

## PARAMETROS DEL PLASMA DE UNA DESCARGA CONTRAIDA DE ALTA FRECUENCIA ENTRE DOS ELECTRODOS PARA PRESIONES DE 100 A 760 TOR

*Gustavo Zambrano R.  
Universidad Javeriana  
Universidad Autónoma*

---

### Resumen

En el trabajo se han estudiado las características electrofísicas de una descarga contraída de alta frecuencia ( $f = 40$  MHz) entre dos electrodos, para presiones del orden de la presión atmosférica. Se obtuvieron los parámetros eléctricos de la descarga, la distribución de la temperatura cinética en la zona de la descarga, y la temperatura vibracional de las moléculas de nitrógeno en el canal de la descarga. También se llevó a cabo la evaluación de los parámetros del plasma de la descarga.

Se determinó finalmente que la descarga contraída de alta frecuencia entre dos electrodos a presiones del grado de la presión atmosférica se puede considerar como un sistema en desequilibrio ( $T_e > T_v > T_0 \simeq T_r$ ), donde se pueden crear condiciones óptimas para la realización efectiva de procesos plasmotecnológicos concretos.

La investigación fue realizada en el laboratorio de física del plasma de la Universidad de la Amistad de Pueblos, Moscú.

### INTRODUCCION

El interés existente hacia la plasmquímica y su aplicación en los procesos tecnológicos están relacionados en gran parte con la posibilidad de intensificar los procesos productivos. Como es sabido, la velocidad de las

reacciones químicas depende exponencialmente de la temperatura y en el plasma de una descarga las temperaturas pueden alcanzar muchos miles de grados.

Pero fuera de que es necesario aumentar la velocidad de las reacciones químicas, es importante también utilizar racionalmente la energía del campo electromagnético; para lo cual es indispensable consumir esta energía no uniformemente en todos los grados de libertad de las partículas, sino preferiblemente en aquellos que permitan utilizar la energía del campo electromagnético de la manera más efectiva. Por esa razón, para que las reacciones químicas transcurran con efectividad, muy a menudo es indispensable que estas se produzcan en condiciones de desequilibrio. Para fines prácticos los sistemas de mayor significado son aquellos que tienen desequilibrio de tipo  $T_e \gg T_v \gg T_o \simeq T_r$  donde con  $T_e$ ,  $T_v$ ,  $T_o$ ,  $T_r$  se han designado respectivamente: temperatura de los electrones, temperatura vibracional, cinética y rotacional. Un significado especial para los sistemas en desequilibrio, tiene el desequilibrio  $T_v \gg T_o$ , ya que para muchas reacciones químicas, la energía vibracional es la más efectiva para llevar a cabo las reacciones directas; mientras las inversas están relacionadas con el calentamiento general del sistema, o sea, están determinadas por la temperatura del gas de la descarga o temperatura cinética.

De lo dicho anteriormente, queda claro cual es el significado que tiene el estudio de la distribución de temperaturas en un sistema plasmotecnológico.

En la actualidad han sido ampliamente investigadas las descargas luminiscentes y las descargas de superalta frecuencia; pero han sido relativamente poco estudiadas las descargas de alta frecuencia en forma contraída. En este tipo de descarga, por una serie de razones (la geometría de la descarga, las presiones altas del orden de la atmosférica, grandes aportes energéticos, etc.), la corriente de descarga se concentra en una zona muy estrecha. De otro lado, en una descarga de alta frecuencia debido a una relativa alta densidad de corriente, u alto índice de ionización y una bien marcada heterogeneidad espacial; se crean las condiciones para que las reacciones químicas allí desencadenadas se produzcan con un alto coeficiente de rendimiento [1]. Para aclarar cuales son las perspectivas de este tipo de sistemas, es importante investigar la distribución de temperaturas de la descarga de alta frecuencia y estudiar la posibilidad de crear en este tipo de descarga un desequilibrio considerable entre las temperaturas vibracional y cinética.

En el trabajo se han investigado las características electrofísicas de la descarga contraída de alta frecuencia ( $F=40$  MHz) entre dos electrodos, para presiones del orden de la presión atmosférica y además se dedicó es-

pecial atención al estudio de las temperaturas vibracionales y cinéticas de la descarga y a las posibilidades de crear las condiciones para las cuales en este tipo de descarga se pueda lograr un desequilibrio entre las temperaturas vibracional y cinética.

