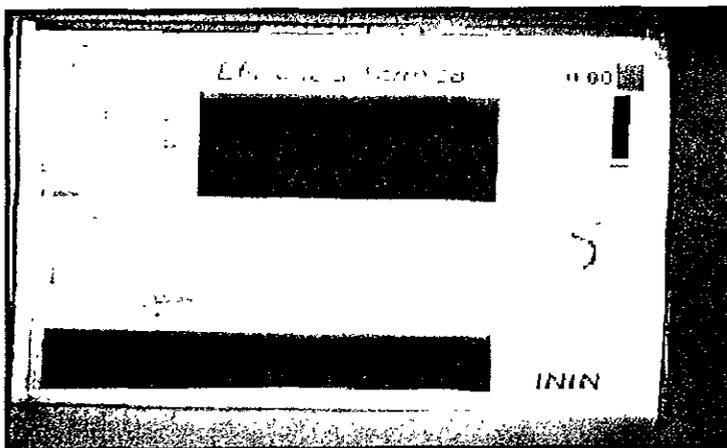


Fig. A.2. Imagen de la Pantalla para Monitoreo de las Condiciones de Operación Durante la Caracterización de la Antorcha de Plasma Térmico.

ANEXO 2

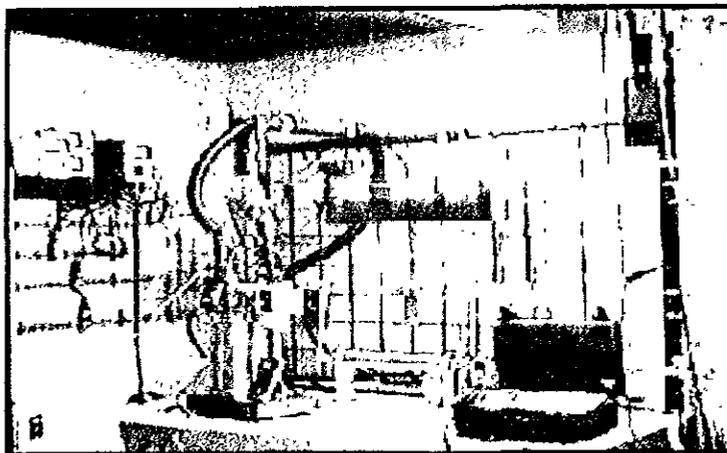


Fig. A.3. Equipo de Degradación de Residuos Peligrosos por Plasma Térmico.

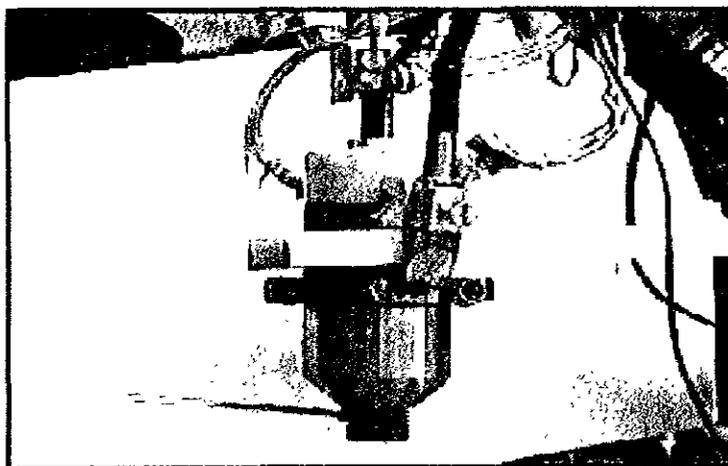


Fig. A.4. Cañón de Plasma Térmico Utilizado en la Degradación de Residuos Peligrosos.

