

Tesis de Posgrado

Descargas coaxiales pulsadas para aplicaciones tecnológicas

Martínez, Javier F.

2003

Tesis presentada para obtener el grado de Doctor en Ciencias Físicas de la Universidad de Buenos Aires

Este documento forma parte de la colección de tesis doctorales y de maestría de la Biblioteca Central Dr. Luis Federico Leloir, disponible en digital.bl.fcen.uba.ar. Su utilización debe ser acompañada por la cita bibliográfica con reconocimiento de la fuente.

This document is part of the doctoral theses collection of the Central Library Dr. Luis Federico Leloir, available in digital.bl.fcen.uba.ar. It should be used accompanied by the corresponding citation acknowledging the source.

Cita tipo APA:

Martínez, Javier F.. (2003). Descargas coaxiales pulsadas para aplicaciones tecnológicas. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires.
http://digital.bl.fcen.uba.ar/Download/Tesis/Tesis_3545_Martinez.pdf

Cita tipo Chicago:

Martínez, Javier F.. "Descargas coaxiales pulsadas para aplicaciones tecnológicas". Tesis de Doctor. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires. 2003.
http://digital.bl.fcen.uba.ar/Download/Tesis/Tesis_3545_Martinez.pdf

EXACTAS UBA

Facultad de Ciencias Exactas y Naturales



UBA

Universidad de Buenos Aires

UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES

Facultad de Ciencias Exactas y Naturales

Departamento de Física

Descargas Coaxiales Pulsadas Para Aplicaciones Tecnológicas

Por Javier F. Martínez

Director de Tesis: Dr. César H. Moreno

Lugar de Trabajo: Insituto de Física del Plasma

Trabajo de Tesis para optar por el título de Doctor en Ciencias Físicas

Lunes 10 de Marzo de 2003

Nº 35454

Resumen del trabajo:

La presente tesis estudia las diferencias cualitativas y cuantitativas que introduce en una descarga eléctrica coaxial pulsada el hecho de variar la duración del pulso de la corriente eléctrica que la genera y presenta tres aplicaciones tecnológicas novedosas obtenidas con la radiación X y neutrónica producida con dichas descargas.

Palabras clave:

Coaxial - pulsada - descarga eléctrica - lámina de corriente - rayos X - detección de sustancias - radiografías - tomografías.

Summary of the thesis:

This thesis studies the qualitative and quantitative differences that are produced in a pulsed coaxial electric discharge by varying the duration of the electric current pulse that generates it, and presents three novel technological applications obtained with the X rays and neutrons originated in the mentioned discharge.

Keywords:

Coaxial - pulsed - electric discharge - current sheath - X rays - substance detection - radiographic image - tomographic image

Director de la tesis:

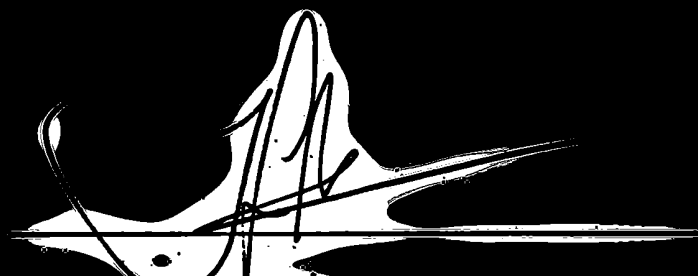
Dr. César Moreno



Firma

Doctorando:

Lic. Javier F. Martínez



Firma

Índice General

1	Introducción	4
1.1	Descargas coaxiales pulsadas	4
1.2	Antecedentes experimentales	7
1.3	Antecedentes teóricos	8
1.4	Aplicaciones de estas descargas	8
1.5	Objetivos y contenido de esta tesis	9
2	Método Experimental	11
2.1	Descripción del equipo CCII	11
2.1.1	Circuito RLC1	16
2.1.2	Circuito RLC2	19
2.1.3	Circuito RLC3	23
2.2	Diagnósticas empleadas en el equipo CCII	28
2.2.1	Bobinas de Rogowski	28
2.2.2	Divisor resistivo de tensión	30
2.2.3	Sondas magnéticas inductivas	32
2.2.4	Convertidor de imágenes	34
2.3	Descripción del equipo GN1	38
2.3.1	Circuito RLC4	44
2.4	Diagnósticas empleadas en el equipo GN1	51
2.4.1	Bobina de Rogowski	51