Para determinar las características de este tipo de descarga fueron escogidos como gases para formar la descarga; un gas atómico, el argón, uno molecular, el nitrógeno y el aire. Se obtuvieron los parámetros eléctricos de la descarga (la tensión de alta frecuencia entre dos electrodos, el valor de la corriente, el desplazamiento de fase entre la corriente y la tensión y la potencia de la descarga), la distribución de la temperatura cinética en la zona de la descarga, y la temperatura vibracional de las moléculas de nitrógeno en el canal de la descarga. Se llevó a cabo la evaluación de los parámetros del plasma de la descarga de alta frecuencia (la densidad de los electrones,  $N_e$ ; la temperatura de los electrones,  $T_e$ ; y la frecuencia de choque de los electrones con las partículas neutras,  $V_m$ ).

## METODOS DE MEDICION

La descarga de alta frecuencia se produjo entre dos electrodos situados verticalmente que terminaban en puntas cónicas de cobre y que se hallaban colocados dentro de una cámara de cuarzo cuyo diámetro era de 100 mm. La descripción de la instalación experimental se encuentra en [2].

La presión de los gases que formaban la descarga se hacía variar en el intervalo de 100 a 760 Tor y la distancia entre los electrodos de 0.5 a 5 cm. Las condiciones experimentales (resistencia de onda del tracto de alta frecuencia, la tensión entre los electrodos y la geometría de la descarga) fueron escogidos de tal manera que la descarga de alta frecuencia se produjera, para el intervalo de frecuencias antes indicado, en forma contraída y la temperatura de los electrones ( $T_e$ ) en el plasma de la descarga no pasará de unos cuantos electrovoltios y se encontrará en la zona donde las secciones de excitación de los niveles vibracionales del nitrógeno son máximas.

La tensión ( $V$ ) de los electrones se midió con ayuda de un divisor capacitivo de tensión, la corriente ( $I$ ) de la descarga se determinó en base a la caída de tensión en una resistencia de película de carbón antiinductiva (R4), que estaba conectada en serie con los electrodos (Ver figura No. 1). Las señales de la corriente y la tensión se enviaban a un osciloscopio de alta frecuencia de dos canales que permitían ver simultáneamente en la pantalla las dos señales y de esta manera se podía medir el desplazamiento de fase ( $Y$ ), entre ( $V$ ) y ( $I$ ) y calcular la potencia introducida a la descarga.

La distribución de la temperatura cinética ( $T_o$ ) en la zona de la des-

carga se determina con la ayuda de la interferometría con laser [2].

El valor ( $T_o$ ) se calculó en base a la distribución del índice de refracción del gas en la zona de descarga con ayuda a la expresión [2]:

$$Tr = \frac{No - 1}{Nr - 1} * To$$

donde:  $No$ ,  $To$ -índice de refracción y temperatura del gas fuera de la descarga.

En las condiciones concretas de una descarga contraída de alta frecuencia se cumplen los criterios de aplicabilidad del método óptico de determinación de la temperatura vibracional ( $Tv$ ) del estado normal  $X^1 \Sigma^+ g$  de las moléculas de nitrógeno [3]. Por eso, la temperatura vibracional se determinó con ayuda del método espectroscópico a partir de la intensidad relativa de las emisiones resultantes de la transición del estado de excitación  $C^3\Pi u$  al estado  $B^3\Pi g$  del nitrógeno [4].

## RESULTADOS

Para distancias entre los electrodos de más de 1 cm. y presiones de  $p \geq 100$  Torr, la descarga de alta frecuencia se producía de forma espontánea. Este hecho permitió medir los parámetros del tracto de alta frecuencia y calibrar el esquema de las mediciones eléctricas. Cuando la descarga de alta frecuencia no se había encendido, la tensión entre los electrodos variaba entre 500 y 1200 voltios, la corriente entre 0.06 y 0.16 A y el desplazamiento de fase entre la corriente de la descarga y la tensión era igual a  $\Pi/2$ .

Este régimen de la descarga correspondía una onda estacionaria con un vientre de tensión y un nodo de corriente en las cercanías del electrodo de alto voltaje. Al producirse el encendido de la descarga, disminuía el valor de la corriente de la descarga. Para presiones de  $p = 100$  Tor, en el nitrógeno, en el aire y en el argón se presentaba una característica corriente-tensión ascendente. Con el aumento de la presión la característica corriente-tensión se tornaba descendente.