ANEXO 3

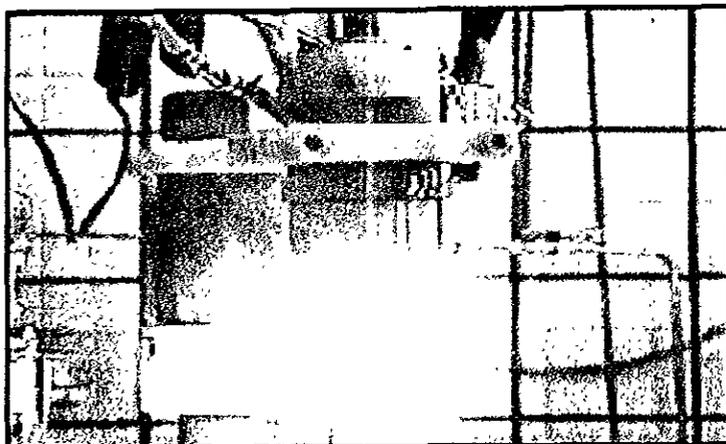


Fig. A.5. Cañón de Plasma Térmico Operando.

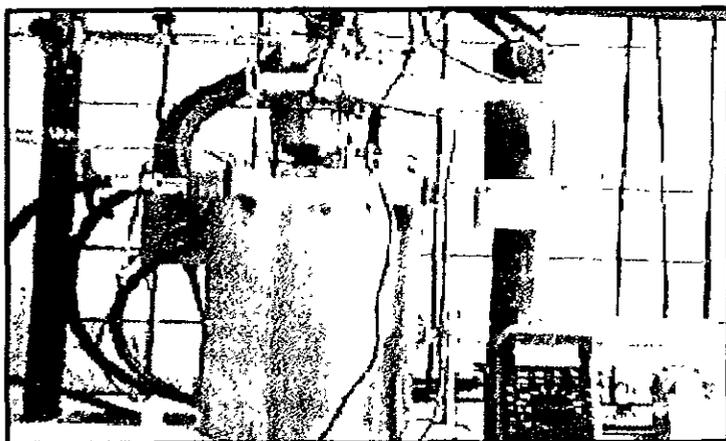


Fig. A.6. Reactor de Pirólisis.

ANEXO 4

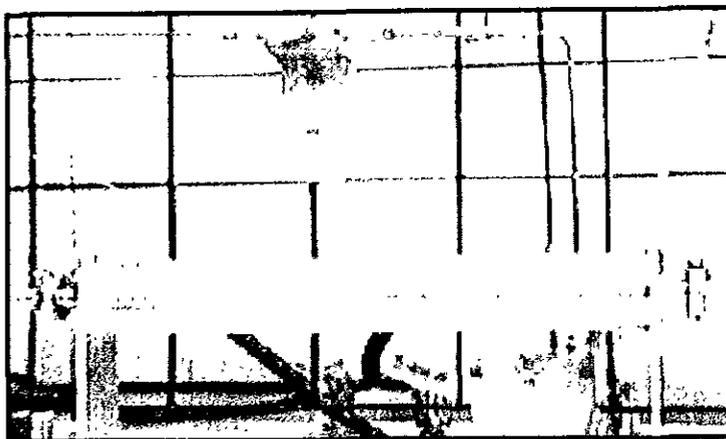


Fig. A.7. Intercambiador de Calor.



Fig. A.8. Torre de Absorción de Gases.

ANEXO 5

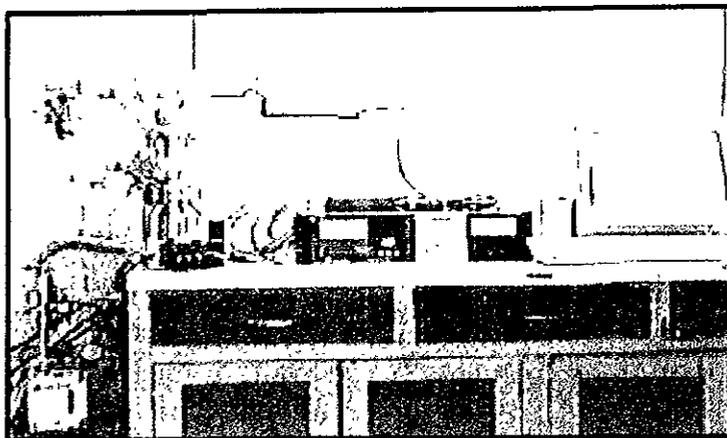


Fig. A.9. Equipo Analizador de Gas Residual MKS PPT 300 EM.