2.4.2	Divisor resistivo de tensión	52
2.4.3	Detectores de neutrones	52
2.4.4	Configuración experimental utilizada para la detección de agua	54
2.4.5	Sistema centellador-fotomultiplicador	56
2.4.6	Método de obtención de radiografías X	57
2.5	Sistema de adquisición y registro de señales eléctricas	57
3	Resultados Experimentales	61
3.1	Construcción de la cinemática de una lámina de corriente	62
3.2	Equipo CCII	66
3.2.1	Circuito RLC1	66
3.2.2	Circuito RLC2	70
3.2.3	Circuito RLC3	79
3.3	Equipo GN1	86
3.3.1	Circuito RLC4	89
4	Análisis de Resultados	91
4.1	Análisis de las mediciones realizadas con sondas magnéticas inductivas	92
4.2	Comparación de la dinámica experimental de la lámina de corriente con el modelo semianalítico de Gratton-Vargas	94
4.2.1	Breve descripción del modelo semianalítico de Gratton-Vargas	94
4.2.2	Cinemáticas	97
4.2.3	Perfiles	109
4.2.4	Revisión crítica del modelo y su ajuste	113
4.3	Discusión sobre los anchos de la lámina de corriente	114
4.4	Discusión sobre la estructura de la lámina de corriente	116
4.4.1	La lámina de corriente como onda de choque	116
4.4.2	Emisión de luz y campo magnético en la lámina de corriente	117

5	Aplicaciones tecnológicas de las descargas coaxiales pulsadas	
5.1	Radiografías	
5.2	Tomografías	
5.3	Detección de agua	
5.4	Futuras aplicaciones	
6	Resumen General y Conclusiones	

Capítulo 1

Introducción

“El poder de la instrucción es, en general, poco eficaz...excepto en las felices disposiciones en que es casi superfluo...” Gibbons

1.1 Descargas coaxiales pulsadas

Las descargas coaxiales pulsadas de plasma tienen su origen en los equipos Plasma Focus (PF). Un equipo PF es una descarga coaxial pulsada de plasma que se realiza en tiempos muy cortos ($\sim 1\mu\text{s}$) y con altas intensidades de corriente eléctrica ($\sim 100\text{ kA} - 500\text{ kA}$). Estos dispositivos surgieron a principios de la década del 60 ' [14][15] casi simultáneamente en la anterior Unión Soviética y en los Estados Unidos, y se desarrollaron en las décadas del 70 'y el 80 '.

Estas descargas se producen típicamente conectando un banco de capacitores ($\sim 1 - 100\mu\text{F}$) de baja inductancia ($\sim 100\text{ nH}$) cargado a alta tensión con un sistema de electrodos coaxiales que se hallan inmersos en un gas a baja presión ($0.1 - 10\text{ mbar}$). Al aplicar tensión a los electrodos coaxiales ($> 10\text{ kV}$) se produce la ruptura dieléctrica del gas, el cual se convierte desde ese momento en un medio conductor. Una vez que la descarga se ha iniciado circula una corriente eléctrica entre los electrodos y la región ionizada o parcialmente ionizada del gas por donde circula esta corriente se denomina

lámina de corriente (LC). Esta corriente que atraviesa el gas y el campo magnético que ella misma origina interactúan produciendo una fuerza $\overrightarrow{J} \times \overrightarrow{B}$ (donde $\overrightarrow{J}$ es la densidad de corriente y $\overrightarrow{B}$ el campo magnético originado por la corriente) que impulsa a la lámina de corriente hacia el extremo libre de los electrodos. En su avance la lámina va ionizando e incorporando el gas neutro que encuentra a su paso a modo de una barredora de nieve (este hecho le ha valido a esta hipótesis el nombre de modelo 'snow-plow')[16][17][18]. Cuando la LC transpone el extremo libre de los electrodos se inicia un movimiento radial convergente que tiende a formar una columna cilíndrica de plasma que colapsa sobre el eje de simetría de los electrodos. Este colapso culmina con la formación de regiones de muy alta densidad y temperatura (estrangulamientos de la columna cilíndrica de plasma originados por inestabilidades magnetohidrodinámicas) denominadas 'pinch' o focos de plasma.