Para el nitrógeno y el aire; este cambio se produce cuando  $p = 200$  Tor y para el argón cuando  $p > 500$  Tor. Este hecho está relacionado con el aumento de la temperatura del gas en el canal de la descarga al aumentar la presión, que trae como consecuencia la disminución de la densidad del gas (por su expulsión de la zona caliente de la descarga) y por consiguiente el aumento de la velocidad de ionización. Para el argón este cambio se produce para presiones mayores debido a que, la temperatura del gas es

mucho menor que la del nitrógeno y la del aire. La componente reactiva de la impedancia total tenía carácter capacitivo.

Los valores de  $V$ ,  $I$  y  $Z$  dependían de la potencia procedente del generador de alta frecuencia, de la presión y tipo de gas de la descarga y de la distancia entre los electrodos. La potencia eléctrica de la descarga oscilaba entre 40 y 140 vatios, la tensión entre los electrodos entre 350 y 650 voltios, la corriente de la descarga entre 0,2 y 0,9 A y la densidad de corriente entre 6 y 25 A/cm<sup>2</sup>.

La temperatura cinética ( $T_o$ ) en el canal de la descarga para el nitrógeno alcanzaba a la presión atmosférica 3.400°K; para el aire 4.000°K y para el argón 1.300°K (ver figuras 2 y 3). Al disminuir la presión en la cámara, la temperatura cinética en el canal de la descarga se hacía menor y la distribución de ( $T_o$ ) en la dirección transversal era más suave (ver figura 4).

La temperatura vibracional en el canal de la descarga era de 4.600 a 5.400°K cuando aumentaba la potencia de la misma de 40 a 80 vatios y dentro de los límites del error de las mediciones no dependía de la presión. (ver figuras 5 y 6).

El análisis de espectroscopia de masas de los productos de las reacciones plasmquímicas de la descarga en el aire, mostró que la concentración de equilibrio de los óxidos de nitrógeno alcanzan un 12%.

Con ayuda de los resultados de las mediciones anteriores se llevaron a cabo los cálculos de los valores medios en el canal de la descarga, de la temperatura ( $T_e$ ) y densidad ( $N_e$ ) de los electrones, así como también de la frecuencia de choque de los electrones con las partículas neutras ( $V_m$ ). Los resultados de esos cálculos están consignados en la tabla (1).

El valor de la temperatura rotacional ( $T_r$ ) en el nitrógeno para presiones  $p \geq 100$  Tor, se tomó en el experimento igual a la temperatura cinética ( $T_o$ ) por razón de la rápida relajación cinético-rotacional.

## CONCLUSIONES

La descarga contraída de alta frecuencia entre dos electrodos a presiones del orden de la presión atmosférica se puede considerar como un sistema en desequilibrio ( $T_e > T_v > T_o \simeq T_r$ ), donde se produce el calentamiento del gas hasta temperaturas de miles de grados. Variando la geometría de la descarga, los parámetros eléctricos, la presión y el tipo de gas, se pueden variar  $T_v$ ,  $T_o$  y su distribución en el espacio, creando de esta manera condiciones óptimas para la realización efectiva de procesos plasmotecnológicos concretos.

Tipo de gas	$T_e$ [eV]	$V_m$ [SEG <sup>-1</sup> ]	$N_e$ [CM <sup>-3</sup> ]	$E$ [V/CM]
Argon	7	$4 * 10^{11}$	$4 * 10^{14}$	280
Nitrogeno	0.9	$3 * 10^{11}$	$9 * 10^{14}$	420
Aire	1	$3 * 10^{11}$	$6 * 10^{14}$	500