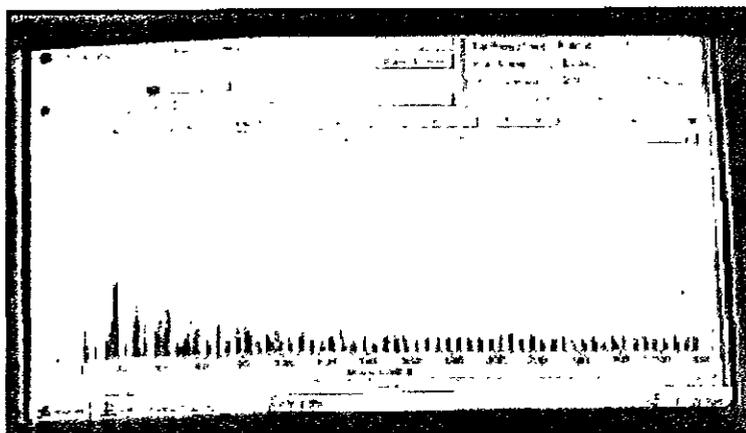


Fig. A.10. Espectro de Masas Típico del Gas Residual.

ANEXO 6

Tabla A.1. Presiones Parciales en la Espectrometría de Masas de los Gases a la Salida del Intercambiador de Calor Durante la Degradación de C_6H_6

PRESION PARCIAL EMUL 1.20 KV UNIDAD 1			3.21 SEG N T/MA 5.0	1.0×10^{-4} TORR
COMPUESTO/MASA	FACTOR	TORR		
Hidrógeno	2.319	3.1×10^{-6}		
Helio	7.143	7.2×10^{-8}		
Agua	1.333	1.7×10^{-4}		
N_2 / CO	1.000	4.8×10^{-5}		
Oxígeno	1.053	4.0×10^{-3}		
Argón	0.947	4.2×10^{-3}		
34	1.000	1.1×10^{-6}		
36	1.000	7.5×10^{-5}		
78	1.000	4.2×10^{-9}		
38	1.000	6.1×10^{-6}		
22	1.000	3.0×10^{-6}		
44	1.000	2.3×10^{-4}		

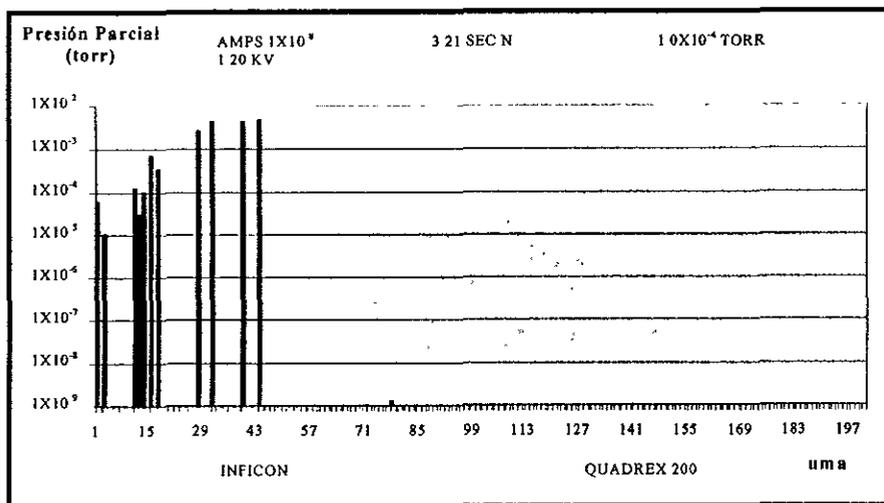


Fig. A.11. Espectro de Masas de los Gases a la Salida del Intercambiador de Calor Durante la Degradación de C_6H_6 .

ANEXO 7

Tabla A.2. Presiones Parciales en la Espectrometría de Masas de los Gases a la Salida de la Torre de Absorción de Gases Durante la Degradación de C_6H_6 .