Es en estos focos de plasma donde, en condiciones adecuadas, los iones del gas colisionan entre sí y se producen reacciones de fusión nuclear, emisión de partículas cargadas (haces de electrones e iones), emisión de pulsos de rayos X duros (energías $\gtrsim 100$ keV) provenientes de la interacción de los electrones con el ánodo, y rayos X blandos (energías ~ 10 keV).

Las condiciones adecuadas mencionadas se refieren al gas o mezcla de gases utilizados, a su presión, a la duración del pulso de corriente que provee el circuito externo y/o a las dimensiones de los electrodos coaxiales. Algunas de ellas son por ejemplo que los gases empleados para la producción de pulsos de neutrones son D_2 (produciendo pulsos de neutrones de 2.45 MeV) o una mezcla de $D_2 - T_2$ (produciendo pulsos de neutrones de 14.1 MeV), que la presión está en el orden de los mbar y que la duración del pulso de corriente debe ser tal que la lámina transporte la máxima intensidad de corriente posible al producirse el colapso radial.

En el proceso descrito para una descarga coaxial pulsada se identifican tres etapas principales:

- etapa de formación: esta etapa agrupa los fenómenos que se producen entre la

ruptura dieléctrica del gas y la conformación de la lámina de corriente. En general en la mayoría de los equipos, al menos en el rango de parámetros experimentales que operan habitualmente, la descarga comienza sobre el aislante (típicamente un tubo de vidrio que rodea al electrodo central en el extremo cerrado del cañón coaxial) dado que este es el caso más favorable para la posterior producción de radiación. Dado que la ruptura dieléctrica del gas puede producirse en otras regiones del cañón coaxial (por ejemplo variando la presión del gas de llenado o la geometría de los electrodos) está en la capacidad de la persona responsable del diseño del cañón coaxial evitar que estas descargas desfavorables ocurran en el rango de parámetros de operación del equipo. Esta etapa a menudo se considera finalizada cuando la parte posterior de la lámina alcanza el radio del electrodo externo del cañón coaxial, definida así tiene una duración típica de 500 – 700 ns para un equipo Plasma Focus[20][21][31].

- etapa coaxial: en esta etapa la lámina generada se propaga hasta el extremo libre de los electrodos impulsada por la fuerza de Lorentz, barriendo e incorporando la masa del gas que encuentra a su paso. La estructura de la lámina durante esta etapa es muy compleja pero siguiendo la literatura[19][44] es posible intentar modelarla como el siguiente conjunto de regiones: Dado que la lámina de corriente durante la etapa coaxial se mueve a velocidades supersónicas se genera delante de ella un frente de choque ionizante. Dicho frente es una zona muy delgada espacialmente en donde ocurren fuertes gradientes de velocidad y densidad, y consecuentemente gran disipación. Contiguo a este frente de ionización se encuentra la lámina de corriente propiamente dicha, en ésta se observa una zona de transición donde la densidad de plasma se hace importante y donde las partículas pesadas le transfieren energía a los electrones, que a su vez tienen la posibilidad de ionizarlas. A partir de los procesos de recombinación es en esta zona donde se produce la mayor emisión radiativa en el espectro visible. En esta región fluye también la corriente que junto con su campo magnético constituyen el borde inferior de la estructura, el pistón

magnético. Detrás se encuentra una zona de gas enrarecido ocupada por el campo magnético.

- etapa de focalización o colapso: esta etapa encierra los fenómenos que transcurren entre el desborde de la lámina de corriente, es decir cuando ésta transpone su extremo libre, pasando por la convergencia radial, y hasta que se forman los focos de plasma. Una vez alcanzada la focalización (o la máxima compresión radial posible si la energía disponible o las condiciones de la descarga no permiten la focalización) se observa la presencia de una gas tenue que se disgrega[22][23].

1.2 Antecedentes experimentales

En general los métodos experimentales más comunmente empleados para estudiar la cinemática y la estructura de la lámina de corriente contemplan el uso de:

- sondas magnéticas: instrumentos que permiten medir el instante de arribo de la lámina de corriente a los puntos donde éstas se ubiquen, y
- convertidores de imágenes: dispositivos electrónicos que permiten obtener fotografías ultrarrápidas (es decir con tiempos de exposición $\sim 5 \text{ ns} - 1 \mu\text{s}$) en el espectro visible de la zona luminosa de la lámina de corriente.