Tabla 1: Parámetros del plasma de la descarga

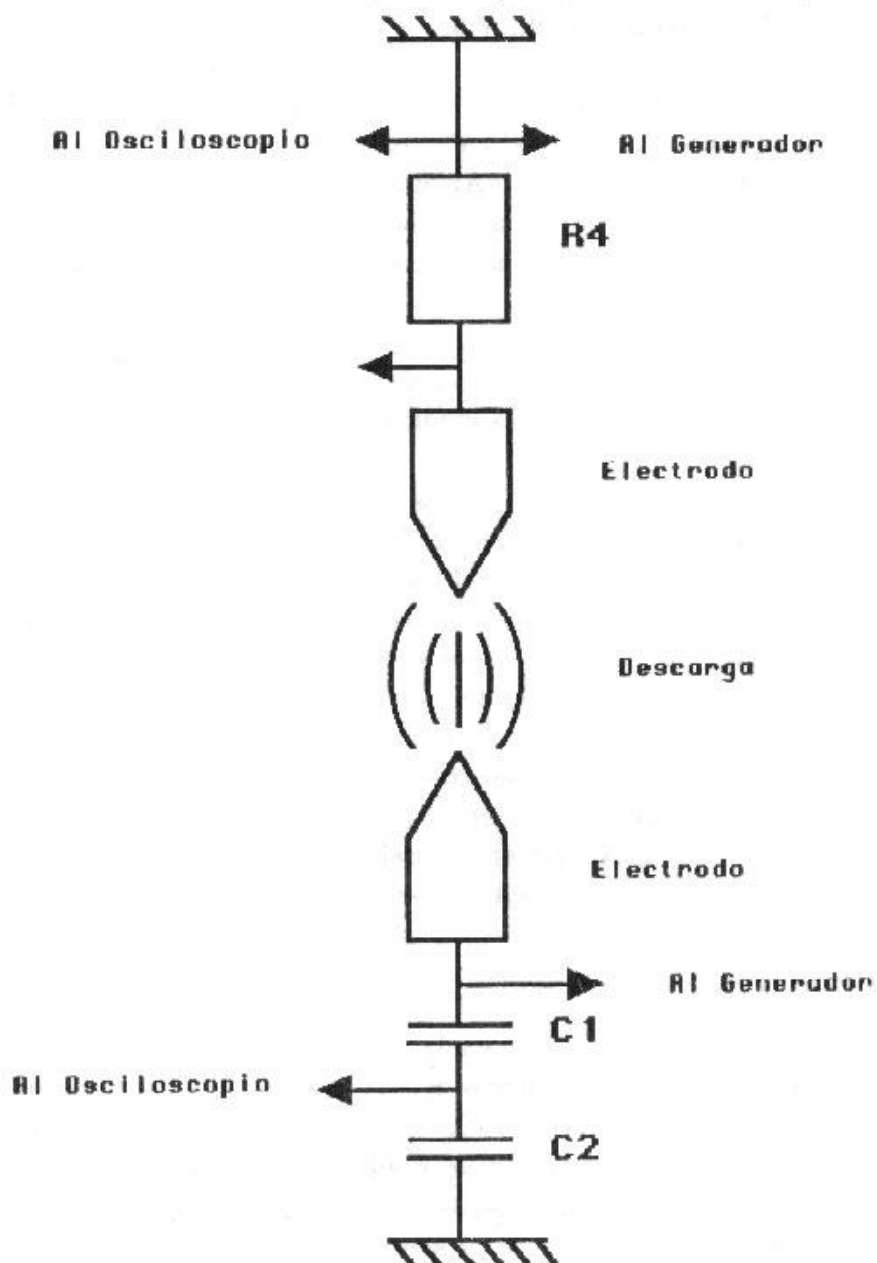


Fig. 1: Esquema del sistema de mediciones electricas.