PRESIÓN PARCIAL		
EMUL 1.90 KV	0.815 SEG N	5.0×10^{-5} TORR
UNIDAD 1	T/MA 5.0	
COMPUESTO/MASA	FACTOR	TORR
Hidrógeno	2.319	5.9×10^{-3}
Helio	7.143	9.8×10^{-3}
Agua	1.333	3.2×10^{-4}
N_2 / CO	1.000	2.4×10^{-3}
Oxígeno	1.053	4.0×10^{-3}
Argón	0.947	4.2×10^{-3}
12	1.000	1.2×10^{-4}
16	1.000	6.6×10^{-4}
78	1.000	1.1×10^{-9}
14	1.000	1.0×10^{-4}
22	1.000	2.1×10^{-6}
44	1.000	4.3×10^{-3}

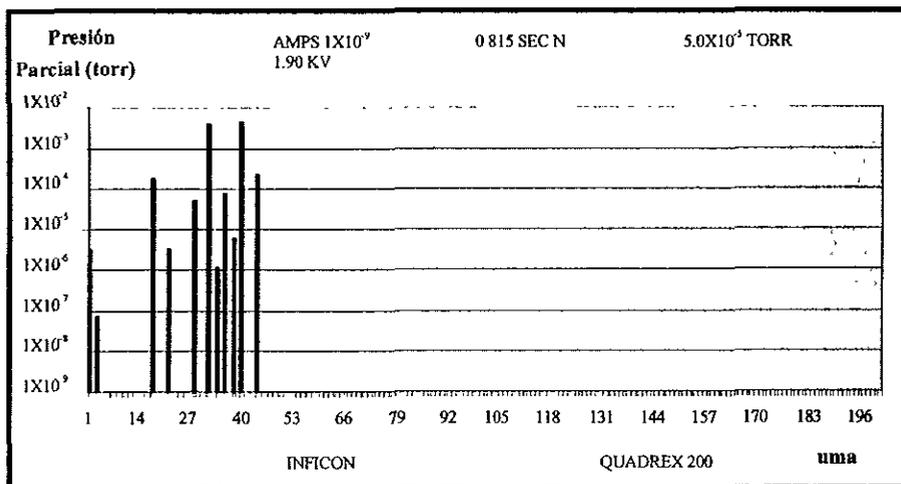


Fig. A.12. Espectro de Masas de los Gases a la Salida de la Torre de Absorción Durante la Degradación de C_6H_6 .

ANEXO 8

Tabla A.3. Presiones Parciales en la Espectrometría de Masas de los Gases a la Salida del Intercambiador de Calor Durante la Degradación de C_2Cl_4 .

PRESION PARCIAL EMUL 1.20 KV UNIDAD 1			3.21 SEG N T/MA 5.0	1.0X10 ⁻⁴ TORR
COMPUESTO/MASA	FACTOR	TORR		
Hidrógeno	2.319	3.4 X 10 ⁻⁶		
Helio	7.143	5.1 X 10 ⁻⁹		
Agua	1.333	3.9 X 10 ⁻⁴		
N ₂ / CO	1.000	3.4 X 10 ⁻³		
Oxígeno	1.053	4.0 X 10 ⁻³		
Argón	0.947	4.2 X 10 ⁻³		
1	1.000	3.9 X 10 ⁻³		
12	1.000	7.4 X 10 ⁻⁶		
16	1.000	5.4 X 10 ⁻⁴		
35	1.000	3.5 X 10 ⁻¹⁰		
44	1.000	1.8 X 10 ⁻⁴		
164	1.000	1.1 X 10 ⁻⁹		

