

Medidas de la ganancia de pequeña señal en una descarga de CO₂:N₂:He enfriada convectivamente

M.A. Carnero⁽¹⁾, V. D'Accurso⁽²⁾, C.A. Rosito^(1,2) y G.D. Santiago⁽¹⁾

(1) Facultad de Ingeniería UBA, Paseo Colón 850 (1063), Ciudad de Buenos Aires

(2) CEILAP, San Juan Baustita de la Salle (1605), Villa Martelli, Pcia. de Buenos Aires.

e-mail: gsantia@tron.fi.uba.ar

Se construyó un sistema de excitación de alta potencia en corriente continua (aprox. 10 kW) para mezclas de CO₂:N₂:He consistente en un cátodo tubular de cobre enfriado por agua y sesenta ánodos individualmente limitados en corriente por sendas resistencias. La zona de descarga es enfriada convectivamente por arrastre de la mezcla a alta velocidad (aprox. 50 m/s), siendo el flujo de gases perpendicular a la dirección de la corriente. Los gases son recirculados por un par de sopladores axiales contrarrotatorios y enfriados por un par de intercambiadores de calor. Con el fin de determinar la región espacial óptima para la operación como láser de CO₂, se efectuaron mediciones de la ganancia de pequeña señal para mezclas en proporción 1:1.5:6 y presiones totales de alrededor de 40 Torr. Las medidas fueron realizadas en distintas posiciones dentro de la zona de descarga en una dirección perpendicular a la velocidad de los gases y la corriente.

A high-power DC pumping system (aprox 10 kW) for CO₂:N₂:He mixtures was built. The electrode arrangement consists of a cathode made up of a round copper pipe and sixty brass anodes individually ballasted with resistances. The discharge is convectively cooled by a moderate-speed flow (50 m/s) orthogonal to current direction. The gases are moved by a pair of counter-rotating axial fans and cooled by a pair of heat exchangers. Small signal gain was measured with the objective of finding the position where the gain reached its maximum value. Measures were carried out in mixtures in ratio 1:1.5:6, total pressure of about 40 Torr and in a direction parallel to cathode.

Con el objeto de caracterizar la descarga generada por el sistema de excitación de un láser de CO₂ de alta potencia, se efectuaron mediciones de la ganancia de pequeña señal en mezclas de CO₂:N₂:He bombeadas por corriente continua y enfriadas convectivamente.

El enfriamiento convectivo por arrastre rápido de la mezcla a través de la zona de excitación es el método más comúnmente utilizado para escalar la potencia entregada por los láseres de CO₂, dado que en estos casos el factor limitante para la entrega de potencia de bombeo es el aumento de la población del nivel láser inferior debido al incremento de temperatura del gas.

En efecto, la ganancia en la banda de 10,6 μ m está dada por:

$$\alpha(\nu) = A_{21} \frac{\lambda^2}{8\pi} g(\nu) \left[N_{00^1} - \frac{g_2}{g_1} N_{10^0} \right]$$

donde A_{21} es el coeficiente de Einstein de la transición, λ la longitud de onda, $g(\nu)$ la forma de la línea, N_{00^1} la población del nivel láser superior, N_{10^0} la del inferior y g_1 y g_2 las respectivas degeneraciones. La primera de dichas poblaciones está esencialmente determinada por la densidad de corriente del bombeo en la descarga y por los tiempos de relajación.

Aún asumiendo un bombeo directo al nivel inferior despreciable, la población de este aumenta rápidamente con el crecimiento de la temperatura del gas dado que la energía del nivel 10⁰ es de tan sólo 1388 cm⁻¹, que comparada con un valor de 280 cm⁻¹ para kT a $T = 400$ K indica que la población del nivel inferior crece drásticamente al elevarse la temperatura, con la siguiente disminución de la ganancia del medio. Resulta por lo tanto importante mantener la temperatura del gas por

debajo de los 400-450 K.

Cuando la mezcla es enfriada convectivamente, pasa a velocidad elevada a través de la zona de descarga de forma tal de mantener la temperatura por debajo de los valores anteriormente citados.

