

Instrumentación del sistema de limpieza por descargas tipo Taylor en el Tokamak Novillo

R. LÓPEZ C., R. VALENCIA A., L. MELÉNDEZ L.

S. COLUNGA S. Y E. CHÁVEZ A.

Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares

Laboratorio de Física de Plasmas

Sierra Mojada No. 447, Lomas de Barrilaco, 11010 México, D.F., México

Recibido el 11 de junio de 1991; aceptado el 1 de octubre de 1991

RESUMEN. Se describen el diseño, la construcción y las pruebas de la instrumentación eléctrica y electrónica para generar descargas de limpieza en el Tokamak Novillo del Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ). Esta instrumentación consiste de las siguientes partes: 1) un oscilador de AF de potencia, que en el circuito tanque energiza de manera pulsada a la bobina primaria, la cual induce a su vez la descarga en el volumen toroidal del tokamak; 2) un sistema generador de un campo toroidal pulsado que sostiene la descarga; y 3) una base de tiempo que controla y sincroniza el proceso. También se incluye una interfase para la adquisición y procesamiento de datos proveniente del espectrómetro de masas. Cada uno de estos equipos fue contruido con base en un diseño original que corresponde a los parámetros de operación del Tokamak Novillo. Estos equipos fueron desarrollados para cumplir un propósito específico; sin embargo, pueden ser adaptados a experimentos similares, tales como: procesos pulsados, generación de plasma por AF, calentamiento por inducción y automatización de datos. En el Tokamak Novillo, este sistema proporciona un método efectivo para inducir descargas pulsadas tipo Taylor en hidrógeno a una frecuencia de 2 pps, con una corriente pico a pico hasta de 500 A y con una duración hasta de 40 ms, en un intervalo de presiones de 6×10^{-5} a 4×10^{-4} Torr.

ABSTRACT. The design, construction and tests of the electric and electronic instrumentation to generate cleaning discharges in Novillo Tokamak of the Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ) are described. The instrumentation consists of the following parts: 1) an AF pulsed power oscillator that in the tank circuit energizes the primary coil, which in turn induces the discharge in the tokamak toroidal volume; 2) a system generator of a pulsed toroidal field that supports the discharge; and 3) a time base that controls and synchronizes the process. Also included is an interface for acquisition and processing of data from the mass spectrometer. Each part of this equipment was constructed on the basis of an original design corresponding to the operation parameters of the Novillo Tokamak. This equipment was developed for a specific purpose; however it may be adapted to similar experiments related to pulsed processes, production of plasma by AF, induction heating and data automatization. In the Novillo Tokamak, this system provides an effective method for inducing Taylor's pulsed discharges in hydrogen at a rate of 2 pps, with a peak to peak current up to 500 A and a duration up to 40 ms, within a pressure interval from 6×10^{-5} to 4×10^{-4} Torr.

PACS: 51.50.+v; 52.70.-m; 52.80.-s

1. INTRODUCCIÓN

Un problema fundamental para el funcionamiento de los tokamaks consiste en lograr un nivel bajo de impurezas en el plasma de estos dispositivos. La principal fuente de impurezas es la superficie interna de la cámara de descargas, ya que aquéllas provienen del material mismo de la cámara o se encuentran adsorbidas en él [1].

Una técnica efectiva para la eliminación de impurezas, es decir, para el acondicionamiento de la superficie interior de la cámara, es conocida como limpieza por descargas. Esta técnica consiste en generar una descarga eléctrica gaseosa de baja temperatura, que es producida en el volumen de la cámara de vacío durante varias horas al día, con el objeto de desalojar las impurezas por medio de los procesos de bombardeo iónico y de recombinación.

Como parte de esta técnica, uno de los métodos más comúnmente usado para generar la descarga de limpieza en los tokamaks es el conocido como método de Taylor [2], que consiste en una descarga eléctrica inducida por medio de un oscilador de AF de potencia y sostenida por medio de un campo toroidal de baja intensidad. Es importante señalar que la obtención de la descarga de limpieza es un proceso muy particular que depende de los parámetros de funcionamiento de cada tokamak, y no existe una instrumentación estándar para estos fines.