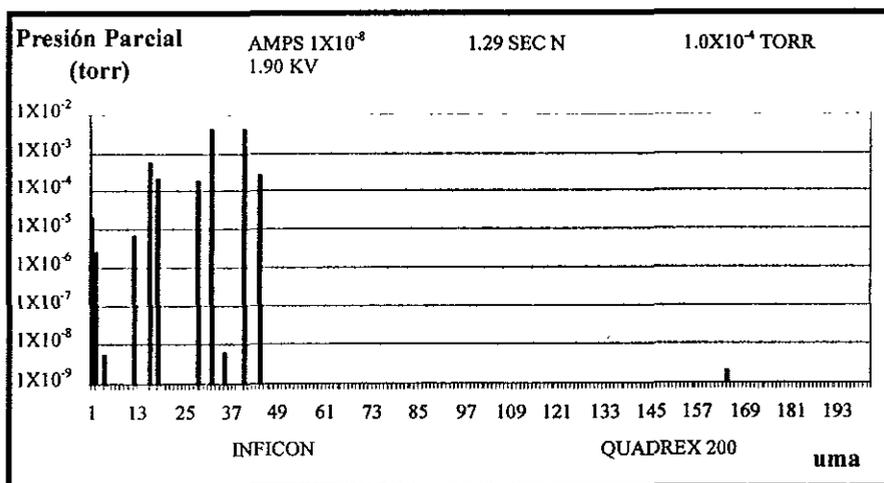


Fig. A.13. Espectro de Masas de los Gases a la Salida del Intercambiador de Calor Durante la Degradación de C_2Cl_4 .

ANEXO 9

Tabla A.4. Presiones Parciales en la Espectrometría de Masas de los Gases a la Salida de la Torre de Absorción Durante la Degradación de C_2Cl_4 .

PRESION PARCIAL EMUL 1.90 KV UNIDAD 1			1.29 SEG N T/MA 5.0	1.0×10^{-4} TORR
COMPUESTO/MASA	FACTOR	TORR		
Hidrógeno	2.319	2.6×10^{-6}		
Helio	7.143	1.0×10^{-8}		
Agua	1.333	2.0×10^{-4}		
N_2 / CO	1.000	3.4×10^{-3}		
Oxígeno	1.053	4.0×10^{-3}		
Argón	0.947	4.2×10^{-3}		
1	1.000	2.3×10^{-5}		
12	1.000	3.9×10^{-6}		
16	1.000	5.0×10^{-4}		
35	1.000	1.3×10^{-9}		
44	1.000	1.3×10^{-4}		
164	1.000	4.4×10^{-10}		

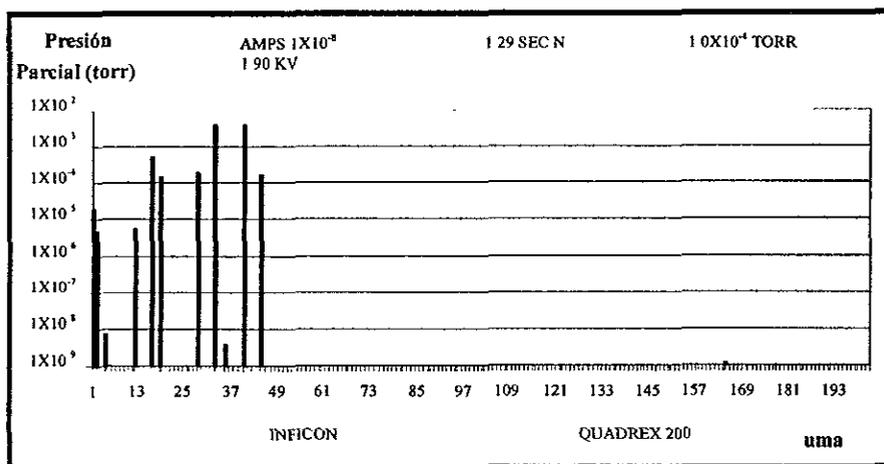


Fig. A.14. Espectro de Masas de los Gases a la Salida de la Torre de Absorción de Gases Durante la Degradación de C_2Cl_4 .

ANEXO 10

Tabla A.5. Presiones Parciales en la Espectrometría de Masas de los Gases a la Salida del Intercambiador de Calor Durante la Degradación de Aceite Comercial.

