

# OSCILACIONES DE ALTA FRECUENCIA OBSERVADAS EN EL CIRCUITO DE DESCARGA DE UN EQUIPO PLASMA FOCUS

R. Vieytes<sup>1</sup>, V. Herrero<sup>2</sup>, J. Guglielmono<sup>3</sup>, M. Bossert<sup>3</sup>, C. Moreno<sup>4</sup>

<sup>1</sup> EST, IESE-Dto. de Física FCEyN, UBA-INFIP-PLADEMA

<sup>2</sup> EST, IESE-CNEA-PLADEMA

<sup>3</sup> EST, IESE

<sup>4</sup> Dto. de Física FCEyN, UBA-INFIP-PLADEMA

En este trabajo se analizan las oscilaciones de alta frecuencia observadas en el inicio de las señales eléctricas medidas en un equipo Plasma Focus al trabajar con diversas configuraciones de conexionado. El equipo se energiza con un banco de capacitores de 600  $\mu\text{F}$  y es operado con polaridad negativa ( $V_0$  entre  $-2,5$  y  $-3,5$  kV), es decir el electrodo interno actúa como cátodo de la descarga, y en régimen cercano al críticamente amortiguado. Como gas de trabajo se utilizó nitrógeno a presiones en el rango 0,5–5 mbar. El conexionado entre el banco y el juego de electrodos se realizó empleando alternativamente dos líneas de transmisión de baja impedancia. Se encontró que las oscilaciones observadas son independientes tanto de la tensión como de la presión de trabajo en el rango explorado dependiendo de las características eléctricas del conexionado. Dichas frecuencias, como así también su amortiguamiento, se comparan con un modelo eléctrico de parámetros distribuidos encontrándose un muy buen acuerdo.

Palabras claves: Descargas Plasma Focus; Oscilaciones de alta frecuencia.

*In the present work the high frequency oscillations present in the electrical signals of a Plasma Focus discharge are analyzed. The Plasma Focus device was energized by a 600  $\mu\text{F}$  capacitor bank operated in a nearly critically damping regime and with inverted polarity ( $V_0$  between  $-2.5$  y  $-3.5$  kV), that is, the inner electrode was the discharge cathode. Nitrogen at pressures in the range of 0.5–5 mbar was used as working gas. The connection between the capacitor bank and the electrodes was a low impedance transmission line with length shorter than 1 m. It was found that the observed frequencies are independent of the working gas pressure and voltage, and that only depends on the electrical characteristic of the capacitor-electrode connection. The value of these frequencies and its damping factor are compared with the results of a distributed parameters electrical model obtaining a good agreement.*

*Key words: Plasma Focus discharge; High frequency oscillations.*

## I. INTRODUCCIÓN

En las señales eléctricas generadas durante las descargas Plasma Focus es habitual observar oscilaciones de alta frecuencia al comienzo de la descarga, tanto durante el retraso de la ruptura dieléctrica, es decir, durante el lapso de tiempo en que hay tensión aplicada sobre el juego de electrodos pero el gas de su interior aún no pasó a estado conductor (oscilaciones de circuito abierto), o cuando comienza a circular de manera importante corriente (oscilaciones de circuito cerrado). En un trabajo anterior<sup>(1)</sup> se interpretó a las frecuencias de las oscilaciones a circuito abierto como las frecuencias de resonancia de un circuito en el cual existe una línea de transmisión. Una exposición didáctica del tema puede encontrarse en la referencia 2.

En el presente trabajo se estudian las oscilaciones de circuito cerrado, comparando los resultados experimentales con los predichos por el modelo teórico presentado en la referencia 1; con el propósito de clarificar la dependencia de las frecuencias medidas con los parámetros de operación del equipo (tensión y presión de llenado de la cámara).

El desarrollo del trabajo es el siguiente: en la sección II se describe el arreglo experimental y las diagnósticas utilizadas, en la sección III se presenta brevemente el modelo teórico y en la sección IV se comparan sus re-

sultados con los obtenidos de las mediciones, quedando la sección V para los comentarios finales.

