

**DESARROLLO DE CAÑONES GEMELOS DE PLASMA TERMICO.****AUTOR: ROSENDO PEÑA EGUILUZ****INSTITUCION: ININ****INTRODUCCION**

Las diferentes empresas e industrias de la transformación y de servicio que generen residuos peligrosos deberán implementar diversos programas para cumplir con los requisitos establecidos dentro de la actual normatividad. En lo referente al sector salud se deberán crear programas para degradar y disponer desechos de tipo biológico-infeccioso de manera que cumplan las normas^{[1][2]}. Ya que de acuerdo con el informe anual de SEDESOL en el país se generaron 525,885 toneladas diarias de residuos, de los cuales 465,500 son de origen industrial, 60,185 de origen municipal y 200 de origen hospitalario. De los residuos industriales 15,500 toneladas son consideradas como peligrosos (corrosivos, reactivos, explosivos, tóxicos, inflamables y/o biopatógenos). De esta cantidad solamente un 15% son dispuestos adecuadamente, el resto se presume que son mezclados con los no peligrosos o depositados en espacios sin control^[3].

Atendiendo a esta problemática en el Departamento de Estudios del Ambiente del Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ) se han estado desarrollando estudios, experimentos y desarrollos tecnológicos mediante la utilización de una antorcha de plasma térmico para degradar residuos peligrosos generados en centros hospitalarios y algunas industrias para posteriormente convenir su transferencia. De esta forma es como se contribuye a combatir en parte el problema de contaminación ambiental.

OBJETIVO GENERAL

A partir de la realización de una serie de pruebas de degradación para diversos materiales y componentes, mediante una antorcha de plasma térmico no transferido utilizado como una fuente de muy alta temperatura (15,000° C) y de transferencia de energía eficaz, se han obtenido resultados que indican que el proceso de degradación de residuos por plasma térmico constituye una alternativa interesante para la degradación de residuos peligrosos, ya que debido a su alto poder calorífico se logra que las moléculas formadas en el gas de pirólisis sean no tóxicas al poseer una masa atómica baja, haciendo de ésta una tecnología limpia.

Sin embargo durante el proceso de degradación se presentan algunos inconvenientes que deben ser mejorados:

- a) La velocidad con la cual emerge el gas caliente del cañón es tan elevada que al dirigir el plasma a los residuos, éstos salen proyectados del contenedor, evitando establecer una degradación adecuada.
- b) El término de antorcha no transferida se refiere en parte, a que los residuos son degradados mediante la obtención de energía térmica a partir del gas calentado mediante el cañón y de manera implícita el rendimiento del mismo es reducido comparado a una antorcha de tipo transferido.
- c) El prototipo de cañón con el que se cuenta actualmente no tiene la posibilidad de introducir un gas de blindaje (para proteger cátodos construidos con materiales altamente oxidables), una entrada de gases o líquidos en el eje de revolución, considerando una estructura cilíndrica (para atomizar líquidos o aceites a tratar), permitir incorporar polvos hacia el plasma en forma tangencial para su posterior proyección (en recubrimiento de superficies), un sistema mecánico o electromagnético para generar un vortex en el gas plasmático (evitando el desgaste irregular en los electrodos y extendiendo su vida útil) y por si fuera poco las conexiones eléctricas y de circulación de agua de enfriamiento no tienen una disposición adecuada para acoplarlo fácilmente al reactor del sistema.

Objetivo específico

Para solucionar estos inconvenientes se propone el diseño y construcción de una antorcha transferida de plasma térmico de doble cañón generada por arco eléctrico, con capacidad de 50kW, flujo de gas regulable de 0 a 50 l/min y rendimiento térmico superior al 85%.

DESARROLLO DEL PROYECTO

Un plasma es un medio parcial o totalmente ionizado que puede consistir en una mezcla de electrones, iones y especies neutras, aunque existen cargas eléctricas libres tanto negativas como positivas en el plasma, se encuentran compensadas unas con otras, de manera que el plasma en conjunto es eléctricamente neutro. Aunque los gases a temperatura ambiente son excelentes aislantes, basta con un pequeño porcentaje de portadores para hacer al gas un conductor eléctrico, este proceso se conoce como rompimiento eléctrico y existen diferentes formas para establecerlo, mediante: arco eléctrico, descargas en radio-frecuencia, microondas, ondas de choque, etc. Una vez establecido el rompimiento se establece una trayectoria conductora entre dos electrodos y el paso de una corriente eléctrica a través del gas ionizado establece un medio conocido como descarga gaseosa, que es una forma mediante la cual se puede generar un plasma.