PRESION PARCIAL ECU VERSION 7.2		RESIDUAL GAS				PPT TYPE 300 EM	
MASA	PRESION PARCIAL TORR	MASA	PRESION PARCIAL TORR	MASA	PRESION PARCIAL TORR	MASA	PRESION PARCIAL TORR
1	1.0×10^{-07}	25	6.0×10^{-09}	41	3.0×10^{-08}		
2	5.0×10^{-08}	26	3.0×10^{-08}	42	5.0×10^{-08}		
3	1.0×10^{-09}	27	4.0×10^{-08}	43	5.0×10^{-07}		
7	1.0×10^{-09}	28	1.0×10^{-06}	44	5.0×10^{-07}		
12	2.0×10^{-08}	29	5.0×10^{-08}	45	1.0×10^{-08}		
13	1.0×10^{-08}	30	6.0×10^{-08}	46	5.0×10^{-09}		
14	1.0×10^{-07}	31	8.0×10^{-09}	47	1.0×10^{-09}		
15	2.0×10^{-07}	32	7.0×10^{-06}	48	1.0×10^{-09}		
16	6.0×10^{-07}	33	1.0×10^{-08}	51	1.0×10^{-09}		
17	6.0×10^{-07}	34	5.0×10^{-08}	52	1.0×10^{-09}		
18	2.0×10^{-06}	36	1.0×10^{-07}	53	3.0×10^{-09}		
19	2.0×10^{-08}	37	1.0×10^{-08}	55	5.0×10^{-09}		
20	5.0×10^{-06}	38	4.0×10^{-08}	56	3.0×10^{-09}		
21	1.0×10^{-09}	39	4.0×10^{-08}	57	9.0×10^{-09}		
22	1.0×10^{-08}	40	1.0×10^{-05}	300	1.0×10^{-12}		

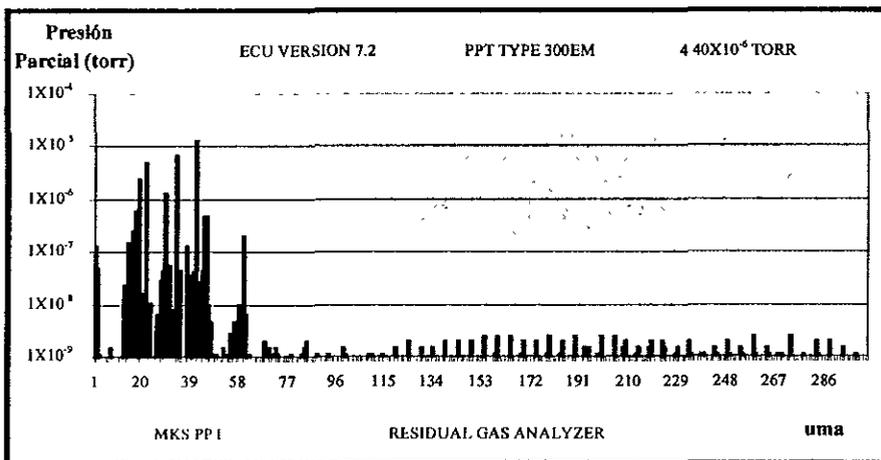


Fig. A.15. Espectro de Masas de los Gases a la Salida del Intercambiador de Calor Durante la Degradación de Aceite Comercial.

ANEXO II

Tabla A.6. Presiones Parciales en la Espectrometría de Masas de los Gases a la Salida de la Torre de Absorción Durante la Degradación de Aceite Comercial.