Entre los antecedentes experimentales más relevantes sobre mediciones acerca de láminas de corriente realizadas con sondas magnéticas y/o convertidores de imágenes podemos destacar los siguientes:

- los trabajos de Butler T. y otros[37]; de Gratton F.T.L. y Vargas L.[7], de Kelly H. y Giudice G.[43], de Lee S. y otros[45] donde se estudia el movimiento de la lámina durante las etapas coaxial y de focalización,
- las publicaciones de Krompholz y otros[36]; de Feugeas y Von Pamel[35]; y las tesis doctorales de Grondona D.[17] y Moreno C.[3], donde se investiga la estructura y evolución de la lámina de corriente en las proximidades del aislante,

- la tesis de Moreno C.[3], el trabajo de Malmberg J. H.[6] y la publicación de Bruzzone H. y otros[38] discuten los efectos perturbativos que introduce el tamaño finito de la sonda magnética en la señal de tensión que ésta mide,
- las publicaciones de Segre E. y otros[39], y de Clothiaux y otros[40] relativas a la respuesta en frecuencia de una sonda magnética.

1.3 Antecedentes teóricos

En relación a los modelos teóricos desarrollados para las descargas coaxiales pulsadas cabe destacar los siguientes:

- los modelos sobre la formación de la lámina de corriente, en particular el trabajo de Vikhrev y Braginskii que en el marco de la Magnetohidrodinámica describen la evolución de la densidad de corriente del plasma[31],
- los modelos de la ‘barredora de nieve’ para la etapa coaxial [16][7]. En particular el modelo de Gratton-Vargas[7] por su simplicidad será el elegido en esta tesis para intentar un ajuste con los puntos experimentales obtenidos, y
- los modelos sobre la interacción entre el plasma y la pared del cuerpo aislante de una sonda magnética[8][9].

1.4 Aplicaciones de estas descargas

- Originalmente los equipos PF estaban orientados a la producción de reacciones de fusión nuclear con perspectivas de producción de energía, actualmente el estudio de las descargas coaxiales pulsadas de plasma se centra en las aplicaciones tecnológicas que se derivan de ellas. Entre las aplicaciones de índole tecnológica más destacadas se encuentran los siguientes:

- los recubrimientos de superficies,
- la implantación iónica[30][20],
- los tratamientos térmicos superficiales[41],
- la producción de nuevos compuestos de interés industrial (nitruros y carburos de Ti o Al),
- el tratamiento de residuos tóxicos o radioactivos,
- la producción de pulsos intensos y cortos de rayos X para la obtención de radiografías[32][34], tomografías, para el estudio de pequeños sistemas biológicos[24][25] y para procesos litrográficos de interés en microelectrónica[26][27],
- la producción de pulsos intensos y cortos de neutrones para la detección de sustancias[28][12][33] prospección geológica[29] y eventualmente la obtención de neutrongrafías.

1.5 Objetivos y contenido de esta tesis

Los objetivos de esta tesis son básicamente dos:

- uno en el área de la investigación básica: se pretende estudiar los efectos cualitativos y cuantitativos más relevantes que introduce la variación de la duración del pulso de corriente eléctrica que fuerza el circuito externo en una descarga coaxial pulsada; y
- otro en el área de las aplicaciones concretas de estos equipos: se pretende desarrollar:
 - * un método para obtener radiografías no convencionales con la radiación X de una descarga coaxial pulsada,
 - * y otro para detectar agua con la radiación neutrónica de una descarga coaxial pulsada.

El contenido de esta tesis puede describirse esquemáticamente como sigue:

En el capítulo siguiente se introducirán los dos equipos experimentales utilizados en esta tesis, el cañón coaxial 2 o CCII y el generador de neutrones 1 o GN1, con sus respectivas diagnósticas. Se presentarán también los detalles de los tres circuitos eléctricos externos (con cada uno de ellos se conformó un pulso de corriente de distinta duración) que energizarán al equipo CCII.

En el capítulo 3 se presentarán los resultados experimentales de las mediciones de sondas magnéticas acerca de la cinemática de la lámina de corriente y se incluirán también fotografías ultrarrápidas de la descarga. Esto se realizará para el equipo CCII energizado por cada uno de los tres circuitos eléctricos externos mencionados anteriormente. Se mostrarán también resultados experimentales que caracterizan al equipo GN1.