Los plasmas pueden clasificarse en plasmas térmicos o en equilibrio, caracterizados por que la temperatura de los electrones es casi idéntica a la temperatura de las partículas pesadas, de manera que el estado termodinámico del plasma se aproxima a un equilibrio térmico local, estos plasmas son producidos por arco eléctrico y descargas de radio frecuencia de alta intensidad. Mientras que los plasmas fríos o en no equilibrio, en contraste a los anteriores presentan temperaturas de los electrones muy superiores a la temperatura de las partículas pesadas y una presión reducida. Estos plasmas son producidos mediante descargas de radio frecuencia y descargas corona^[4].

En este proyecto se presentan las características esenciales para diseñar una antorcha de plasma térmico generado por arco eléctrico, como la que se muestra en la figura 1.

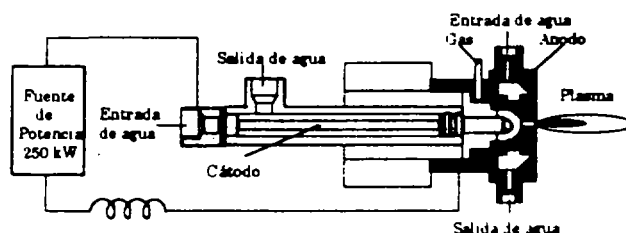


Figura 1.- Esquema general de una antorcha de plasma térmico.

Existen principalmente dos tipos característicos de antorchas dependiendo de la disposición de los electrodos, estos últimos 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), 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.

Antorcha de tipo no transferido o de arco soplado: diseñadas para transferir energía térmica del gas plasmágeno caliente hacia el material a tratar, físicamente consiste en dos electrodos montados en el dispositivo, el cátodo por lo general es tubular y en el espacio entre electrodos

es inyectado el gas con un vortex que al pasar a través de la trayectoria eléctrica establecida genera el dardo de plasma. La vida de los electrodos depende del material con el cual están contruidos, el gas plasmágeno a utilizar y el diseño del cañón utilizado, una antorcha de este tipo se ilustra en la figura 2.a.

Antorcha de tipo transferido: diseñadas para transferir energía en forma directa del cátodo que conforma propiamente la antorcha, hacia el ánodo que está representado por el material a tratar. Estos dispositivos son más eficientes que los anteriores ya que requieren un menor gasto de gas plasmágeno para transferir la misma energía hacia el material en tratamiento. La vida del electrodo está en función del gas plasmágeno a utilizar y de la constitución física del cañón, una antorcha de tipo transferido se puede ver en la figura 2.b.

Antorcha híbrida: es posible crear diferentes tipos de arreglos físicos ya sea para facilitar la generación del plasma, mediante el uso de un tercer electrodo conocido como "nozzle", el cual establece un arco piloto con el cátodo, mientras este último establece el arco principal con el material; también se utilizan como en el presente caso para transferir energía en forma más eficiente a un material que es no conductor, mediante el uso de un arreglo de dos cañones, entre otros.

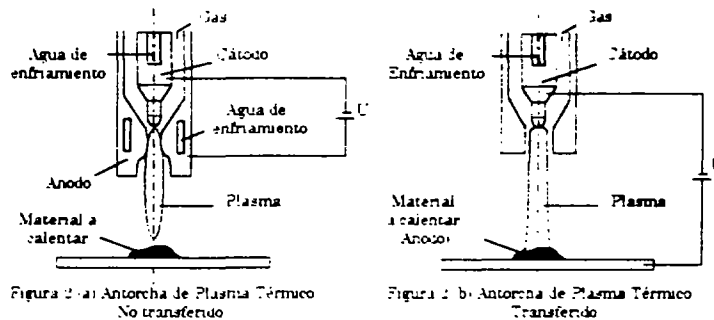


Figura 2.- (a) Antorcha de plasma térmico no transferido, (b) Antorcha de plasma térmico transferido.