PRESION PARCIAL ECU VERSION 7.2 MKS		RESIDUAL GAS				PPT TYPE 300 EM	
MASA	PRESION PARCIAL TORR	MASA	PRESION PARCIAL TORR	MASA	PRESION PARCIAL TORR	MASA	PRESION PARCIAL TORR
1	1.0×10^{-7}	28	4.0×10^{-6}	44	3.0×10^{-7}		
2	5.0×10^{-8}	29	8.0×10^{-8}	45	7.0×10^{-9}		
12	1.0×10^{-8}	30	5.0×10^{-8}	46	1.0×10^{-9}		
13	1.0×10^{-8}	31	7.0×10^{-9}	52	2.0×10^0		
14	4.0×10^{-7}	32	7.0×10^{-6}	55	5.0×10^0		
15	4.0×10^{-7}	33	1.0×10^{-8}	56	2.0×10^0		
16	6.0×10^{-7}	34	5.0×10^{-5}	57	1.0×10^{-8}		
17	7.0×10^{-7}	36	1.0×10^{-7}	58	3.0×10^{-7}		
18	3.0×10^{-6}	37	2.0×10^{-8}	59	9.0×10^{-9}		
19	2.0×10^{-8}	38	4.0×10^{-8}	67	1.0×10^{-9}		
20	5.0×10^{-6}	39	5.0×10^{-8}	71	2.0×10^{-9}		
22	4.0×10^{-9}	40	1.0×10^{-5}	77	1.0×10^{-9}		
25	1.0×10^{-8}	41	3.0×10^{-8}	81	2.0×10^{-9}		
26	4.0×10^{-8}	42	6.0×10^{-8}	97	1.0×10^{-9}		
27	6.0×10^{-8}	43	7.0×10^{-7}	300	1.0×10^{-14}		

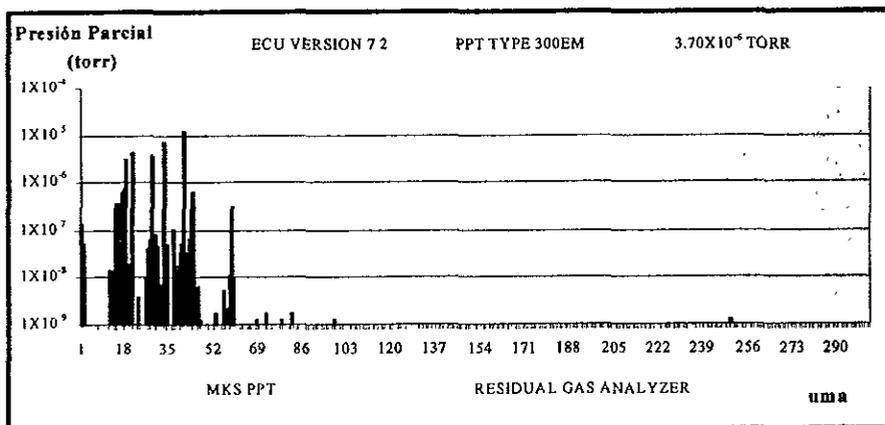


Fig. A.16. Espectro de Masas de los Gases a la Salida de la Torre de Absorción Durante la Degradación de Aceite Comercial.

BIBLIOGRAFIA

1. Balzers Components Catalog. Balzers. 1985.
2. Bird R.B., Stewart W.E., Lightfoot E.N. Fenómenos de Transporte. Ed. Reverté. 1982.
3. Bonizzoni G. Plasma Arc Technology for Toxic Waste Treatment and Metal Production. Istituto di Fisica del Plasma. CNR. 1993.
4. Boulos Maher I. Thermal Plasma Processing. IEEE Transactions on Plasma Science. Vol 19 No. 6. 1991.
5. Brillhac J.F., Pateyron B., Fauchais P. Investigation of the Thermal Characteristics of D.C. Vortex Plasma Torches. 3rd. European Congress on Thermal Plasma Processes. 1994.
6. Brillhac J.F., Pateyron B., Fauchais P., Bouvier A., Pasquini P., Jestin L. Dimensionless Relationship to Calculate Arc Characteristics in a Vortex D.C. Plasma Torch. Journal of High Temperature Chemical Processes. No. 3. Vol. 1. 1992.
7. Bustani Alberto. Generation of Hazardous Waste in Mexico. Curso-Taller: Manejo y Disposición de Residuos Peligrosos. UNAM. 1994.
8. Chávez G. H., Quijano H. R. Residuos Peligrosos: Manejo y Tratamiento de Bifenilos Policlorados (BCP's). Tesis de Licenciatura UNAM. 1995.
9. Cota S.G., Pacheco S.J., Peña E.R., Cruz A.A. Equipo Experimental para Estudios de Degradación de Muestras de Residuos Peligrosos por Plasma Térmico. Informe Técnico CA-95-05. ININ. 1995.
10. Díaz Zagal S. Fuente de Alimentación Controlada para la Generación de un Plasma. Tesis de Licenciatura. ITT. 1996.
11. Domínguez Anaya C.E. Datos de Seguridad de Policlorodifenilos. Informe Técnico CA-95-02. ININ. 1995.
12. Freeman H.M., Olexsey R.A., Oberacker D.A., Mournighan R.E. Thermal Destuction of Hazardous Waste. A State of Art Reviw. Jornal of Hazardous Materials. 1987.