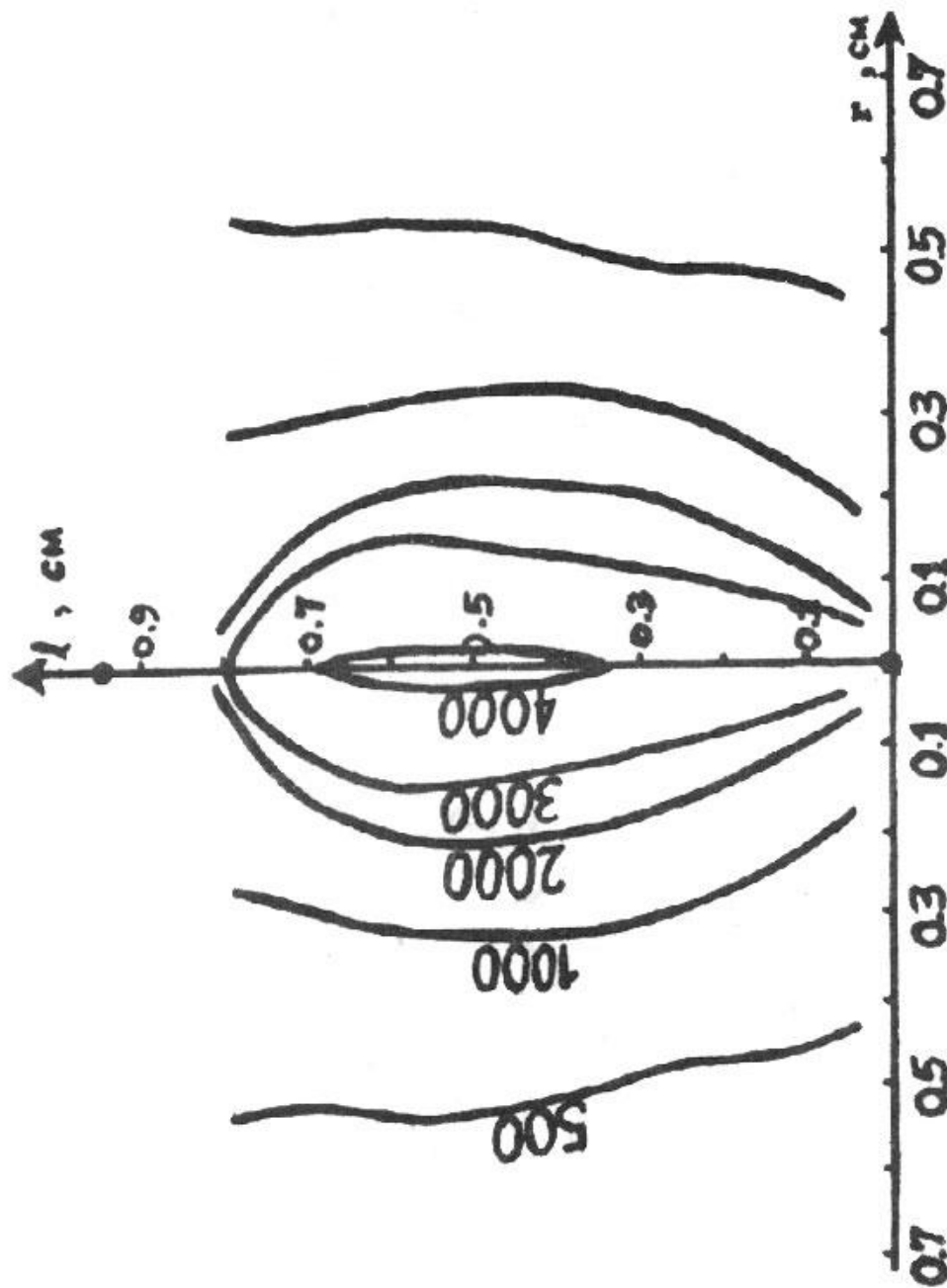


Fig. 2: Distribución de la temperatura cinética ( $T_o$ ) para una descarga de R.F. entre dos electrodos en aire  $P \approx 1$  ATM;  $\ell = 1$  CM.

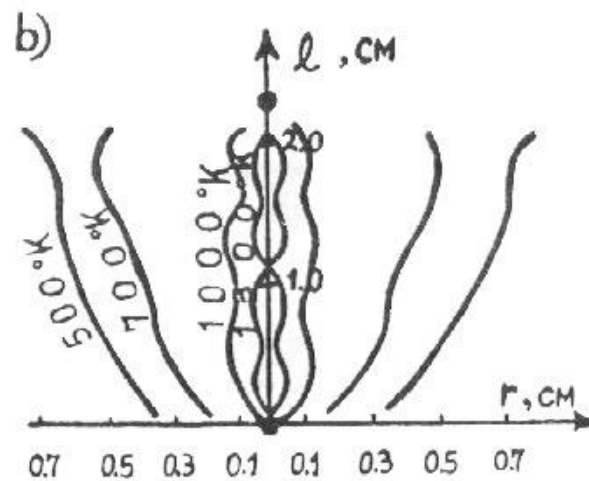
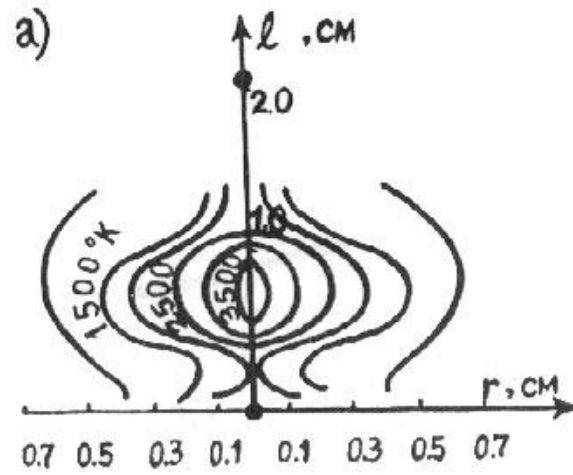


Fig. 3: Distribución de temperatura cinética ( $T_0$ ) para una descarga contraída de R.F. entre dos electrodos en: a)  $N_2$ ,  $P \simeq 1$  ATM. b) Ar,  $l \simeq 2$  CM.