En el capítulo 4 se analizarán los resultados obtenidos y se intentará un ajuste de los puntos experimentales de cada una de las configuraciones construídas por el modelo teórico de Gratton-Vargas. Este ajuste concluirá con una discusión crítica sobre la aplicabilidad del modelo mencionado. Se discutirán luego resultados acerca de la evolución temporal del ancho de la lámina de corriente y acerca de su estructura.

En el capítulo 5 se mostrarán las aplicaciones más relevantes realizadas en esta tesis: radiografías, tomografías y detección de agua. Luego se discutirá también el abanico de las futuras ramas de investigación que aparecen más promisorias con el objetivo de desarrollar futuras aplicaciones.

El capítulo 6 contiene un resumen con las conclusiones generales de la tesis.

Capítulo 2

Método Experimental

Las mediciones que fundamentan para esta tesis se realizaron en dos equipos del Instituto de Física del Plasma, INFIP, el equipo CCII (cañón coaxial 2) y el equipo GN1 (generador de neutrones 1). A continuación se describen estos equipos y las diagnósticas empleadas en cada uno de ellos.

2.1 Descripción del equipo CCII

El equipo denominado CCII, que se representa esquemáticamente en la figura 2-1, consiste básicamente de tres partes: dos electrodos (ubicados dentro de la cámara de descargas), un sistema de vacío-provisión de gases y un circuito eléctrico externo (que aporta la energía necesaria para la generación y propulsión del plasma).

Los electrodos son un par de cilindros coaxiales entre los que se forma y evoluciona el plasma. A esta configuración geométrica, por su forma y por el movimiento del plasma originado entre los electrodos, se la denomina cañón coaxial; de ahí la denominación del equipo. El electrodo central es un cilindro macizo de titanio, de radio $r_A = (0.47 \pm 0.02)$ cm y longitud $l_A = (10.0 \pm 0.1)$ cm, y el electrodo exterior es una jaula cilíndrica formada por 14 barras de bronce, cada una de radio $r_C = (1.5 \pm 0.1)$ mm y longitud $l_B = (10.0 \pm 0.1)$ cm, cuyos ejes se disponen sobre una circunferencia de radio $r_B = (2.62 \pm 0.02)$ cm.

Las barras se unen a un anillo en su extremo libre, que posee el mismo radio medio de la circunferencia antes mencionada. La función de este anillo es otorgarle rigidez mecánica al conjunto de las 14 barras y reducir los efectos de intensificación de campo eléctrico que se producirían en los extremos libres de las barras en caso de que el anillo no estuviese presente.