En este trabajo se describen la instrumentación eléctrica y electrónica diseñada y construida para generar por este método las descargas de limpieza en el Tokamak Novillo del ININ, así como el diagnóstico realizado en esta fase. También se presentan los primeros resultados obtenidos que manifiestan la efectividad de este proceso.

2. DESCRIPCIÓN DEL DISPOSITIVO EXPERIMENTAL

El Tokamak Novillo es un dispositivo experimental diseñado y construido totalmente en el ININ, el cual pertenece a la clasificación de los pequeños tokamaks. Los parámetros principales de diseño se muestran en la Tabla I. En la Fig. 1 se muestra el diagrama de bloques del dispositivo con los elementos que conforman el sistema de limpieza por descargas tipo Taylor.

De acuerdo al diseño original del Tokamak Novillo [3], la cámara de descargas está formada por cuatro codos de 90° de acero inoxidable (316/L) no magnético, con espesor de pared de 0.32 cm y un radio menor de 8.0 cm. La interconexión entre ellos se realiza mediante sellos de vitón que los aísla eléctricamente. El radio mayor de la cámara toroidal es de 23 cm.

El toroide tiene 28 puertos de acceso al interior de la cámara, con un área total de 617.78 cm². Estos tienen diferentes tamaños y sus finalidades son: conectar el sistema de vacío, admitir el gas de trabajo, efectuar diagnóstico del plasma, etc. [4]. El área ocupada por los puertos es del 25.7% del área total de la cámara, lo cual coloca al Novillo en posición ventajosa, desde el punto de vista de diagnóstico y versatilidad, con respecto a otros tokamaks similares como el brasileño TBR (410 cm²) [5] o el japonés MINIMAK (608 cm²) [6]. En el diseño definitivo se trató de estandarizar al máximo las medidas de los diferentes puertos de acceso.

TABLA I. Parámetros generales.

Radio mayor	R_0	0.23 m
Radio menor (cámara)	a_v	0.08 m
Radio menor (plasma)	a_p	0.06 m (con limitador)
Relación de aspecto inversa	a_p/R_0	0.26
Factor de seguridad	q	3 (propuesto)
Campo toroidal	B_T	0.47 T (máximo)
Campo poloidal	B_P	0.04 T (para I_P máx)
Corriente de plasma	I_P	12 kA (máxima)
Densidad de electrones	n_e	$2 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ (para H_2)
Temperatura de electrones	T_e	150 eV
Temperatura de iones	T_i	50 eV (para H_2)

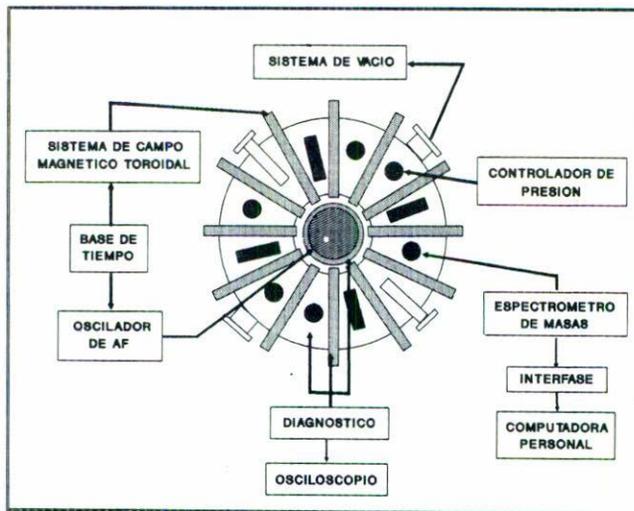


FIGURA 1. Diagrama de bloques del dispositivo con los elementos que conforman el sistema de limpieza por descargas tipo Taylor.

El uso de una bomba turbomolecular de 500 l/s permite obtener una presión base del orden de 10^{-8} torr para un volumen de evacuación de 35 l. La presión de operación se establece con un controlador automático de presión de tipo piezoeléctrico y el análisis de gases residuales en el interior de la cámara se realiza mediante un espectrómetro de masas.

El acoplamiento mecánico entre la bomba turbomolecular y la cámara de vacío se lleva a cabo mediante un fuelle de acero inoxidable; este acoplamiento también está aislado eléctricamente mediante un sello de vitón. Para conservar el vacío en el interior de la cámara, cuando la bomba turbomolecular deja de funcionar por cualquier motivo, se colocó una válvula electroneumática a la salida de dicha bomba.

