

La electrónica de potencia aplicada a un generador de plasma térmico

JOEL PACHECO, OSCAR OLEA, ROBERTO ANDRADE, JAVIER SILVA, GABRIEL MARTÍNEZ*

Power electronics applied to a thermal plasma generator

Abstract. *The high density of energy furnished by thermal plasmas has a wide range of applications, such as those related with welding, fusion, spray coating and at the present in waste destruction. The waste destruction by plasma is a very attractive process because the remaining products are constituted by inert glassy grains and non-toxic gases.*

The main characteristics of thermal plasmas are presented. Technics based on power electronics are utilized to achieve a good performance in thermal plasma generation.

Introducción

En su estado normal, los gases no son conductores de energía, sin embargo, éstos se comportan como tales cuando sus elementos constitutivos son disociados, ionizados o excitados; en estas condiciones tenemos un medio físico conocido como plasma. El plasma se puede definir como un estado de la materia que se alcanza cuando ocurre una disociación de las moléculas en fase gaseosa, con ionización de los átomos bajo el efecto de una temperatura elevada.

Para crear un plasma térmico, previamente se debe ionizar y lograr que el medio gaseoso se comporte como conductor, ya sea por la acción de un campo eléctrico o por una fuerte elevación de temperatura. La primera alternativa es la más accesible, y puede llevarse a cabo mediante fuentes de potencia que permiten desarrollar descargas en corriente alterna, continua, alta frecuencia o microondas.

La ionización se logra con impulsiones de alta tensión a alta frecuencia. La conversión del medio ionizado en conductor se obtiene con un arco eléctrico de alta potencia. Finalmente, el plasma se consigue por la propulsión de un gas bajo presión, llama-

do gas plasmágeno, a través del arco. Una vez establecido el plasma térmico, se puede aprovechar su alta densidad de energía (10^5 W/cm²) (Caumette, s/f) en un proceso dinámico (sin inercia), con instalaciones simples y susceptibles de integrarse para ser automatizadas.

La tecnología de plasmas térmicos tiene un amplio rango de aplicaciones tanto en el procesamiento de materiales y en la industria del acero o de revestimientos, como en la degradación de residuos peligrosos (US Environmental Protection Agency, 1986; Michael, J., 1986 y Boulos, M., 1991).

El plasma térmico surge como una alternativa eficaz para la eliminación de desechos peligrosos (aquellos considerados como corrosivos, radioactivos, reactivos, explosivos, biológico-infecciosos, etcétera).

México tiene una gran responsabilidad en cuanto al abatimiento de la generación de residuos peligrosos y en el desarrollo de tecnologías que cumplan con normas de calidad ambiental para el tratamiento y disposición de los mismos. Por ello, el Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ) ha iniciado diversos estudios y proyectos de desarrollo tecnológico, con el objeto de contribuir en la resolución de problemas de tipo ambiental.

Actualmente, el ININ cuenta con un generador de plasma térmico y una pequeña antorcha que permite manejar potencias hasta de 5 kW.

I. Propiedades del plasma térmico

Los plasmas térmicos se obtienen fundamentalmente a presiones del orden de la atmosférica, cuando la temperatura de los electrones es vecina a la del resto



* Investigadores del Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares. Sierra Mojada No. 447, C.P. 11000. Fax (5) 5 21 37 98.

de las especies (iones, átomos, moléculas) y la densidad electrónica varía de 10^{13} a 10^{16} cm⁻³. Las temperaturas en la periferia son superiores a 4,000°C (en el núcleo del plasma se alcanzan fácilmente 20,000°C).

En estas condiciones los coeficientes de transferencia de conductividad térmica son muy elevados, por lo cual se alcanzan velocidades de reacción química y de intercambio térmico muy importantes. Estas características son ideales para aplicar el plasma térmico en la destrucción de desechos, sobre todo en aquellos considerados como tóxicos o radiactivos.

Si nos referimos a los incineradores convencionales por combustión, podemos observar que tienen un rendimiento muy reducido (5 a 20%) en la transferencia de energía además de que su temperatura es inferior a 1,200°C, por lo que las reacciones son lentas, su funcionamiento provoca choques térmicos y gases de combustión que contaminan la atmósfera con humos y cenizas en suspensión cargadas de sales minerales y metales pesados.