Se han realizado diversos estudios con la finalidad de identificar los criterios fundamentales para determinar el comportamiento del voltaje del arco eléctrico en régimen permanente. Dentro de los factores que más influyen en dicho comportamiento, está la naturaleza y el gasto del gas plasmágeno, la intensidad del arco eléctrico, las dimensiones del orificio de salida y la presión de operación, ya que mediante desarrollos experimentales, se ha establecido una expresión que relaciona el voltaje de arco con la intensidad de corriente y el gasto de gas plasmágeno:

$$U = A \cdot I^{-\alpha} \cdot G^{\beta} \quad (1)$$

U es el voltaje de arco en V

I es la intensidad de corriente en A

G es el gasto del gas plasmágeno en m³/h

A, α y β son constantes adimensionales a determinar.

El comportamiento eléctrico del sistema definido en la ecuación 1 presenta una pendiente negativa de la curva, que se traduce en un efecto decreciente de la resistencia del arco por lo que la corriente aumenta, mientras que la tensión en los bornes de la antorcha tiende a disminuir, debido a esta característica, resulta más adecuado utilizar una fuente de corriente ya que el sistema bajo operación se comporta como un corto circuito.

Partiendo de la ecuación 1 se establece la expresión que determina la potencia de operación del sistema en función de la corriente y del flujo de gas, donde^[5]:

$$P(I) = A \cdot I^{(1-\alpha)} \cdot G^\beta \quad (2)$$

$P(I)$ es la potencia eléctrica en función de la intensidad de corriente en W.

Mediante el prototipo con el que se cuenta actualmente, se realizaron experimentos para determinar la expresión característica del comportamiento eléctrico del sistema, con la finalidad de hacer un escalamiento para establecer algunos parámetros de diseño de la antorcha. A partir de los datos obtenidos, se estableció un sistema de ecuaciones lineales mediante el método de mínimos cuadrados, obteniéndose que $A = 14.4659$, $\alpha = 0.039$ y $\beta = 1.7106$, con un factor de correlación $r = 1.22$, así:

$$U = 14.4659 \cdot I^{-0.039} \cdot G^{1.7106}$$

los datos obtenidos se presenta en la curva de tensión - intensidad de corriente de la figura 3.

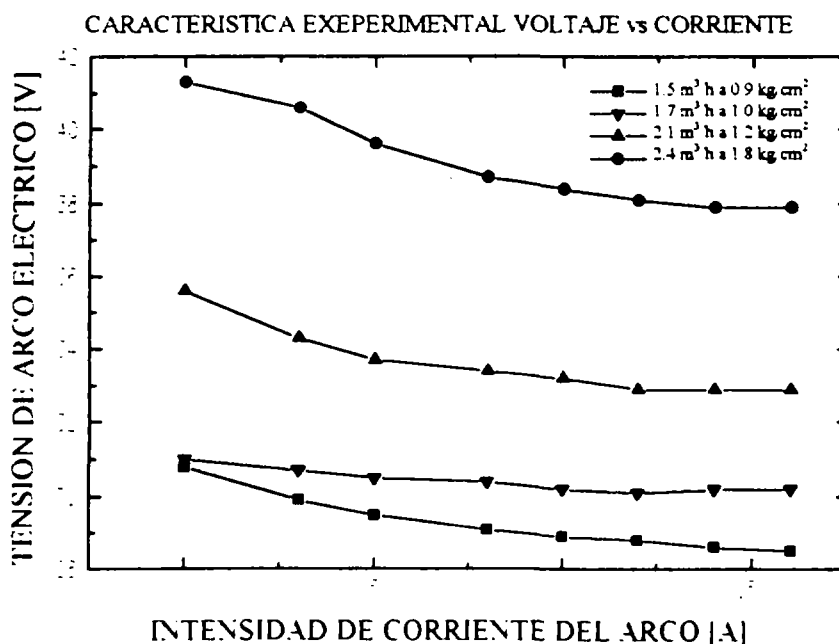


Figura 3.- Curva de Voltaje contra Corriente de la antorcha de plasma, utilizando argón como gas plasmágeno a diferentes gastos y presiones de operación.