El sistema de vacío (bomba turbomolecular y válvula electroneumática) se encuentra suspendido mediante tensores para que el fuelle de acoplamiento se contraiga sin dificultad alguna.

3. INSTRUMENTACIÓN ELECTRÓNICA

Los primeros tokamaks fueron dispositivos relativamente sencillos desde el punto de vista de la ingeniería y la electrónica [7]. Los sistemas electromagnéticos tenían solamente los arrollamientos toroidales y del inductor. Sin embargo, ya desde los primeros experimentos surgió la necesidad de complicar su esquema inicial de funcionamiento. Con la necesidad de mejorar los parámetros del plasma, se incrementaron las exigencias energéticas y de instrumentación de los tokamaks, los que también aumentaron considerablemente sus dimensiones.

En la actualidad, el perfeccionamiento y complicación de la ingeniería y la instrumentación también han alcanzado a los pequeños tokamaks. En particular, en el Tokamak Novillo las áreas de instrumentación electrónica, como son la de potencia, la analógica y la digital, desempeñan un papel determinante en el diseño y construcción del sistema de limpieza por descargas de este tokamak.

3.a Oscilador de AF

La obtención del plasma en un tokamak es el resultado de la aplicación de un campo eléctrico en la dirección toroidal, de intensidad suficiente para alcanzar el punto de ruptura en un determinado gas. El campo eléctrico mínimo necesario para la formación del plasma es función de factores tales como: presión en la cámara de descargas, tipo de gas, etc. El campo eléctrico en la fase de limpieza se genera mediante un oscilador que energiza a la bobina primaria del transformador de calentamiento óhmico (TCO) [3] del Tokamak Novillo.

En el diseño del oscilador de AF se utilizó la configuración Colpitts, debido a que para el circuito tanque se utiliza la bobina primaria del Tokamak Novillo. El proceso de diseño se realizó siguiendo la metodología propuesta por R.W. Landee y colaboradores [8]. El diagrama eléctrico de este sistema se muestra en la Fig. 2. Los parámetros de diseño para el oscilador que se establecieron son: frecuencia de oscilación de 17.5 KHz y potencia de 20 KW [9]. Los tubos triodos utilizados en el circuito amplificador son los TBW7/8000, los cuales son enfriados por agua mediante un circuito con un radiador enfriado por aire. Debido a que el oscilador opera de manera pulsada, el control se lleva a cabo mediante un circuito modulador conectado en la reja de los triodos, como se muestra en la Fig. 2 [10], el cual a su vez es controlado por una base de tiempo [11].

3.b Circuito de campo toroidal

Debido a que el oscilador de AF opera de manera pulsada y para evitar el sobrecalentamiento de las bobinas toroidales del Tokamak Novillo [3], el circuito de generación del campo magnético toroidal (Fig. 3) también opera de manera análoga. Con este circuito

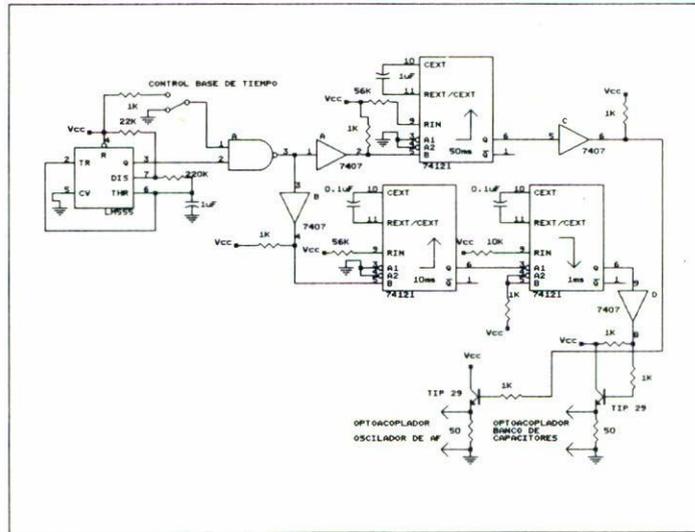


FIGURA 4. Circuito eléctrico de la base de tiempo.