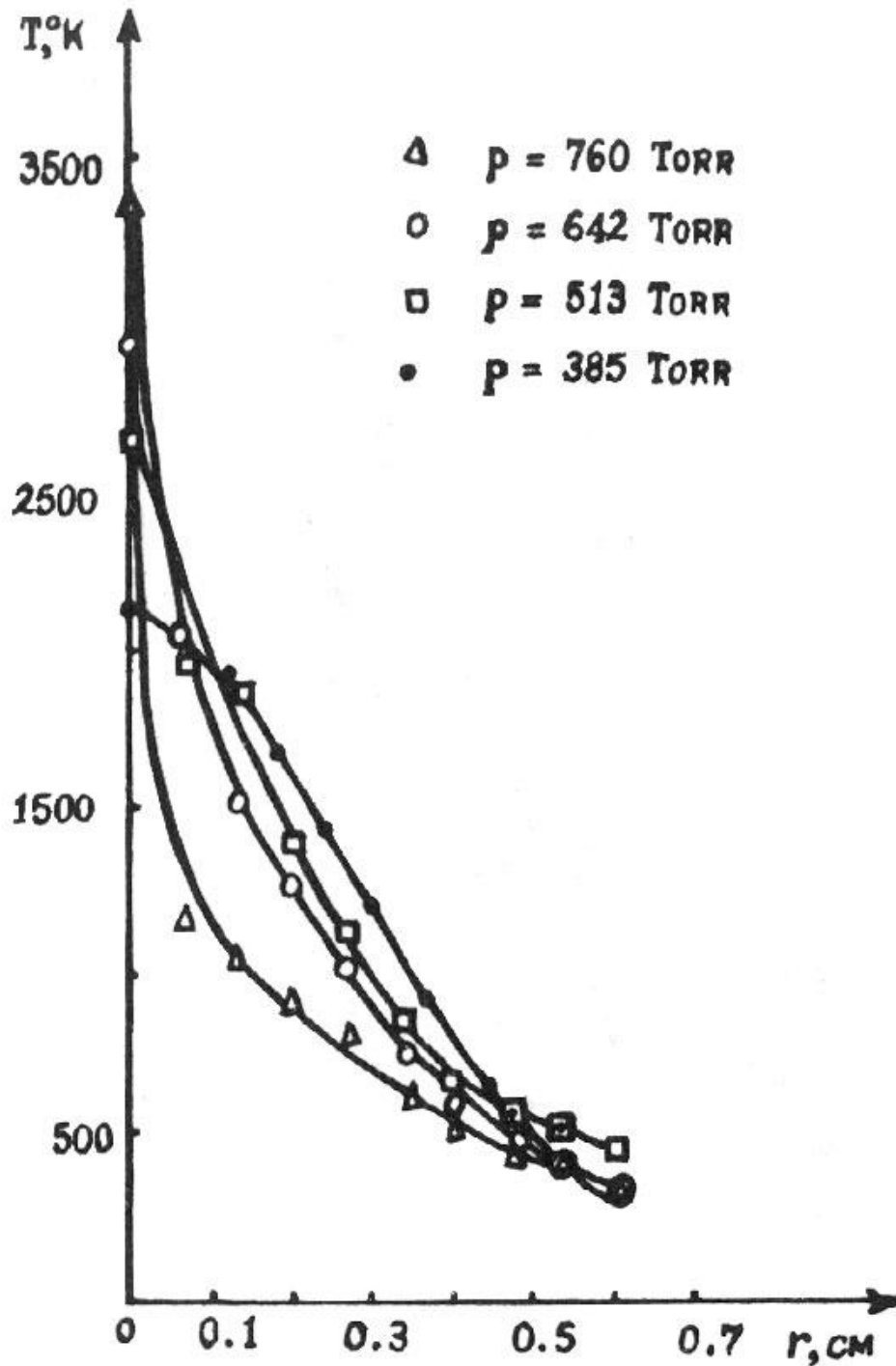


Fig. 4: Distribución de la temperatura cinética ( $T_0$ ) en el canal de la descarga en dependencia de la presión gas:  $N_2$ ,  $\ell \simeq 1$  CM.