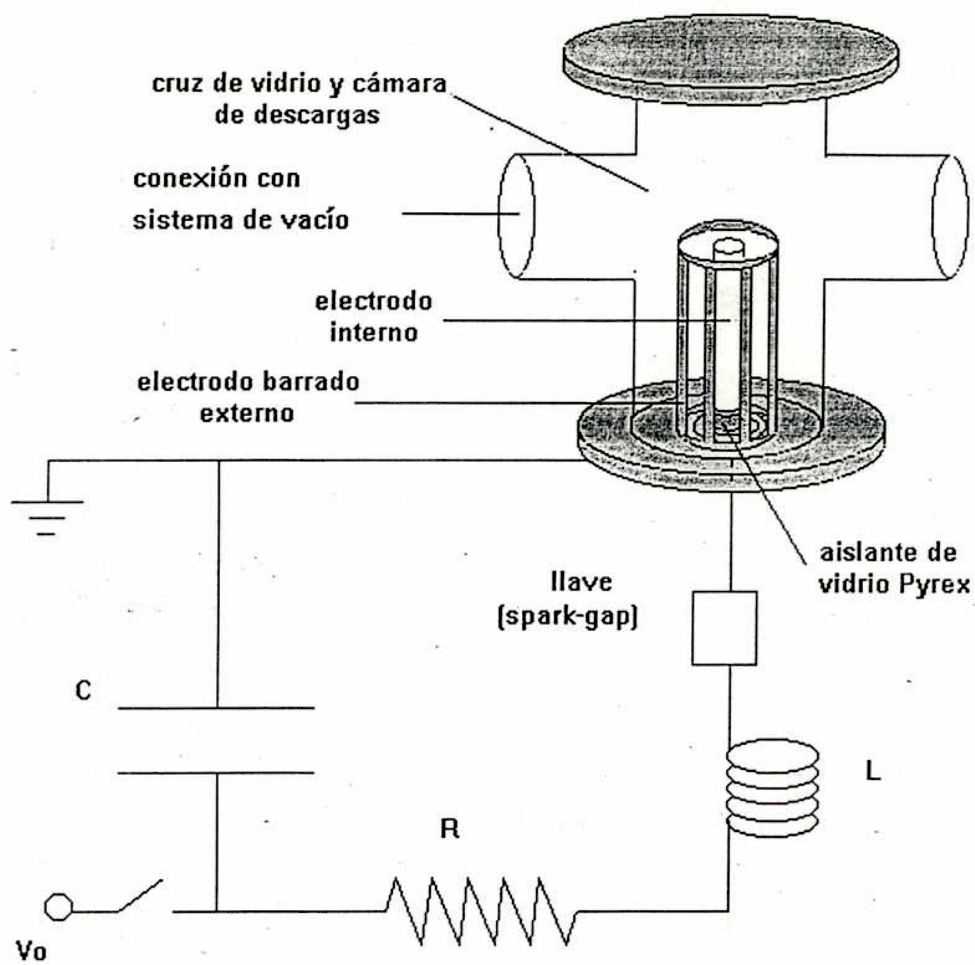
Rodeando la base del electrodo central se ubica como aislante un tubo de vidrio Pyrex de (1.3 ± 0.2) mm de pared y (44.2 ± 0.1) mm de longitud. Un detalle de los electrodos, el aislante y otras piezas auxiliares se presenta en la figura 2-2. En la tabla 2-1 se consignan los valores de los parámetros geométricos descriptos.

r_A (cm)	0.47 ± 0.02
l_A (cm)	10.0 ± 0.1
$r_{\text{interno(aislante)}}$ (mm)	5.1 ± 0.2
$r_{\text{externo(aislante)}}$ (mm)	6.4 ± 0.2
$l_{\text{(aislante)}}$ (mm)	44.2 ± 0.1
$r_{\text{interno}B}$ (cm)	2.54 ± 0.02
$r_{\text{externo}B}$ (cm)	2.70 ± 0.02
l_B (cm)	10.0 ± 0.1

Tabla 2-1 Datos geométricos del aislante y los electrodos, interno (A) y externo (B), del equipo CCII.

El juego de electrodos se ubica dentro de una cámara de vidrio Pyrex transparente (de ~ 5 mm de pared y un volumen aproximado de $\sim 6.5 \text{ dm}^3$) que tiene la forma de una cruz con brazos cilíndricos de radios internos (5.5 ± 0.2) cm. La longitud entre cualesquiera de las bocas enfrentadas de la cruz de vidrio es (36.0 ± 0.5) cm. La cruz de vidrio puede observarse fotografiada en la figura 2-3.

Uno de los brazos de la cruz de vidrio Pyrex se conecta al sistema de vacío y provisión



Figura~2-1: Esquema del equipo CCII.