KU-27 ITT (la razón del uso de estos dispositivos en esta fase experimental es que están disponibles y son utilizados en la descarga principal del tokamak). Para el disparo del tiratrón se utiliza un optoacoplador con salida a SCR (Fig. 3) [13].

3.c Base de tiempo

El sistema de limpieza opera a una frecuencia de 2 Hz de la siguiente manera: el banco de capacitores del sistema de campo magnético toroidal se carga hasta el máximo voltaje (900 V) en 400 ms, de tal manera que cuando aparece el pulso de disparo (cada 500 ms), se encuentre al máximo voltaje seleccionado para energizar las bobinas toroidales. En cuanto al oscilador de AF, éste opera en intervalos de corta duración, es decir, 50 ms cada 500 ms. El circuito que sincroniza estos dos procesos es mostrado en la Fig. 4 [11]. Las señales digitales y de potencia son aisladas eléctricamente mediante optoacopladores con salida a SCR para el circuito de descarga del banco de capacitores y con salida a transistor para el control del oscilador.

3.d Preionización

Cuando un electrón o un ion positivo se mueve a través de un gas, es posible que ocurra la ionización o excitación de átomos o moléculas neutras por medio de colisiones. Cuando ese gas está sometido a un campo eléctrico, los electrones y los iones liberados en las colisiones son acelerados por el campo eléctrico y realizan otras colisiones produciéndose nuevos iones y electrones. Así, un electrón primario puede desencadenar un proceso de ionización global en un cierto gas cuando existe un campo eléctrico aplicado [14].

De esta manera, para provocar la ruptura de un gas en presencia de un campo eléctrico son necesarios algunos electrones libres para iniciar el proceso de ionización, es decir, que

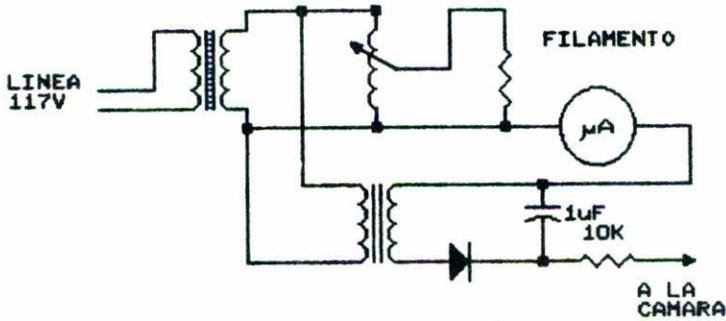


FIGURA 5. Circuito de control de la corriente de preionización entre el filamento y la cámara de descargas.

es necesario tener una preionización que puede ser obtenida de diferentes maneras. En particular, en el Tokamak Novillo se utiliza un filamento de tungsteno como fuente de electrones de preionización. Por medio del circuito mostrado en la Fig. 5, se obtiene un control de la corriente de preionización entre el filamento y la cámara de descargas, magnitud que es controlada con un transformador variable y registrada por un microamperímetro.

3.e Interfase para el espectrómetro de masas

El espectrómetro de masas utilizado para el análisis de gases residuales y para determinar el efecto del proceso de limpieza, mediante el análisis de presiones parciales en la cámara de descargas, está basado en el principio del cuadrupolo [15]. La información procesada por el dispositivo es enviada al exterior y es usualmente desplegada por medio de un graficador X-Y. Sin embargo, debido a que es necesario llevar un archivo de espectros generados durante el proceso de limpieza, se diseñó y construyó una interfase (Fig. 6) [16] que se adapta a las ranuras de expansión de una computadora personal IBM compatible, para la adquisición y procesamiento de datos provenientes del espectrómetro de masas. El funcionamiento de la interfase se describe a continuación. La señal de salida X del espectrómetro tiene una forma de diente de sierra, la cual define la constante de tiempo que indica la duración del proceso; ésta se aplica a un circuito diferenciador para indicar el inicio de cada barrido y la señal resultante acondicionada a niveles TTL se coloca en la entrada S del biestable 7476. La señal de salida Y del espectrómetro es acondicionada y colocada en la entrada analógica del convertidor analógico-digital ADC0820. Los datos digitalizados son almacenados en la memoria auxiliar MC6264 de 8Kx8. Cuando las localidades se saturan, se envía una señal al biestable 7476 en la entrada R para detener el proceso de conversión de datos. Posteriormente, los datos almacenados en la memoria auxiliar son enviados a la computadora personal vía el circuito integrado PPI 8255, para ser procesados por ésta.