Por otra parte se sabe que el sostenimiento del plasma térmico está determinado por la transferencia electrónica en la superficie de los electrodos, dicha área es la frontera entre dos estados o sistemas diferentes, uno eléctrico-sólido y otro plasmágeno-gaseoso y en donde la terminación del cátodo establece una transferencia de electrones hacia el ánodo mediante el efecto de emisión electrónica principalmente, en dicho efecto la densidad de corriente está determinada por la ecuación de Richardson - Dushman:

$$J = A T^2 e^{-(\phi / k T)} \quad (3)$$

J está definido en A/cm²

A = 120A/cm² K²

T = temperatura en Kelvin

ϕ = función de trabajo en eV

k = constante de Boltzman

para obtener altas densidades de corriente es necesario que el material a utilizar soporte altas temperaturas de operación y es debido a esta restricción que los electrodos se clasifican en:

- a).- Electrodo fríos debido a que los materiales utilizados en su construcción Cu, Acero, etc; tienen puntos de ebullición bajos ($T_{eb} < 3000K$) y una fuerte conductividad térmica.
- b).- Electrodo calientes construidos esencialmente de materiales refractarios W, ZrO₂, C, etc; los cuales tienen puntos de ebullición muy altos ($4300K < T_{eb} < 6200K$), los cuales no necesitan refrigerarse^[6].

Con la finalidad de diseñar una antorcha, se elige como material de fabricación cobre electrolítico debido su alta conductividad eléctrica y térmica además de ser un material maquinable y suave, en el cual pueden hacerse incrustaciones de W o W(ThO₂), con la finalidad de conformar la superficie de emisión de electrones, se sabe de antemano que el tungsteno no puede estar en contacto directo con gases plasmágenos oxidantes como el Aire, CO₂, etc; por lo que se utilizan gases no oxidantes como el Ar, N₂, H₂, etc; o en su defecto puede hacerse un arreglo en el cañón de manera que para utilizar un gas oxidante como gas plasmágeno se aplica una especie de cubierta o blindaje alrededor del plasma compuesto de un gas no oxidante, para evitar el desgaste del electrodo.

Considerando que la función de trabajo del tungsteno es de 4.3eV^[7] mientras que en el caso del tungsteno dopado con un 2% de (ThO₂) es de 2.6eV^[6], con temperatura de operación de 3300K (garantizando que la emisión de electrones está determinada principalmente por emisión electrónica), y sustituyendo estos valores en la ecuación 3, se obtienen las densidades de corriente $J_1 = 200 A/cm^2$ y $J_2 = 70.000 A/cm^2$, estos valores se encuentran comprendidos dentro de los intervalos característicos de operación de los plasmas térmicos (10^3 a $10^4 A/cm^2$)^[8].

Tomando en cuenta que la potencia de operación necesaria es de 50kW, al considerar las ecuaciones 2 y 4, sabiendo que el flujo de gas plasmágeno es de 3 m³/h, la corriente de operación del sistema obtenida es aproximadamente de 700A, mientras que la diferencia de

potencial de 71.5V, en base a estos datos se puede calcular el área de la sección transversal de la punta del cátodo, que está definida por la razón de la corriente de operación con respecto a la densidad de corriente a manejar, obteniéndose de esta forma dos áreas $S_1 = 3.5\text{cm}^2$ y $S_2 = 0.01\text{cm}^2$, como la punta del cátodo tiene un área de emisión en forma circular, los diámetros necesarios son: $d_1 = 21.1\text{mm}$ y $d_2 = 1.12\text{mm}$ respectivamente; cabe señalar que estas dimensiones se reducen cuando se utiliza agua de enfriamiento.

Como las densidades de corriente de operación de los ánodos son usualmente inferiores a las de un cátodo, la elección del material para la construcción del ánodo es menos restringida en comparación al cátodo, de manera que frecuentemente es utilizado el cobre electrolítico. En la tabla 1 del anexo A^[6], se listan algunos parámetros de diseño para diferentes tipos de electrodos.

El flujo de gas plasmágeno en dispositivos de tipo no transferido es considerablemente mayor para un nivel de potencia determinado que en dispositivos de tipo transferido.

Los valores típicos de transferencia de energía por unidad de flujo de gas en el caso de dispositivos no transferidos es del orden de 0.8 a 80kW/Nm³/h, mientras que en el caso de los dispositivos de tipo transferido se alcanzan valores de hasta 800kW/Nm³/h^[6]; en el presente proyecto se tiene planeado trabajar con un gasto de flujo de gas de hasta 50 l/min o 3m³/h, por lo que la transferencia de energía resultante en el sistema no transferido será de 2.4 a 240kW/N mientras que en el dispositivo de tipo transferido se puede obtener una transferencia de energía tope de 2.4MW/N. Esta última característica es determinante para establecer que los dispositivos de tipo transferido son más eficientes, ya que su operación básicamente consiste en transferir el arco en forma directa al material a calentar o degradar y no en calentar un gas para posteriormente transmitir el calor hacia el material a tratar.