En el caso de incineradores por plasma térmico, la capacidad de transferencia energética es considerablemente más eficaz, toda vez que a temperaturas superiores a 3,000°C los coeficientes de transferencia térmica aumentan rápidamente (Taupiac, s/f) y las velocidades de reacción con el material que se desea destruir son tan elevadas que no hay posibilidad de combustión, por lo cual ocurre lo que se conoce como *pirolisis*. Por lo que esta alternativa de destrucción por plasma térmico es sumamente ventajosa con respecto a los incineradores por combustión.

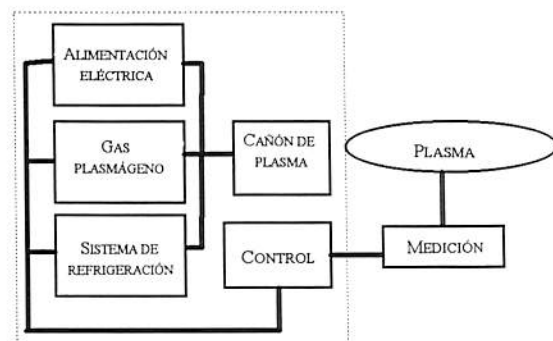
Los gases más utilizados para generar el plasma son argón (Ar), nitrógeno (N₂), oxígeno (O₂) e hidrógeno (H₂), así como cualquier combinación que posea una entalpía y conductividad térmica elevada que permita una transferencia rápida de cantidades importantes de calor, de tal modo que favorezca así reacciones de intercambio químico controladas.

II. Principio del método

La energía de excitación necesaria para la producción del plasma térmico es obtenida por un generador de corriente continua que produce un arco eléctrico entre dos electrodos cilíndricos y concéntricos. El gas a presión se inyecta pasando por el espacio existente entre ambos electrodos, esto permite un flujo denso con una trayectoria helicoidal para producir un efecto de vortex al llegar al arco eléctrico y formar el plasma.

La figura 1 muestra el esquema general de los sistemas que intervienen en la generación del plasma térmico.

FIGURA 1. GENERACIÓN DE UN PLASMA TÉRMICO



Al conectar la alimentación eléctrica y existir la ionización, el arco eléctrico es generado por la emisión termoelectrónica ocurrida en la superficie del cátodo. Los electrones son fuertemente acelerados bajo el efecto del campo eléctrico intenso que existe entre los dos electrodos, y adquieren una energía cinética importante, que les permite disociar las moléculas si el gas plasmágeno es poliatómico y, posteriormente, ionizar los átomos neutros por colisión. En virtud de los niveles elevados de temperatura en el plasma y de la intensidad de bombardeo iónico y electrónico, es indispensable la refrigeración del ánodo y cátodo.

El gas plasmágeno a presión atraviesa el arco y forma un dardo de plasma que sale por un hueco del ánodo de diámetro reducido, se produce entonces una concentración de muy alta energía en un volumen limitado, en donde intervienen las fuerzas de Lorentz debido al campo magnético propio del plasma. La densidad de energía crece, lo cual provoca un aumento de ionización y de temperatura, que alcanza los 20,000°C en el núcleo del plasma. Este núcleo en forma de dardo está rodeado por un medio de menor temperatura que sirve de interfase entre el núcleo y la pared de los electrodos. El plasma sale a una gran velocidad (varios cientos de m/seg) y esta gran energía puede ser transferida a una aplicación en particular; en nuestro caso, para la destrucción de desechos.

Para mejorar la emisión termoiónica y la densidad de corriente, el cátodo está constituido de una parte central de tungsteno inmerso en una matriz de cobre.

III. Interacción del arco y su alimentación eléctrica

El arco tiene tendencia a comportarse como un cortocircuito, la corriente crece rápidamente y la ten-

sión en sus electrodos disminuye; además, el tiempo de reacción del arco a una perturbación es muy reducido, por lo que la alimentación eléctrica debe presentar una regulación en corriente capaz de reaccionar rápidamente.

Para estudiar la interacción entre el arco y su alimentación, es interesante disponer de un modelo de arco que tome en cuenta la influencia de los principales parámetros que intervienen en un comportamiento estático y dinámico:

- Naturaleza y flujo del gas plasmágeno
- Intensidad de corriente de arco
- Presión.

El arco generalmente es creado mediante la aplicación de un campo eléctrico entre dos electrodos, lo cual origina una descarga entre los mismos. Para fines prácticos, es conveniente considerar el desgaste.