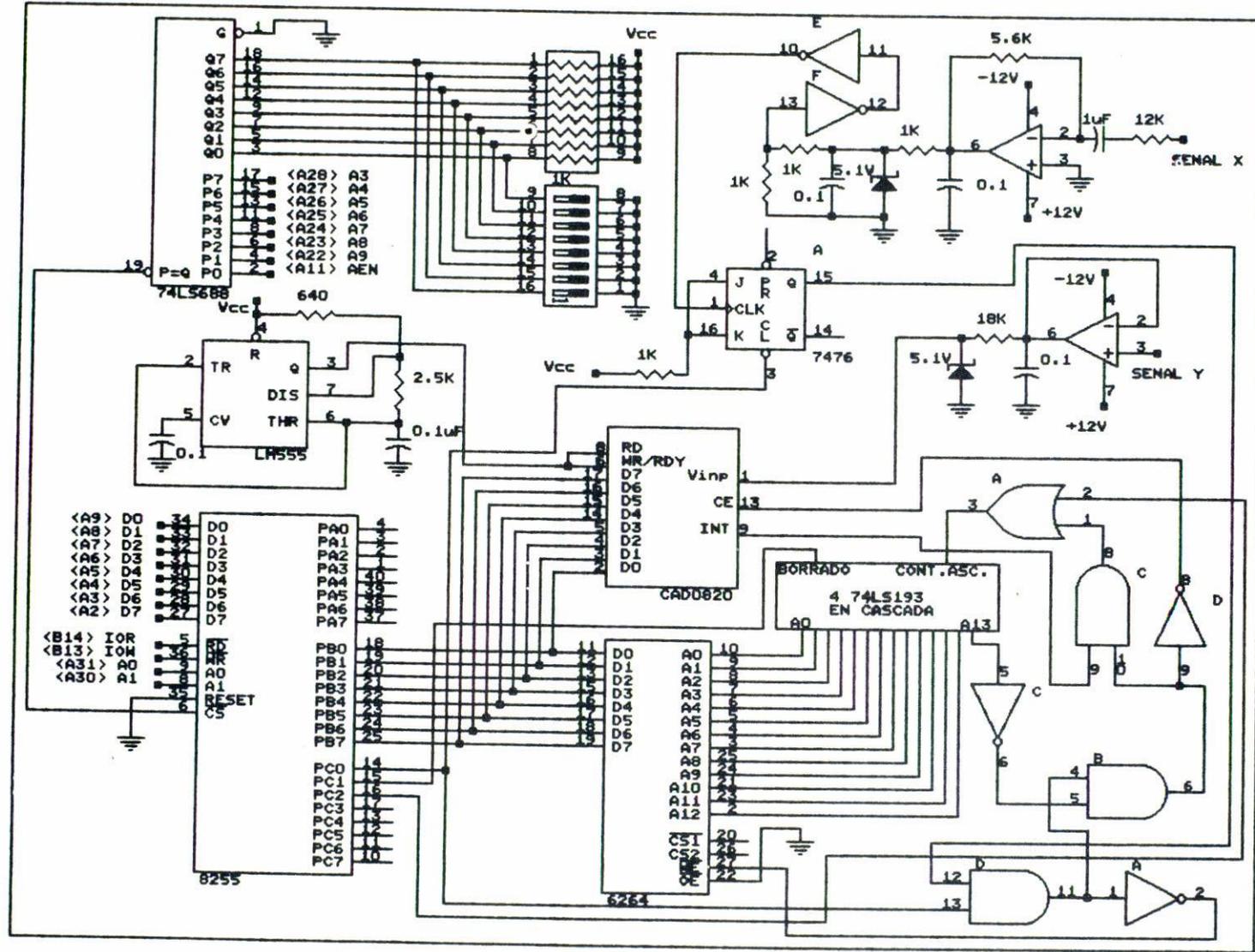


FIGURA 6. Circuito eléctrico de la interfase para el espectrómetro de masas.