Como se mencionó anteriormente el sistema de refrigeración está basado en la transferencia de calor de las paredes de los electrodos hacia el flujo de agua circulante, esta disipación de calor en el cañón está determinada por la siguiente relación^[9]:

$$P = m C_p (T_{sal} - T_{ent}) \quad (4)$$

P = disipación en el cañón en Watt

m = flujo de agua Kg's

C_p = calor específico del agua J/Kg Kelvin

T_{ent} = temperatura del agua de entrada en Kelvin

T_{sal} = temperatura del agua de salida en Kelvin

si consideramos una eficiencia típica de este tipo de cañones que es alrededor del 85% y en base a que la potencia de operación es de 50kw, aproximadamente el 10% de esta potencia se disipa en forma de calor por lo cual se considera que $P = 5\text{kw}$, si la diferencia de temperatura que se desea es del orden de 5°K y de que la constante de calor específico del agua es de 4.138kJ/(kg K), se obtiene mediante el uso de la ecuación 4 que el flujo de agua de enfriamiento requerido es de 241.66g/s ó 869.97 l/h.

Además al considerar las características de operación de la antorcha prototipo con la cual se han realizado diferentes tipos de pruebas, resulta indispensable establecer otros puntos a cubrir en futuros diseños de estos dispositivos, que a manera de lineamientos están determinados por:

- a) El cañón debe ser un sistema con piezas intercambiables y de fácil instalación, para evitar tiempos muertos prolongados en caso de que alguno de los electrodos bajo operación sufra un desgaste considerable.
- b) La antorcha debe tener un sistema de ajuste del espacio existente entre la punta del cátodo y el ánodo con la finalidad de regular la distancia de separación entre ambos.
- c) Ambos electrodos deben tener un sistema de enfriamiento, para optimizar su rendimiento térmico, procurando a su vez, un mayor tiempo de utilidad.
- d) Debe crearse un disco anular con tres o cuatro orificios realizados en forma diagonal y concéntrica, alrededor del cátodo, con la finalidad de crear un vortex en el gas plasmágeno, para estabilizar el plasma y evitar lo más posible el desgaste de los electrodos o establecer el giro de la trayectoria conductora mediante un campo magnético, establecido mediante un inductor toroidal en cuya parte central debe estar alojado el dardo de plasma.
- e) Las conexiones de la antorcha deben realizarse en el extremo opuesto al orificio de salida de la antorcha, para facilitar su manejo y adaptación al reactor de plasma térmico.
- f) Los cables eléctricos para la alimentación de la antorcha pueden estar refrigerados mediante agua, la que también será utilizada para refrigerar los electrodos de la antorcha; las conexiones de los cables deben estar diseñadas de manera que soporten la presión del agua de enfriamiento y que además establezcan un buen contacto eléctrico con la antorcha, con la finalidad de reducir pérdidas por calentamiento.

Para cubrir los requisitos establecidos por los parámetros eléctricos, térmicos y de flujo de operación del sistema (mediante los cuales se establecen las dimensiones del cañón), así como los que determinan la constitución física del mismo, se propone el siguiente diseño de cañón de plasma térmico,

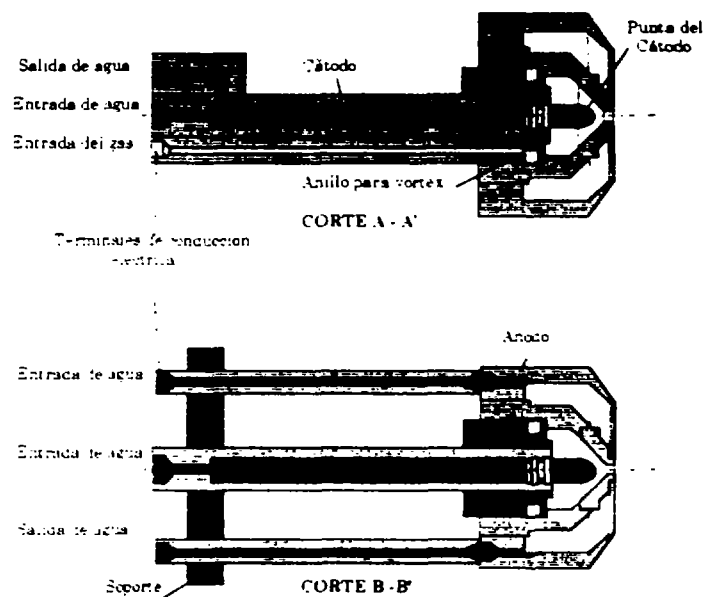


Figura 4.- Diseño propuesto de un cañón.