El incremento de temperatura está dado por: $\Delta T = P / (C_p \delta A \nu)$ donde P es la potencia entregada, C_p el calor específico de la mezcla, δ la densidad de la misma, A el área transversal de paso del gas y ν la velocidad de este. El calor específico y la densidad dependen de las presiones parciales, pero asumiendo valores típicos para una mezcla de proporción 1:2:8 se obtiene un valor para $C_p \delta \approx 37$ J / (K m³).

Considerando $P = 10$ kW, $A = 0,1$ m² y $\nu = 50$ m/s (valores utilizados en esta experiencia y descriptos en detalle más adelante) se obtiene $\Delta T < 100$ K.

El sistema por el que circula la mezcla es una estructura construida en acero y que semeja un túnel aerodinámico como muestra la figura 1.

Los gases son recirculados por un par de sopladores axiales contrarrotatorios (Prop) movidos por dos motores trifásicos de 3 kW cada uno. La mezcla es acelerada hasta una velocidad de 50 m/s en una tobera (Tob) para luego ingresar a la zona de descarga (Desc) de 1000 mm de ancho y 100 de altura, donde es excitada por medio de una descarga de corriente continua de alta potencia. Luego de salir de la zona de descarga los gases reducen la velocidad en un difusor (Dif), cerrando así el circuito de circulación.

Una pequeña parte de la potencia disipada es útil para proveer ganancia y el resto (del orden del 90% del total) es extraído en un par de intercambiadores de calor gas-agua (I) ubicados antes y después de la zona de descarga.

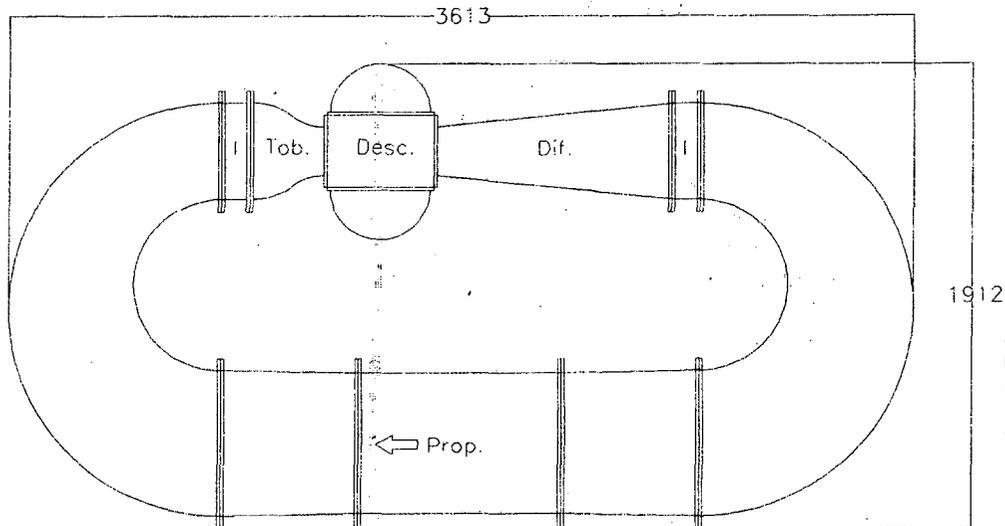


Figura 1. Esquema del sistema de recirculación. Dimensiones en milímetros

Estos intercambiadores sirven también para remover el calor disipado en los motores de circulación dado que los mismos carecen de un sistema de refrigeración independiente.

La excitación se consigue por medio de una fuente trifásica capaz de entregar de 2,5 a 3,3 kV y corrientes de hasta 20 A; la tensión de salida se ajusta por medio de un autotransformador.

El objetivo principal de este trabajo fue la caracterización de diferentes arreglos de electrodos con el fin de encontrar la configuración que permitiera maximizar la potencia entregada a la descarga.

Fueron ensayados electrodos de varias formas y materiales. En principio se trabajó con un conjunto de 70 cátodos de acero inoxidable con forma de cilindro aguzado en un extremo; enfrentados a un ánodo tubular de cobre de 20 mm de diámetro (figura 2).