## II. ARREGLO EXPERIMENTAL Y MEDICIONES

Las mediciones se llevaron a cabo en el equipo CCII del Laboratorio Plasma Focus, Departamento de Física FCEyN, UBA-INFIP-PLADEMA, operado en régimen cercano al críticamente amortiguado (los parámetros eléctricos del equipo se presentan en la Tabla 1). El juego coaxial de electrodos utilizado está formado por uno central, cilíndrico, macizo de titanio, (de  $(9,5 \pm 0,1)$  mm de diámetro) que actúa como cátodo de la descarga y que tiene una longitud de  $(100 \pm 1)$  mm. El electrodo externo, que actúa como ánodo, está formado por un conjunto dieciséis barras de bronce de  $(3,0 \pm 0,1)$  mm de diámetro y  $(100 \pm 1)$  mm de longitud cuyos ejes están dispuestos equiespaciadamente sobre una circunferencia de  $(52,4 \pm 0,1)$  mm de diámetro. La presión del gas de trabajo (nitrógeno) fue variada entre 0,5 y 5,0 mbar, mientras que la tensión de carga se fijó en  $-2,5$ ;  $-3,0$  ó  $-3,5$  kV.

El banco de capacitores se conectó al juego de electrodos mediante dos tipos de líneas de transmisión; la denominada A, que tiene una longitud de 0,97 m y una impedancia característica de  $1,75 \Omega$ , y la denominada B de

**TABLA 1:** PARÁMETROS ELÉCTRICOS DEL EQUIPO.

Capacidad ( $C_0$ )	$(600 \pm 6\mu) \text{ F}$
Inductancia ( $L$ )	$(6,0 \pm 0,1) \text{ nH}$
Resistencia ( $R$ )	$(0,104 \pm 0,001) \Omega$
Inductancia de carga ( $L_g$ )	$(139 \pm 12) \text{ nH}$

de 0,65 m de longitud y una impedancia característica de  $12,5 \Omega$ . Esta última línea se construyó con un arreglo paralelo de cuatro cables coaxiales (RG-213) de  $50 \Omega$  todos de la misma longitud; mientras que para la línea A se utilizó cables triaxiales, un cable RG-213 con una segunda malla exterior, empleando la malla exterior y la interior como conductores de la configuración coaxial.

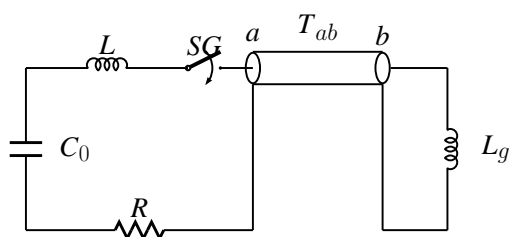
Como diagnóstico se emplearon la medición de la derivada temporal de la corriente circulante en la descarga,  $dI/dt$  y la caída de tensión entre los electrodos  $V(t)$ ; para ello se utilizó una bobina de Rogowski no integradora, y un divisor de tensión ultra rápido respectivamente. Ambas señales fueron adquiridas en un osciloscopio digitalizador Tektronix (TDS 540A, 500 MHz de ancho de banda analógico y 1 Gs/s de máxima frecuencia de muestreo) tomando un punto por señal cada dos nanosegundos (0,5 Gs) y luego transferidas a una computadora personal para su posterior análisis.

### III. MODELO

El circuito eléctrico que se presenta en la figura 1 se considera formado por una malla  $RLC$  serie, que contiene además una llave rápida ( $SG$ ) y el extremo "a" de una línea de transmisión  $a-b$  la cual está caracterizada por una impedancia  $Z_0$  y una longitud  $l$ . El extremo "b" de dicha línea está conectado a los electrodos del equipo Plasma Focus. Esta última conexión tiene una inductancia intrínseca  $L_g$ , asociada principalmente a la geometría del conexionado debido a los requerimientos de aislación necesarios. Tanto la capacidad, la resistencia, como la inductancia parásita del juego de electrodos, las placas colectoras y la propia descarga son despreciadas a las frecuencias de trabajo, ya que su impedancia es mucho menor que la impedancia inductiva antes comentada. La impedancia total  $Z_T$  en la malla asociada con el extremo "a" de la línea de transmisión es:

$$Z_T = R + j \left( \omega L - \frac{1}{\omega C} \right) + Z_a$$

donde  $\omega$  es la frecuencia angular de la correspondiente componente de Fourier y  $Z_a$  es la impedancia de entrada de la línea de transmisión en el punto "a", la cual esta dada



**Figura 1:** Circuito equivalente para el equipo Plasma Focus

por:

$$Z_a = Z_0 \frac{Z_l + Z_0 \tanh(j\omega T_{ab})}{Z_0 + Z_l \tanh(j\omega T_{ab})}$$

donde  $Z_l$  es la impedancia de carga conectada en el extremo "b" de la línea, que, por lo expuesto anteriormente, se considera puramente inductiva:  $Z_l = j\omega L_g$ ;  $T_{ab}$  es el tiempo de tránsito de la señal a lo largo de la línea ( $T_{ab} = l/c$ , con  $c$  la velocidad de transmisión de las señales eléctricas en la línea). Las frecuencias de resonancia  $\omega$  pueden ser obtenidas como los ceros de la ecuación