La configuración de antorcha transferida de doble cañón está conformada por dos antorchas de polaridad invertida, como se muestra en la figura 5. En este sistema el cátodo está hecho mediante una pieza cilíndrica de cobre con una incrustación circular de tungsteno dopado en la punta, dos boquillas de cobre que permiten cubrir al gas calentado que circula alrededor de los electrodos, además de utilizarse como electrodos auxiliares al momento de la iniciación del arco y el ánodo, el cual es similar al cátodo pero construido de cobre; obviamente todas las piezas construidas de cobre electrolítico son refrigeradas con agua. Mediante microcontroladores se implementará un sistema para controlar la corriente, voltaje y flujo de gas de alimentación de cada antorcha, además de gobernar un sistema esférico que permitirá variar el ángulo α entre los flujos de proyección de plasma de las antorchas y la distancia de separación.

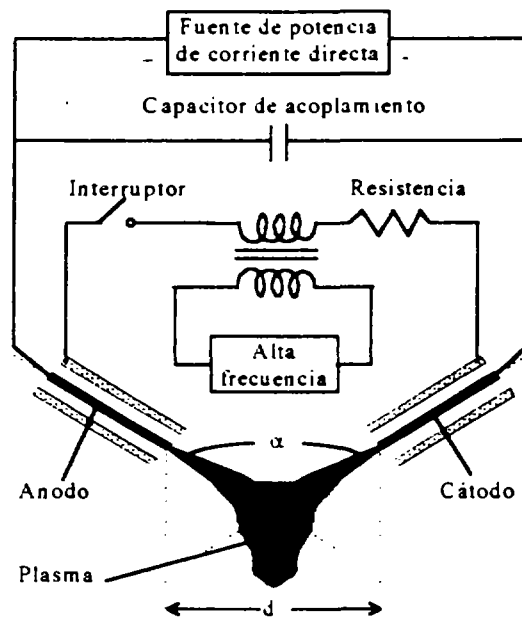


Figura 5.- Diagrama esquemático de la antorcha transferida de cañón doble.

Debido a que en este tipo de configuración la posición de las antorchas influye bastante en el comportamiento del arco, es necesario establecer las características óptimas de operación, que están influenciadas por el ángulo α , la distancia d entre las antorchas, las características eléctricas y de alimentación de gas plasmágeno, entre otras. Ya que la diferencia de potencial aumenta mientras que la intensidad de corriente disminuye conforme las antorchas son separadas o cuando el ángulo entre las antorchas disminuye se presenta una característica creciente de corriente tensión, de manera que el arco se comporta como una resistencia.

En este tipo de sistemas el gradiente de temperatura es mas grande que en un sistema convencional de tipo transferido, probablemente la longitud variable del arco produce dichos gradientes^[10].

De esta manera el esquema del sistema de tratamiento de residuos se presenta en la figura 6, donde se puede observar la utilización de la antorcha propuesta.

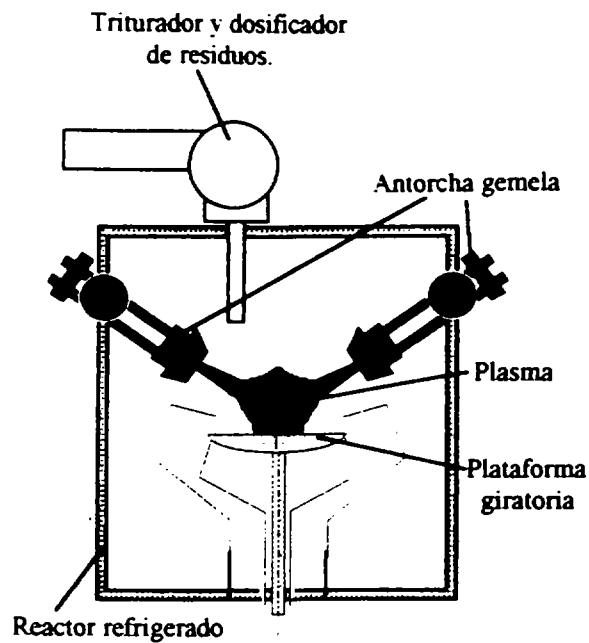


Figura 6.- Esquema del reactor de degradación de residuos mediante antorcha de plasma térmico transferida de doble cañón.