4. RESULTADOS

4.a Determinación del campo eléctrico inducido

Se determinó experimentalmente la *fem* inducida por el oscilador de AF, en el interior y en el exterior de la cámara de descargas [17], para lo cual se colocaron dos espiras de cobre de iguales dimensiones una dentro y otra fuera de la cámara de descargas. Como resultado se obtuvo que la inducción sufre una atenuación del 5% al atravesar la pared de la cámara de descargas. De esta manera, el campo eléctrico en el interior de la cámara para el valor de la *fem* a la potencia máxima del oscilador de AF (61 V) es

$$E = \frac{fem}{2\pi R} = 0.422 \text{ V/cm.}$$

Este resultado se encuentra dentro del intervalo de valores de *E* que satisfacen las condiciones de ruptura del gas, reportados en la Ref. [3].

4.b Determinación del factor de acoplamiento

Se determinó experimentalmente el factor de acoplamiento *k* mediante la expresión [18]

$$k = 1 - \left(\frac{T}{T_0} \right)^2,$$

donde T_0 y T son los periodos de oscilación en ausencia y en presencia de secundario, respectivamente. En el presente caso se obtuvo que $T_0 = 58 \mu\text{s}$ y $T = 54 \mu\text{s}$, lo que da como resultado un factor de acoplamiento $k = 0.365$. Este valor tiene una diferencia del 7% a favor de un mejor acoplamiento con respecto al factor de acoplamiento teórico ($k = 0.338$) reportado en la Ref. [18].

4.c Campo magnético toroidal

Al realizar la descarga de los bancos de capacitores sobre la bobina toroidal [3] del Tokamak Novillo en el régimen de limpieza, se obtienen pulsos de corriente hasta de 240 A pico, los cuales generan un campo magnético pulsado hasta de 740 G, dependiendo del voltaje de carga de los capacitores. Los pulsos de campo magnético tienen un tiempo de elevación de 3.65 ms, una constante de decaimiento de 30 ms y una duración de 120 ms.

También, por medio de una sonda magnética [19] se determinó experimentalmente el tiempo de penetración del campo magnético toroidal a través de la cámara de descargas. Se encontró que esta magnitud tiene un valor de 250 μs , lo que concuerda bastante bien con el cálculo teórico desarrollado en la Ref. [20].

4.d Descarga de limpieza

Una vez que se logró poner en condiciones de operación a los tres subsistemas de los que básicamente se compone el sistema de limpieza por descargas del Tokamak Novillo

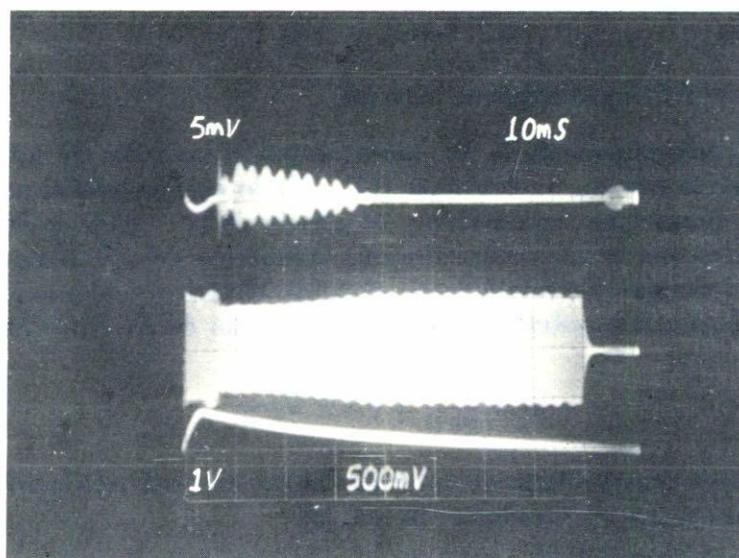


FIGURA 7. Oscilograma típico de descargas.

(oscilador de AF, campo magnético toroidal y el vacío base en la cámara de descargas) y se estableció una corriente de preionización, se inyectó hidrógeno al interior de la cámara de descargas. Con esto se logró producir la descarga de limpieza en el intervalo de presiones de 6×10^{-5} a 4×10^{-4} Torr.