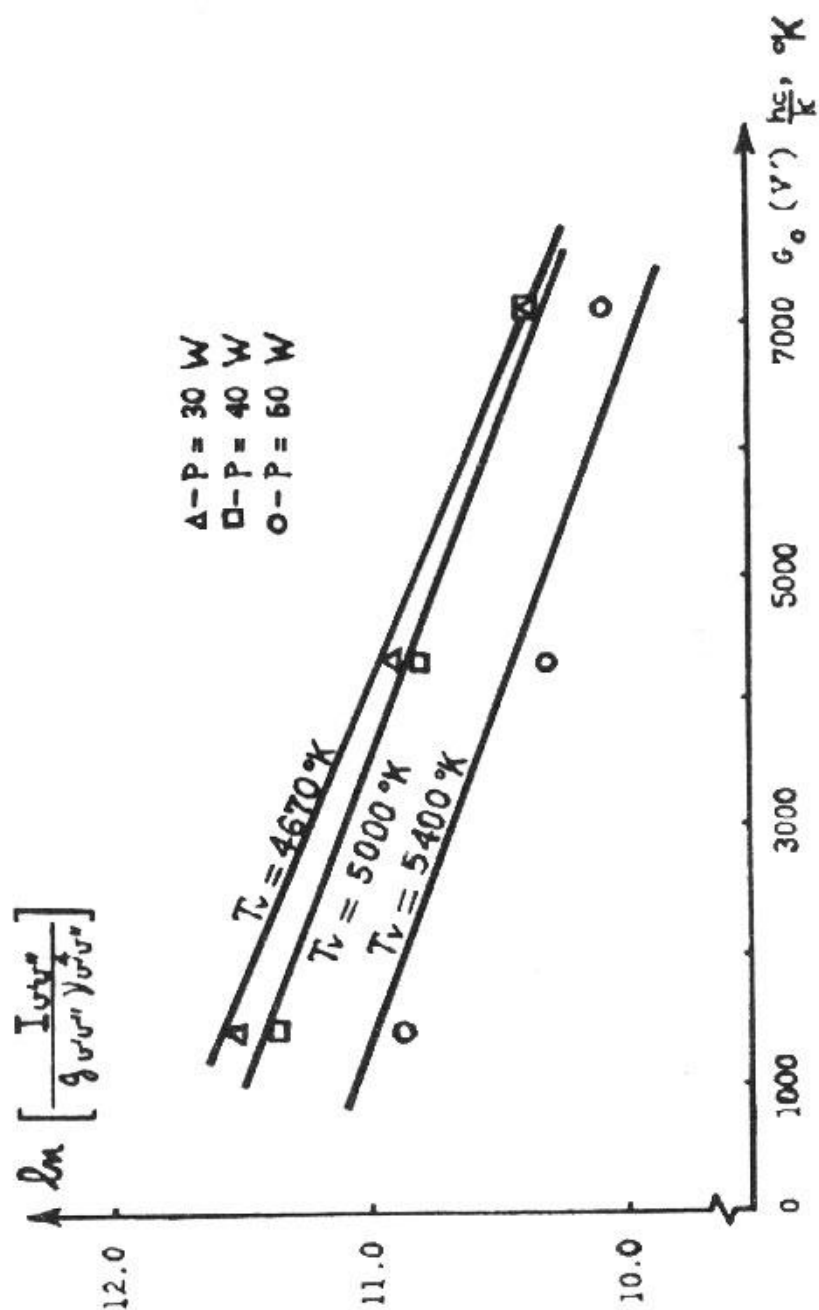


Fig. 5: Temperatura vibracional de una descarga de R.F. entre dos electrodos en nitrógeno en dependencia de la potencia  $P = 375$  Tor.