CONCLUSIONES

Para realizar un diseño adecuado de una antorcha de plasma térmico, es necesario en primera instancia definir el tipo de aplicación al que estará orientada con la finalidad de aprovechar al máximo las cualidades de cualquiera de los tres tipos de arreglos posibles, posteriormente se deben definir los parámetros de potencia requeridos, con la finalidad de realizar los cálculos correspondientes y una vez elegido un determinado diagrama de antorcha, se procede a realizar el diseño, estableciendo las características físicas, las dimensiones, los materiales de construcción, etc; para las piezas que conforman la antorcha.

Como se puede apreciar los cálculos, diseño y construcción de estos dispositivos es relativamente sencillo, ya que las piezas requieren un grado de dificultad medio y los materiales para su construcción están disponibles en el mercado nacional.

Por otra parte la concepción física de los cañones se está desarrollando actualmente con los colaboradores enfocados al área electromecánica de este proyecto.

Se cuenta con recursos materiales y humanos suficientes para establecer el comportamiento eléctrico, mecánico y termográfico de antorchas de tipo no transferido y transferido.

POOR QUALITY ORIGINAL

REFERENCIAS

- 1.- Proyecto de Norma Oficial Mexicana NOM-CRP-001-ECOL/1993, Gaceta Ecológica, Vol. VI, No. 30, Julio 1994, Secretaria de Desarrollo Social, pág. 2-35; México.
- 2.- Proyecto de Norma Oficial Mexicana NOM-087-ECOL-1994, Diario Oficial de la Federación, Viernes 19 de Agosto 1994, pág. 9-23; México.
- 3.- Degradación de Desechos Peligrosos por Plasma Térmico; Pacheco S. J.; Cota S. G.; Peña E. R; Suplemento de COMIPRO, No. 5, Marzo 1995; INTN, México.
- 4.- Thermal Plasma Processing; Maher I. Boulos; IEEE Transactions on Plasma Science, Vol. 19, No.6, December 1991; pp 1078-1089.
- 5.- Comportamiento y control de un generador de Plasma Térmico; J. Pacheco, R. Peña, G. Martínez, S. Díaz; Memoria del 1er. Congreso Internacional de Investigación en Ciencias Computacionales, Septiembre de 1994; Toluca, México.
- 6.- Plasma Torches and Plasma Torch Furnaces; R. C. Eschenbach; N. A. Rarcza; K. J. Reid; Chapter 7 of Plasma Technology in Metallurgical Processing, Ed. Jerome Feinman, pp 77-87.
- 7.- Handbook of Chemistry and Physics; Robert C. Weast, CRC PRESS Inc, 58th edition, 1978, pp E-81-82, USA
- 8.- L'arc Electrique et ses Applications, Tome 1 Etude physique de l'arc électrique, Club E. D. F. Arc Electrique, Edition du Centre National de la Recherche Scientifique, France, 1984.
- 9.- Les Plasmas dans l'industrie; DOPEE85; Electra; Electricite de France, 1985.
- 10.- Characterization of a Twin-Torch Transferred dc Arc; S. Megy et al., Plasma Chemistry and Plasma Processing, Vol. 15, No. 1, 1995.

ANEXO A

Forma y tipo del electrodo	Material	Punto de fundición 10 ³ K	Temp. de operación 10 ³ K	función de trabajo V	Densidad de corriente KA/cm ²	Diámetro típico de boquilla mm	Diámetro típico de base mm
Refrigerados con agua Botón a 10kA	W(ThO ₂)	5.5	3.4	2.6	3.0	20	90
Varilla a 12.5kA	Grafito	4.6	3.8	4.6	1.4	30	100
Tubular de 7kA, 1kV	Cobre	2.7	0.5	4.5	10 ⁴	Anulo 50	Intervalo 76
Tubular de 1 - 1.5kA 6 - 7kV	Acero	3.0	0.5	4.4	10 ⁴	50	100
Sin refrigeración: Varilla de 60 - 100kA	Grafito	4.6	3.8	4.6	0.035	Diámetro 450	Intervalo 600
Tubular de 30 - 60kA	Grafito	4.6	3.8	4.6	0.035	360	490

Tabla 1.- Parámetros de diseño para electrodos.