La alimentación está constituida normalmente por un rectificador de tensión, regulada en corriente, y por una inductancia en serie, lo cual permite regular las variaciones en corriente, que pueden ser causadas por perturbaciones en la línea, o en el flujo del gas, entre otras razones.

Tomando en cuenta la magnitud de la corriente utilizada en nuestro proyecto (0 a 1000 A), es conveniente, por razones de economía, utilizar tiristores en el primario del transformador, para el control de amplitud en tensión y un banco de rectificadores en el secundario (ver figura 2). El transformador trifásico está conectado en estrella-delta con un factor de conversión de 440 V en el primario y 70 V en el secundario. A la salida del rectificador se conecta en serie una inductancia de valor relativamente elevado para reducir al mínimo las variaciones de corriente y convertir nuestra fuente de energía en una fuente de corriente. El cátodo va conectado al electrodo central y el ánodo al externo. La antorcha va refrigerada con agua y en la parte central se inyecta el gas plasmágeno.

IV. Composición de la fuente de alimentación

Se entiende por fuente a todo dispositivo capaz de entregar energía. En electricidad la noción de energía está asociada a la existencia simultánea de dos señales eléctricas (figura 3):

1. La diferencia de potencial en las terminales de la fuente

2. La corriente a través de la carga.

Si las señales $v(t)$ e $i(t)$ son periódicas, podemos definir la potencia promedio como el valor promedio de la potencia instantánea:

$$\langle p \rangle = \frac{1}{T} \int_0^{T} v(t) \cdot i(t) dt \quad (1)$$

considerando

$$v(t) = \sqrt{2} V \sin(\omega t)$$

$$i(t) = \sqrt{2} I \sin(\omega t - \theta)$$

$$P = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \sqrt{2} \cdot V \sin(\omega t) \sqrt{2} \cdot I \sin(\omega t - \theta) d(\omega t) \quad (2)$$

$$P = VI \cos \theta$$

La potencia reactiva, aunque no tiene significación física, está definida como:

$$Q = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \sqrt{2} \cdot V \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}) \sqrt{2} \cdot I \sin(\omega t - \theta) d(\omega t) \quad (3)$$

$$Q = VI \sin \theta$$

La variación de la potencia activa P y reactiva Q , puede encontrarse con base en la figura 4.

El valor reducido de la potencia activa P/VI es máxima para $\theta = 0^\circ$ y disminuye conforme θ aumenta, hasta llegar a un mínimo de 90° .

FIGURA 2. ESQUEMA DEL GENERADOR DE PLASMA TÉRMICO

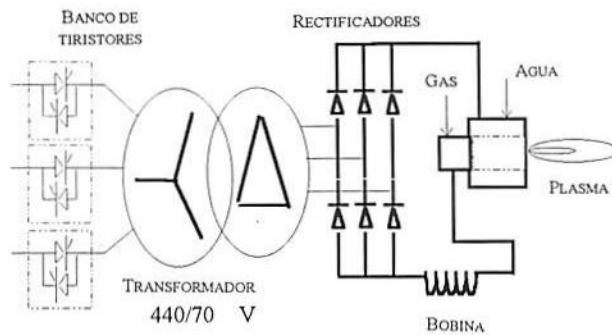


FIGURA 3. FUENTE DE ALIMENTACIÓN

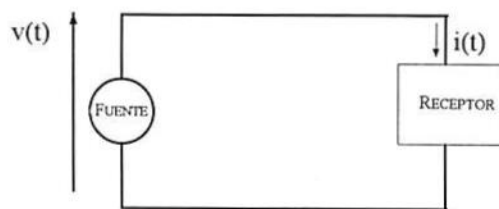
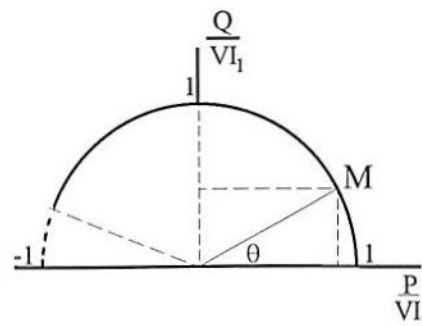


FIGURA 4. VARIACIÓN DE POTENCIAS P Y Q



Para garantizar una buena conmutación de los tiristores, el ángulo de disparo debe estar entre 5° y 150°, esto tiene como efecto un aumento en la potencia reactiva debido a la conmutación mostrada en la figura 5. Existen técnicas para mejorar el factor de potencia (y el rendimiento), una de ellas se describe en el arreglo de la figura 6.