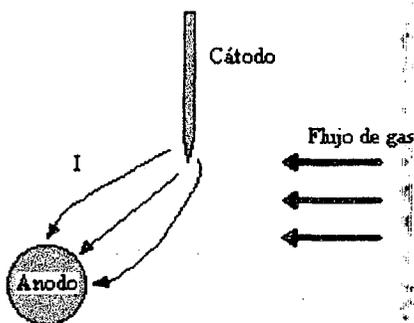


Figura 2. Esquema de cátodo aguzado y ánodo tubular

La forma en punta de los cátodos permitía iniciar fácilmente la descarga, pero dada la reducida área expuesta de los mismos era imposible superar los 30/40 mA por cada electrodo; este valor estaba por debajo del deseado (>100 mA). Si se intentaba conseguir corrientes superiores la mancha catódica cubría totalmente la superficie lateral de cada cilindro haciendo que la descarga se volviera inestable.

Asimismo, por encontrarse los cátodos conectados a alta tensión resultaba imposible refrigerarlos individualmente, con lo cual, la potencia disipada asociada con la caída catódica debía ser extraída por medio del flujo de gas que circula por entre los electrodos.

Posteriormente se decidió ensayar configuraciones que presentaran un cátodo de gran superficie lateral que pudiera entregar la corriente deseada y que estuviera conectado a tierra de forma tal de poder enfriarlo por medio de agua.

Finalmente, luego de ensayar con diversas variantes de cátodos aletados y distintas formas y materiales para los ánodos, se encontró la combinación más conveniente la cual consiste en un cátodo tubular de cobre de 20 mm de diámetro enfriado internamente por agua y 60 ánodos de bronce de 70 mm de largo y sección transversal elíptica (13 mm x 5 mm) (figura 3).

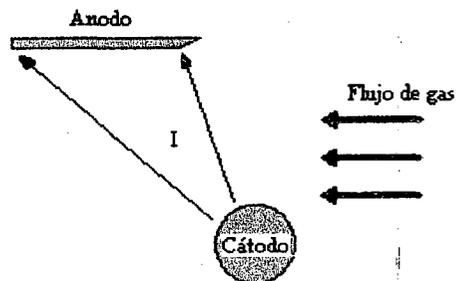


Figura 3. Esquema de cátodo tubular y ánodo plano

Cada uno de ellos está individualmente limitado en corriente por una resistencia de 12 k Ω conformada por grupos de 10 resistencias de 4.7 k Ω 25 W en arreglos serie-paralelo con el fin de aumentar la capacidad de disipación.

El enfriamiento por agua del cátodo permite extraer fácilmente el calor generado por la caída catódica, que de otra forma debería ser extraído por la corriente de gas.

Este punto es importante dado que la separación entre cátodo y ánodo es de unos pocos centímetros y la caída de tensión en la descarga es inferior a 2000 V, que comparada con una caída de tensión en la zona catódica de algunos centenares de Volt, permite concluir que la fracción de potencia disipada en esta región es una parte significativa del total.

Los ánodos de 70 mm de largo, 13 mm de ancho y un espesor de 5 mm fueron dispuestos sobre placas cerámicas, de forma tal que se alcanza una zona excitada de 900 mm de longitud (L_D). El cátodo y los ánodos se encuentran ubicados dentro de la zona de descarga de manera tal que la corriente eléctrica es perpendicular a la dirección del flujo de los gases (fig. 3). Esto asegura un corto tiempo de pasaje de la mezcla a través de la zona de bombeo y por lo tanto una menor elevación de la temperatura, lo que ayuda a evitar que el nivel inferior [10^{10}] de la transición de $10.6 \mu\text{m}$ del CO_2 se pueble demasiado, con la consiguiente reducción de la ganancia.

Este sistema de excitación fue ensayado con mezclas de $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He}$ en distintas proporciones. Para las mezclas más ricas en He se alcanzaron corrientes de hasta 8 A (restringida por la capacidad de disipación de las resistencias de balasto) con caídas de tensión entre cátodo y ánodo de 1200 a 1300 V lo cual da una potencia entregada de alrededor de 10 kW, que en el volumen típico equivale a una densidad de potencia de unos 5 W/cm^3 .