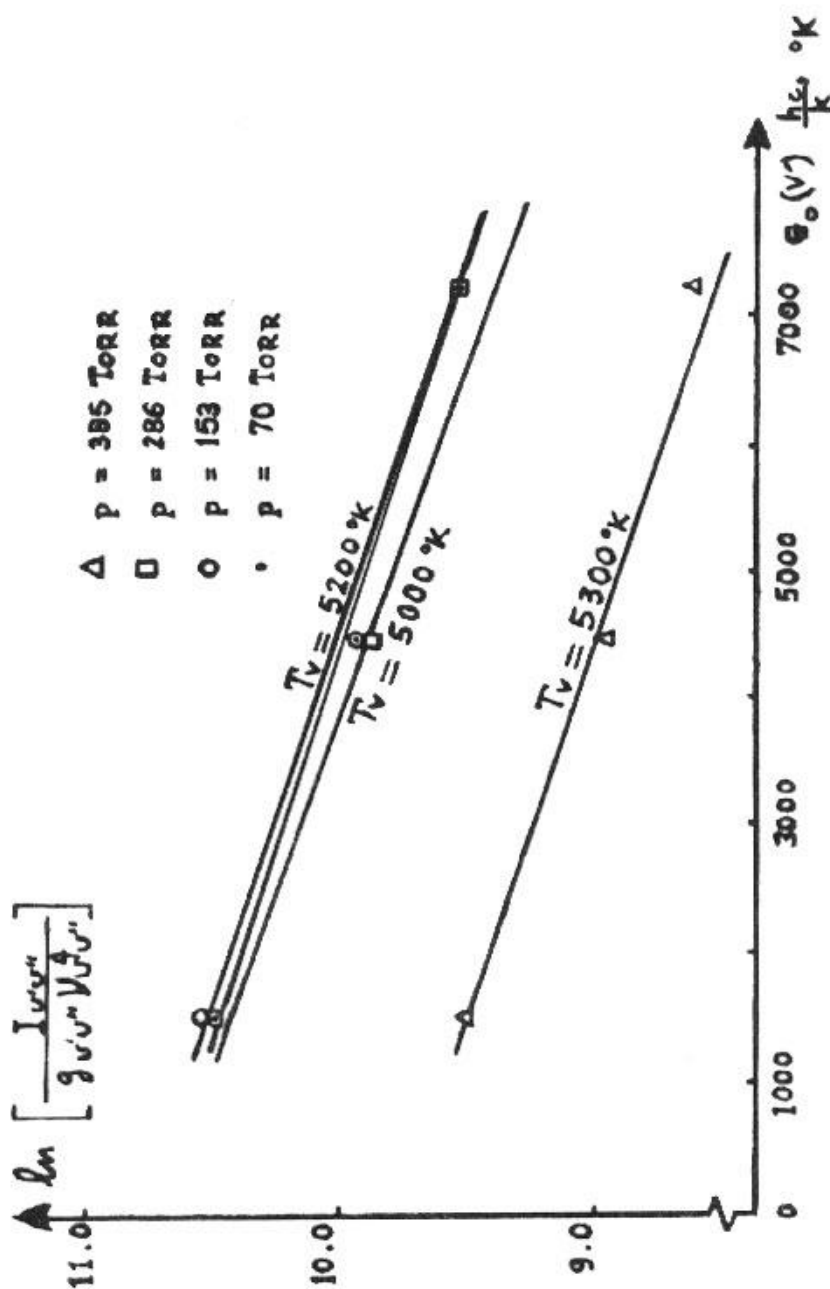


Fig. 6: Temperatura vibracional de una descarga de R.F. entre dos electrodos en nitrógeno de dependencia de la presión.

**Referencias**

- [1 ] Rusanov, V.D.; Fridman, A.A. *Física del Plasma Químicamente activo*. Moscú, "Nauka", 1984.
- [2 ] Gai, I.A.; Kariaka, V.I.; Zambrano, G.A. *Medición de la temperatura del gas en una descarga de alta frecuencia entre dos electrodos para presiones del orden de la presión atmosférica*. Moscú, V.I.N.I.T.1, pag. 81-84, 5.03.84. No. 1316-84.
- [3 ] Kosoruchkina, A.D.; Trejov, E. S. *Optica y espectroscopia*. 1980, T.40, edición 1.
- [4 ] Kariaka, V.I., Zambrano, G.A. *Temperaturas vibracional y cinética de una descarga de alta frecuencia entre dos electrodos para presiones del orden de la presión atmosférica*. Moscú, V.I.N.I.T.I., T.2, pag. 25-28, 29.05.85, N 3714-85.