El efecto de este arreglo reduce la potencia reactiva del sistema, por lo que el rendimiento es mejor, lo anterior se puede demostrar matemáticamente de la siguiente forma:

El ángulo de retardo puede variar en cada uno de los grupos, por lo que la potencia tiene como expresión (de la ecuación 2):

$$P = VI_1 (\cos \theta_1 + \cos \theta_2)$$

FIGURA 5. VARIACIÓN DE P Y Q CONSIDERANDO LA CONMUTACIÓN

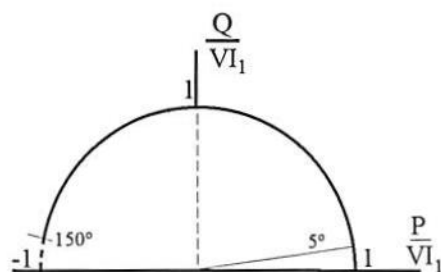


FIGURA 6. ESTRUCTURA DE TRANSFORMADOR PARA MEJORAR EL FP

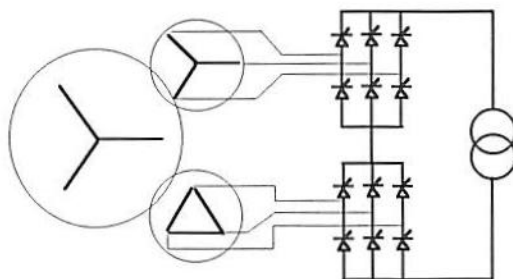
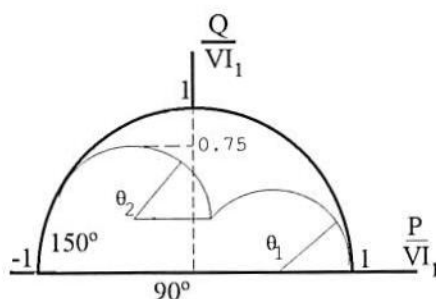


FIGURA 7. MEJORAMIENTO DEL FACTOR DE POTENCIA



$$P = 2(VI_1) \frac{(\cos \theta_1 + \cos \theta_2)}{2} \quad (4)$$

$$Q = 2(VI_1) \frac{(\sin \theta_1 + \sin \theta_2)}{2}$$

El control de potencia se logró en este caso haciendo variar al ángulo θ_1 , manteniendo θ_2 nulo, así las ecuaciones 4 quedan:

$$P = 2(VI_1) \frac{(\cos \theta_1 + 1)}{2} \quad (5)$$

$$Q = 2(VI_1) \frac{(\sin \theta_1)}{2}$$

Posteriormente se hace variar θ_1 manteniendo θ_2 en su valor límite (150°), ver figura 7.

$$P = 2(VI_1) \frac{\left[\frac{\sqrt{3}}{2} + \cos \theta_2\right]}{2} \Rightarrow \frac{P_{max}}{2VI_1} = 0.93 \quad (6)$$

$$Q = 2(VI_1) \frac{\left[\frac{1}{2} + \sin \theta_2\right]}{2} \Rightarrow \frac{Q_{max}}{2VI_1} = 0.75$$

Podemos constatar una disminución sensible en la energía reactiva, manteniendo prácticamente constante la potencia activa; por lo que existe un mejoramiento en el factor de potencia (Laborne, H., 1989). El diagrama de potencias activas y reactivas (en valores reducidos) se muestra en la figura 7.

Esta propuesta requiere de un transformador que utiliza dos grupos de secundario como se indica en la figura 6.

V. Comportamiento del arco

Los modelos clásicos del arco eléctrico están basados en la ecuación de balance energético, lo cual establece que la variación de energía interna del arco es igual a la suma algebraica de potencia disipada en el arco en forma de efecto Joule, más las energías intercambiadas en el gas plasmágeno (por conducción, convección o radiación).

Un modelo general (Les plasmas dans l'industrie, 1991) está basado en la característica estática del arco:

$$\frac{d(\ln G)}{dt} = \frac{1}{\Theta(G, I)} \left[\frac{U \cdot I}{P(I)} - 1 \right] \quad (7)$$

G = Conductancia del arco (depende del gas)

Q = Función de G y de I .

Conociendo el flujo del gas Q_g , la potencia de refrigeración $P(I)$ puede calcularse por:

$$P(I) = A \cdot Q^\beta \cdot I^{(1-\alpha)} \quad (8)$$

Donde los valores A , β , α son constantes obtenidas de datos experimentales para diferentes valores de diferentes gases.