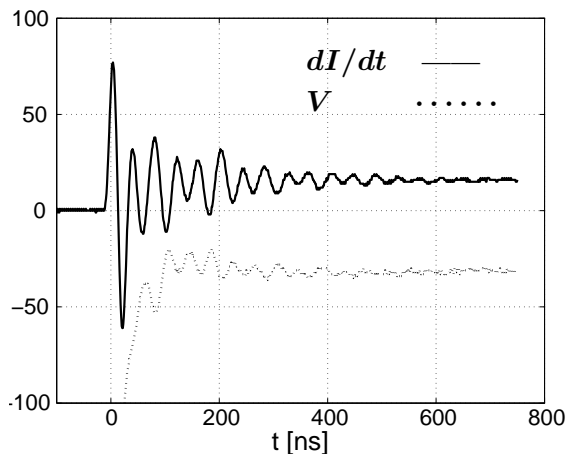
$$Z_T = 0 \quad (1)$$

Esta ecuación no tiene solución analítica en el caso general. Puede predecirse, a partir de su estructura, que hay un número infinito de soluciones (modos) para  $\omega$  que pueden ser encontradas por métodos numéricos estándares. Las frecuencias de resonancia serán en general complejas, su parte imaginaria (positiva) esta asociada con el amortiguamiento del modo, y su parte real con la frecuencia de oscilación del mismo. Desde el punto de vista experimental, no todos los modos pondrán ser observados, ya que, dependiendo de las condiciones iniciales, sólo algunos de ellos serán excitados. Las condiciones iniciales de este sistema están dadas esencialmente por la velocidad de cierre de la llave rápida, la cual se pone de manifiesto en el "tiempo de subida" de las señales eléctricas medidas.

### IV. RESULTADOS

En la figura 2 se presentan señales adquiridas de la tensión interelectródica y la derivada temporal de la corriente. Las señales corresponden a la línea de transmisión B para una descarga que fue realizanda a una presión de 0,5 mbar y el banco de capacitores se cargado a  $-2,5 \text{ kV}$ . Como puede observarse, las oscilaciones están presentes tanto en la señal de la bobina de Rogowski como en la señal del divisor resistivo, razón por la cual se debe descartar que sean resonancias del los instrumentos. Es importante notar que el tiempo característico de la descarga ( $\sim 200 \mu\text{s}$ ) no puede evidenciarse en la figuras debido a que la escala temporal fue elegida para ilustrar el comportamiento de las oscilaciones de alta frecuencia. Nótese, además, que la amplitud inicial de las oscilaciones en la señales de  $dI/dt$  son tan grandes como la señal misma. Si bien se presentan a título de ejemplo, sólo un caso, se encontró que los valores de los períodos medidos son independientes de la tensión y la presión en la que se realizan las descargas. Las correspondientes señales para la línea A difieren únicamente en el valor de los períodos observados (y su amortiguamiento), razón por la cual no se presentan. En la Tabla 2 se presentan los valores de los períodos y amortiguamientos predichos por el modelo (ecuación (1)) y los medidos, conjuntamente con la resistencia inferida de este amortiguamiento. Los valores medidos coinciden dentro del error experimental en todo el rango de presiones y tensiones explorado.

Como se puede observar existe un buen acuerdo entre los valores medidos y los que predice el modelo. El valor de la inductancia  $L_g$  que se puede obtener a partir de (1) es de 144 nH para ambas líneas, que concuerda con el valor  $(139 \pm 12) \text{ nH}$  inferido a partir de una descarga en



**Figura 2:**  $dI/dt$  y  $V(t)$  para la línea B. Parámetros de la descarga:  $p = 0,5$  mbar,  $V_0 = -2,5$  kV. Escalas:  $dI/dt$  100=2,5 kA/s;  $V(t)$  10=700 V

**TABLA 2:** AMORTIGUAMIENTOS, FRECUENCIAS Y RESISTENCIAS. PREDICHOS: PRED.; MEDIDOS: MED. O INFERIDOS: INF.

	Período [ns]		Amortiguamiento [ $10^6 \text{ ns}^{-1}$ ]		R [ $\Omega$ ]
	Pred.	Med.	Pred.	Med.	Inf.
A	126	$125 \pm 4$	2	$\sim 3$	$\sim 0,6$
B	40	$40 \pm 4$	5	$\sim 7$	$\sim 1,6$

la que se realizó un cortocircuito en el juego de electrodos. Los amortiguamientos consignados para ambas líneas corresponden a valores de resistencia mayor que la medida en continua para el circuito, lo cual evidencia que la resistencia, para estas frecuencias, está fuertemente influenciada por el efecto skin.