13. Gibbons Natrella M. Experimental Statistics. National Bureau of Standards. United States Department of Commerce. 1963.
14. Heberlein J.V.R. Thermal Plasmas for the Destruction of Hazardous Wastes. Industrial Applications on Plasma Physics. 1993.
15. Himmelblau David M. Principios y Cálculos Básicos de la Ingeniería Química. CECSA. 1982.
16. Hougen O.A., Watson K.M., Ragatz R.A. Principios de los Procesos Químicos. Parte 1. Ed. Reverté. 1978.
17. Joseph M.F., Barton T.G., Vorndran S.C. Incineration of PCB's by Plasma Arc. 1993.
18. Kassabji F., Meunier R., Coevoet M. Comportement de Torches à Plasma Industrielles à Arc Soufflé avec Différents Types de Gaz. Journal of High Temperature Chemical Processes. No.3. Vol. 1. 1992.
19. Kostic Z.G., Pavlovic P.B., Stefanovic P.Lj., Sikmanovic S.D. Thermodynamic Consideration of Polychlorinated Biphenyls Decomposition in Thermal Plasma. 3rd. European Congress on Thermal Plasma Processes. 1994.
20. Lachmann J., Börger I., Kleffe R. Decomposition of Chlorinated and Fluorinated Hydrocarbons in Plasma Jets. 3rd. European Congress on Thermal Plasma Processes. 1994.
21. Laroche Giles. Les Plasma dans L'Industrie. Electricité de France. 1991.
22. McCoy Drew E. Standard Handbook of Hazardous Waste Treatment and Disposal. Section 4.2. PCB Wastes. Freeman H.M Editor. 1989.
23. Mendenhall W., Scheaffer R.L. Mathematical Statistics with Applications. Duxbury Press. 1973.
24. Mills Anthony F. Transferencia de Calor. Ed. Irwin. 1995
25. Mosse A., Kusnetsov G., Hebecker D. Conversion of Liquid Toxic Waste by Means of a Plasma Reactor. 3rd. European Congress on Thermal Plasma Processes. 1994.
26. Norma Oficial Mexicana. NOM-CPR-001-ECOL/1993. Que Establece las Característica de los Residuos Peligrosos, el Listado de los Mismos y los Límites que Hacen a un Residuo Peligrosos por su Toxicidad al Ambiente.
27. Olof J. E., Fauchais P., Heberlein J.V.R., Mac Rae D.R., Philbrook W.O., Skogberg J. Plasma Technology in Metallurgical Processing. Feinman J. Editor. J. Feinman and Associates, Inc. 1988.

28. Pacheco Pacheco M. Degradación de Moléculas Halogenadas por Plasma Térmico. Tesis de Licenciatura. ITT. 1998.
29. Peña Eguíluz L. Convertidor Resonante de Medio Puente para la Ignición de Plasma Térmicos. Tesis de Licenciatura. ITT. 1997.
30. Perry R.H., Green D.W. Chemical Engineers Handbook Sixth Edition. Mc Graw Hill. 1984.
31. Pfender E. Plasma Generation by Electric Arc-An Overview. Thermal Plasma Application in Materials and Metallurgical Processing. 1992.
32. Van Den Brock J. Ingénieriede l'Equipment Électrique des Torches à Plasma d'Arc Impliquées dans un Procédé. Journal of High Temperature Chemical Processes. No. 3. Vol. 1. 1992.