El estudio de la estabilidad del arco eléctrico puede efectuarse aplicando los criterios clásicos de control de sistemas linealizados en un punto de funcionamiento. Este estudio permite obtener el dimensionamiento de componentes de la alimentación. Un estudio más preciso consiste en modelar el circuito eléctrico completo, representando el arco por su ecuación 7 y 8. Esto permite considerar el carácter no lineal de tiristores, inductores saturables y reguladores adaptables, con ganancias calculadas en función de las condiciones de trabajo.

El fenómeno del arco eléctrico es muy rápido y difícil de observar en práctica. La figura 8 muestra una simulación del comportamiento del arco en donde se puede apreciar una inestabilidad y extinción del arco a 80 ms. Esta inestabilidad puede ser corregida utilizando un control numérico basado en un microcontrolador digital.

La utilización de la simulación numérica permite profundizar la comprensión del fenómeno y se podrá proponer la mejor estructura de alimentación para un plasma térmico.

VI. Gases plasmágenos

Los gases utilizados en el plasma térmico deben poseer: *entalpía y conductividad térmica elevadas*, para permitir una transferencia rápida de cantidades importantes de calor; es el caso de gases diatómicos como el H y N_2 . Además, deben presentar *una masa molecular importante*, como N y Ar.

A continuación se describen los principales gases y compuestos utilizados:

1. Argón

Este gas es utilizado por su débil potencial de ionización, ya que permite el inicio y entretenimiento del arco. Su entalpía y conductividad térmica son reducidas, por lo que su utilización como gas plasmágeno no es muy recomendable.

2. Argón-hidrógeno

Las buenas características del H de conductibilidad eléctrica y de conductividad térmica, asociadas a una entalpía elevada, aportan al Ar lo que le hace falta en potencialidad de transmisor de energía. La mezcla más utilizada es de 80% de Ar y 20% de H_2 . Además el H_2 interviene para impedir la formación de óxidos en los electrodos.

3. Nitrógeno

Por su alta entalpía y su masa molecular es un gas muy eficaz. Puede mezclarse con H_2 para mejorar sus características.

4. Aire

La mezcla natural de 79% de N_2 y 21% O_2 une estos dos gases diatómicos de entalpías muy semejantes, por lo que es muy energético. El aire debe ser seco y sin aceites y a una presión de 5 a 6 bar. El inconveniente es que oxida los electrodos más rápido que un gas neutro.

5. Oxígeno

El oxígeno es también diatómico y buen vector de transporte de energía. Produce óxidos en los electrodos, por lo que limita la potencia de las instalaciones.

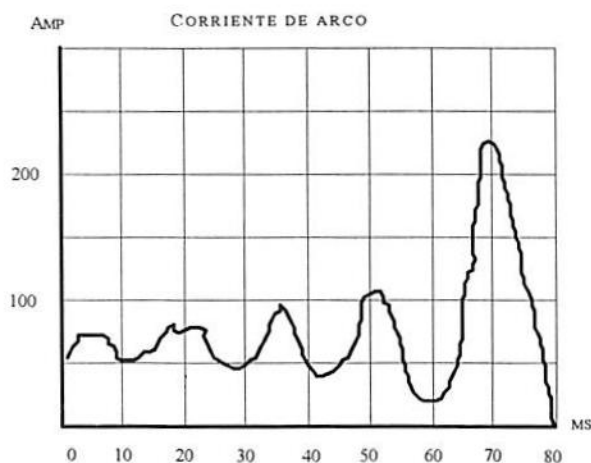
6. Agua

La inyección de agua se debe hacer adicional a la utilización de un gas plasmágeno y de una manera tangencial para crear un vortex que reduce el diámetro del plasma. En efecto, las altas temperaturas del plasma disocian el agua en oxígeno e hidrógeno, provocando una ionización parcial de estos elementos. Esta combinación incrementa su rendimiento calorífico. Su utilización implica un aumento en la potencia eléctrica, ya que existen efectos secundarios de enfriamiento en la zona térmicamente afectada.

VII. Resultados experimentales

El montaje experimental consiste en un generador de potencia ajustable manualmente, así como un cañón de plasma y Ar y N_2 usados como gases plasmágenos. La figura 2 muestra la disposición del montaje utilizado. El procedimiento experimental se desarrolló manteniendo la presión del gas a 100 psi.