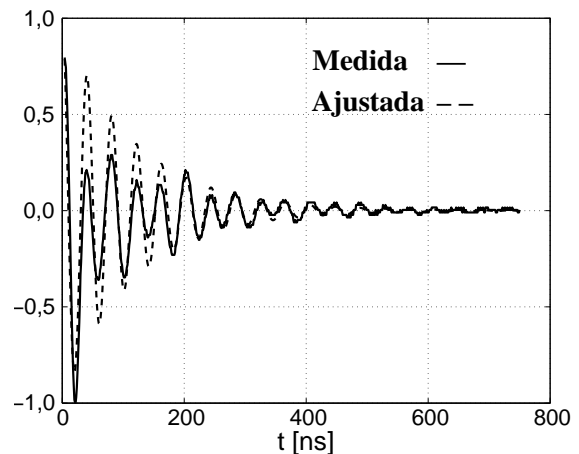
Los modos de oscilación correspondientes a las “armónicas superiores” para la cada línea (9,6 ns, 4,8 ns, ... para la línea A y 6,3 ns, 3,2 ns, ... para la línea B) no se han podido observar, como ya se comentó, en parte a que el “tiempo de subida” de las señales eléctricas ( $\sim 15$  ns) no alcanza para excitarlos y al sistema de adquisición utilizado.

En la figura 3 se presentan simultáneamente las señales de la derivada de la corriente (correspondiente a la figura 2) y la obtenida con los parámetros estimados (Tabla 2) divididas por su valor máximo. Se observa un ajuste aceptable para tiempos mayores a 200 ns lo cual pone en evidencia que durante este tiempo, el modelo presentado no alcanza a describir las señales en todos sus detalles, en particular hay que notar el mayor amortiguamiento que presenta la señal medida.

## V. COMENTARIOS FINALES

En este trabajo se exploró la aplicación del modelo de la referencia 1 en condiciones experimentales muy distintas a las utilizadas anteriormente.

La concordancia entre los valores predichos y los resultados de las mediciones realizadas (mostradas en la Tabla 2), permiten concluir que este modelo es adecuado para predecir las frecuencias observadas en el inicio de las



**Figura 3:** Señales de la derivada temporal de la corriente, medida (trazo lleno) y la ajustada (trazo cortado) con los parámetros de la línea B mostrados en la Tabla 2.

señales eléctricas de una descarga Plasma Focus, y más aún, ya que el modelo prescinde de toda información acerca de los parámetros del plasma se puede concluir, también, que las frecuencias de oscilación observadas pueden ser explicadas y predichas, al menos globalmente, utilizando los parámetros eléctricos del circuito, lo cual puede ser ventajoso al momento de diseñar un dispositivo que produzca plasma.

La diferencias entre las amplitudes en la señal de la derivada de la corriente medida y la ajustada con los parámetros de la Tabla 2 durante el comienzo de la circulación de la corriente podría explicarse si se tiene en cuenta que, en dicho lapso de tiempo, tanto en la llave rápida como así también en el gas interelectródico esta ocurriendo el proceso de ruptura dieléctrica y, por lo tanto, hay presente una resistencia que varía en el tiempo con escala características como las encontradas,<sup>(3)</sup> hecho que también se pone de manifiesto si se observa que el segundo extremo de la señal de la bobina de Rogowski tiene mayor amplitud que el primer extremo.

Por otra parte, el comportamiento temporal, durante su inicio, de las señales medidas evidencia la presencia de otras frecuencias que no se corresponden con los modos de oscilación aquí estudiados; las cuales marcarían la existencia de otra impedancia variable en el tiempo, cuyo estudio se presentara en una próxima comunicación

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo contó con apoyo económico de la IAEA (TC Proy. AR1026-11099L), de la UBA, del PLADEMA y del CONICET. Se agradece a la fundación M. Savio el apoyo brindado para la presentación de este trabajo.

## Referencias

- 1 - Bruzzone H, Kelly H, Moreno C. IEEE Trans. on Plasma Sci., **18**, (4), 689-694, (1990).
- 2 - Vieytes R., Moreno C, Anales de la Asociación Física Argentina **15**, 9-13, (2003).
- 3 - Bruzzone H, Moreno C., Vieytes R. Measurement Science and Technology. **4**, 952-956, (1993).