A partir de la obtención de un plasma uniforme y estable se midió la ganancia de pequeña señal. Con tal fin se utilizó un láser convencional de CO_2 no sintonizable el cual fue dirigido a través de la zona de descarga en dirección perpendicular al flujo de gases y a la corriente eléctrica. La ganancia en potencia (G_P) fue calculada a partir de la razón de las potencias registradas con el láser de prueba operando y la descarga de alta corriente alternativamente encendida y apagada. Las medidas fueron realizadas con una unidad de lectura Coherent Field Master y una cabeza de tipo termopila con capacidad de resolución de 10 mW y una potencia mínima detectable de 100 mW. La intensidad del haz de salida del láser de prueba se mantuvo por debajo de los 5 W/cm^2 lo que garantizaba la operación dentro del régimen de pequeña señal dado que la intensidad de saturación típica para estas mezclas se ubica en el rango de 200 a 400 W/cm^2 .

Con estos datos la ganancia de pequeña señal α_0 se calculó como $\alpha_0 = \ln(G_P)/L_D$.

Dado que este sistema será operado como un láser, era de importancia relevar un mapa espacial de la ganancia de pequeña señal. Esta fue registrada en 18 puntos dentro de la zona de descarga. La figura 4 muestra los resultados obtenidos en función de 6 posiciones horizontales espaciadas de a 1 cm y medidas a partir del cátodo; y 3 alturas distintas, también espaciadas 1 cm y medidas a partir del ánodo. El sistema fue operado a una presión de 40 Torr y en proporción 1:1,5:26.

La figura 5 muestra las medidas correspondientes a una proporción 1:1,5:16,5

La mayor ganancia obtenida ($0,72 \text{ m}^{-1}$) se encuentra dentro del rango de valores determinados por otras experiencias [1,2].

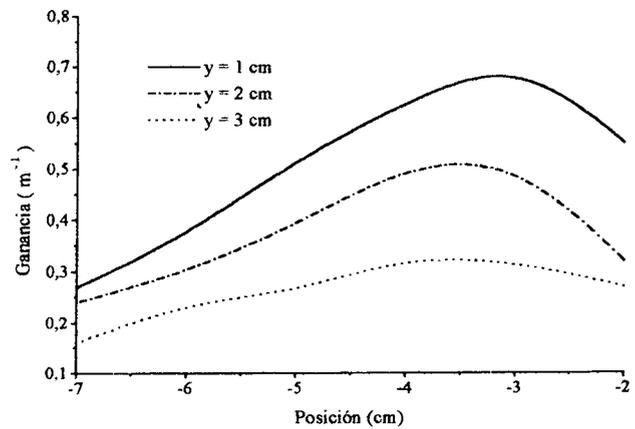


Figura 4. Ganancia de pequeña señal para distintas posiciones. Mezcla 1:1,5:26

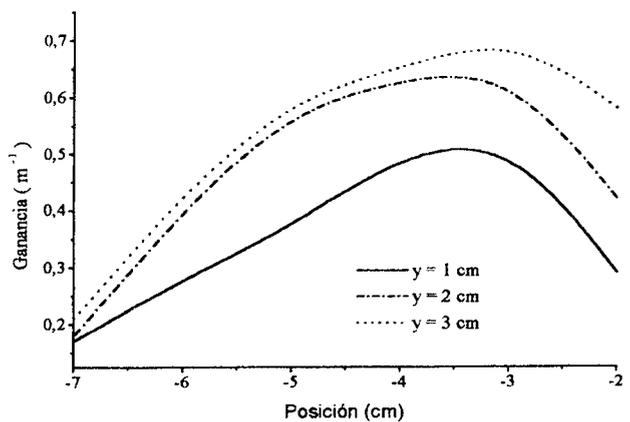


Figura 5. Ganancia de pequeña señal para distintas posiciones. Mezcla 1:1,5:16,5

Conclusiones

- Se obtuvieron descargas uniformes y estables en mezclas de $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He}$ a presiones de alrededor de 40 Torr y corrientes de hasta 8 A, con potencias entregadas al medio de 10 kW.
- Las ganancias medidas se encuentran en concordancia con valores previamente reportados.
- Con los volúmenes excitados y el perfil medido de ganancia, se puede estimar que con un resonador cuyo eje óptico se ubique sobre la zona de máxima ganancia se podría obtener una potencia de salida continua de alrededor de 1000 W.

Referencias

- [1] S.K. Nikumb et al, *J Phys E: Sci Instrum*, **20**, 911, 1987.
- [2] A. K. Nath y A. K. Biswas, *IEEE J. Quantum Electron*, **33**, 1278, 1997