FIGURA 8. INESTABILIDAD DEL ARCO ELÉCTRICO



La corriente se hizo variar de 40 a 180 Amp., a lo que correspondió una variación del arco en forma decreciente de 70 a 30 V para el caso de Ar y de 135 a 75 V para el N. La tensión más reducida para el Ar es indicativa de su energía de activación menor.

Los valores proporcionados en la tabla 1 están definidos en función de su temperatura característica (Les plasmas dans l'industrie, 1991).

TABLA 1		
CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DEL AIRE Y N		
	AIRE	NITRÓGENO
T_0 (°K)	9400	9100
σ_0 CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA A/V/M	2474	2600
H_0 ENTALPÍA MÁSCICA J/KG	$4.64 \cdot 10^7$	$4.9 \cdot 10^7$
μ_0 VISCOSIDAD KG/MS	$2.4 \cdot 10^{-3}$	$2.34 \cdot 10^{-3}$
ϵ_0 EMISITIVIDAD W/M°K	$5.66 \cdot 10^{-8}$	$5.66 \cdot 10^{-8}$
M MASA MOLAR KG/KMOL	29	28

Con estos datos la resistencia del arco se puede obtener mediante la relación:

$$Z = 1/(s_0 D) = 0.0237 \text{ W}$$

D = Diámetro del hueco del ánodo por donde sale el plasma.

Algunos resultados experimentales permiten obtener una distribución de puntos que corresponden a una ecuación (*Ibid*) de correlación del tipo:

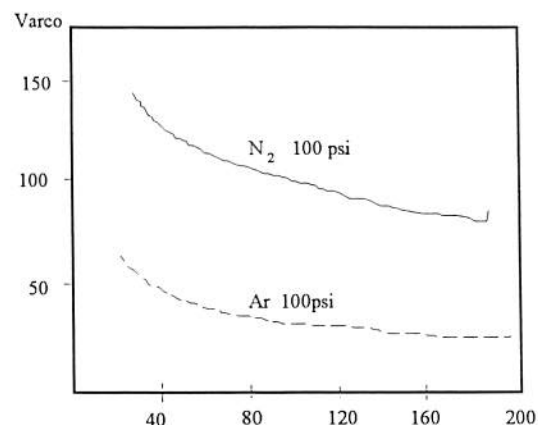
$$M_1 = A \cdot M_2^\alpha \cdot G^\beta \quad (9)$$

$$M_1 = \frac{U \cdot D \cdot \sigma_0}{I}$$

$$M_2 = \frac{I^2}{G \cdot D \cdot \sigma_0 \cdot H_0}$$

con estas expresiones se puede establecer una nueva relación entre el arco y la intensidad del flujo de gas plasmágeno:

FIGURA 9. V_{ARCO}/I EN FUNCIÓN DE LA PRESIÓN



$$U = A \cdot I^\alpha \cdot G^\beta \quad (10)$$

Con esta expresión se puede constatar que el arco eléctrico muestra un comportamiento (ver figura 9) en función del gas y la corriente. Su impedancia es negativa, o sea, a medida que la corriente del plasma aumenta, la tensión del arco disminuye.

Conclusiones

El estado actual del montaje experimental ha permitido la generación de un plasma térmico controlado hasta 5 kW. Se pretende escalar la potencia hasta 250 kW, utilizando el sistema aquí propuesto, con la finalidad de aplicarlo en una planta de degradación de desechos peligrosos por plasma térmico, aprovechando las características aquí indicadas. ♦

BIBLIOGRAFÍA

- Caumette, J. (s/f). *La destrucción des déchets par torche à plasma*. Electrecité de France.
- US Enviromental Protection Agency (1986). *Solving the hazardous waste problems: EPA'S RCRA program*, EPA/530-SW-86-037.
- Michael, J. (1986). *Pyrolysis of hazardous wates with a mobile plasma arc system*. Westinghouse Plasma Systems Canada Inc.

- Boulos, M. (1991). "Thermal Plasma Processing. IEEE Transactions on Plasma" en *Science*. Vol. 19. N° 6. December.
- Taupiac, J. (s/f). *Incineration des dechets nucléaires en Plasma d'Arc*. Centre de Physique Atomique. Toulouse.
- Laborne, H. (1989). *Convertisseurs assistés par un réseau alternatif*. Edition Eyrolles.
- Les plasmas dans l'industrie (1991). *Collection Electra DOPEE85*.