Un oscilograma típico de estas descargas se muestra en la Fig. 7. La corriente pico a pico alcanza valores hasta de 500 A con una duración hasta de 40 ms. Es importante hacer notar que la descarga de limpieza se produce después del inicio del pulso de campo magnético, con un retardo que corresponde al tiempo de penetración del campo magnético toroidal más el tiempo de formación del plasma.

5. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en este trabajo muestran que la instrumentación diseñada y construida para el sistema de limpieza por descargas tipo Taylor del Tokamak Novillo del ININ, funciona eficientemente para generar descargas pulsadas de limpieza con una frecuencia de 2 pps, una intensidad de corriente pico a pico hasta de 500 A y una duración hasta de 40 ms, en un intervalo de presiones de 6×10^{-5} a 4×10^{-4} Torr.

La versatilidad de operación de la instrumentación presentada en este trabajo, hace que ésta sea adaptable a experimentos similares relacionados con procesos pulsados, generación de plasma por AF, calentamiento por inducción y automatización de datos.

AGRADECIMIENTOS

Hacemos patente nuestro agradecimiento a las siguientes personas: Ing. E. Godínez D.,

Ing. I. Alemán S., Dr. J. de Urquijo C. y Dr. J. Ramos S., quienes colaboraron en los orígenes del proyecto del Tokamak Novillo. De la misma manera agradecemos a los técnicos C. Vázquez M., R. Figueroa L. y R. Ochoa N. el valioso trabajo desarrollado en el proyecto.

REFERENCIAS

1. P.C. Stangeby and G.M. McCracken, *Nuclear Fusion* **30** (1990) 1225.
2. L. Oren and R.J. Taylor, *Nucl. Fusion* **17** (1977) 1143.
3. J. Ramos S. *et al.*, *Rev. Mex. Fís.* **29** (1983) 551.
4. S.R. Barocio y L. Meléndez L., Reporte Interno del ININ LFP 13A-86 (1986).
5. S.W. Simpson, *et al.*, Reporte Interno de la Universidad de São Paulo IFUSP/P-155 LFP-2 (1978).
6. K. Makishima *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **37** (1976) 142.
7. L.A. Artsimovich, *Nucl. Fus.* **12** (1972) 215.
8. R.W. Landee *et al.*, *Electronic Designers Handbook*, McGraw Hill (1967).
9. J. Ramos S. y E. Godínez D., "Análisis del circuito tanque transformador para descarga de limpieza". Reporte Interno del ININ FP-81-3 (1981).
10. R. López C. *et al.*, "Diseño y construcción de un oscilador de potencia pulsado para el sistema de limpieza del Tokamak Novillo". Reporte Interno del ININ (1988)
11. R. López C. *et al.*, "Diseño y construcción de la base de tiempo del sistema de limpieza del Tokamak Novillo". Reporte Interno del ININ (1988).
12. R. López C. *et al.*, "Sistema de carga de los bancos de capacitores del Tokamak Novillo". Reporte Interno del ININ (1985).
13. R. López C., "Sistema de disparo del Tokamak Novillo". Reporte Interno del ININ (1985).
14. E. Bosco, "Formação do plasma no TBR". Tesis de Maestría del Instituto de Física de la Universidad de São Paulo, Brasil (1981).
15. Leybold-Heraeus, "Manual de operación del Quadruvac Q200".
16. R. López C. y M. Pozas C., "Interfase para el espectrómetro de masas quadruvac". Reporte Interno del ININ (1991).
17. L. Meléndez L., *et al.*, "Determinación experimental del campo eléctrico inducido del Tokamak Novillo, en régimen de descarga de limpieza, así como de la atenuación del exterior al interior de la cámara de descargas". Reporte Interno del ININ (1989).
18. J. Ramos S., *et al.*, *Rev. Brasileira de Física*, **II** (1982) 542.
19. E. Chávez A. y R. Figueroa L. "Construcción y calibración de una sonda de campo magnético". Reporte Interno del ININ (1988).
20. H. Jiménez D. y L. Meléndez L., "Nota sobre difusión del campo magnético a través de la pared de un tubo metálico". Reporte Interno del ININ (1979).