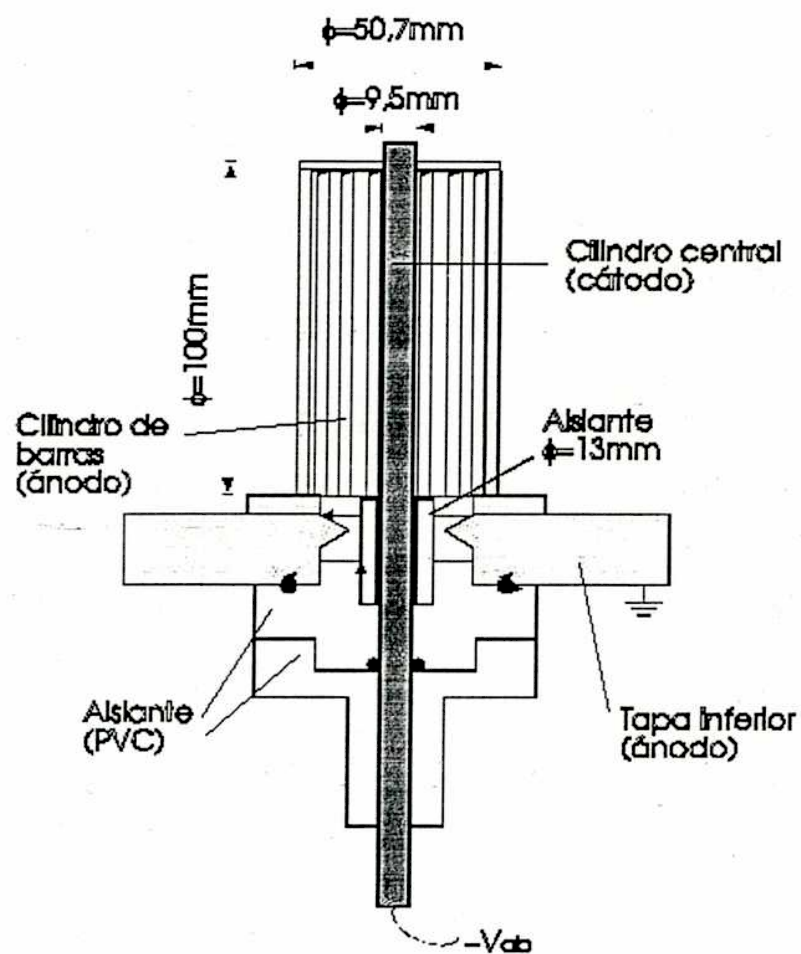


Figura 2-2: Detalle de los electrodos, el aislante y piezas auxiliares del equipo CCII.

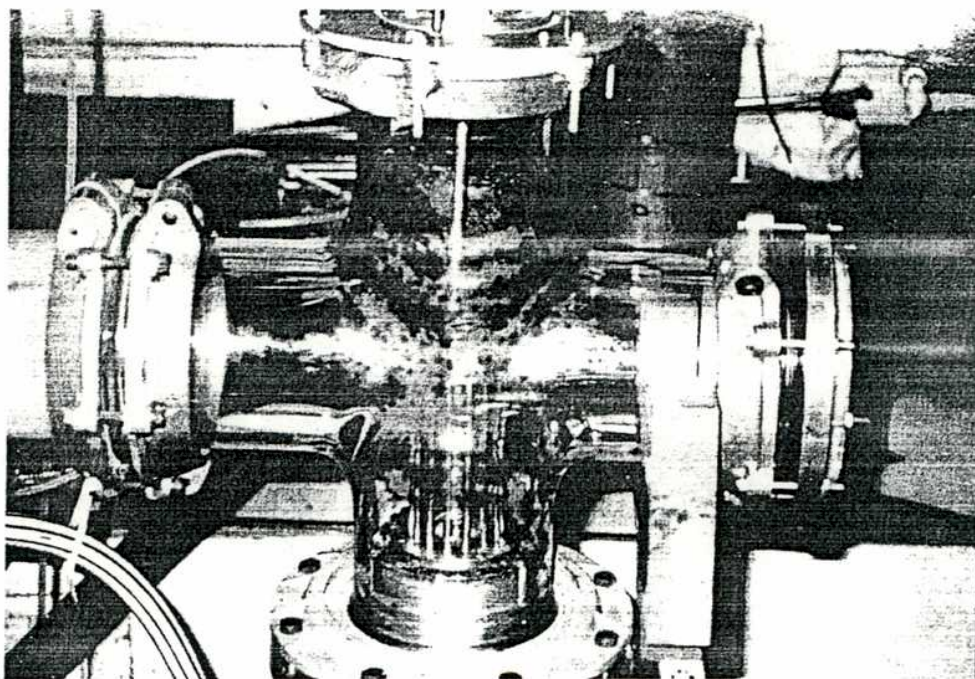


Figura 2-3: Fotografía de la cámara de descargas del equipo CCII. El juego de electrodos se introduce por la boca inferior, la boca derecha tiene una ventana óptica que permite tomar fotografías y la boca izquierda conecta con el sistema de vacío y provisión de gases.

de gases. El sub-sistema de vacío esta formado por una bomba mecánica Cindelvac, modelo D200 de dos etapas, y una bomba difusora de aceite Consolidated Electrodynamics Co., modelo MCF300, trabajando en serie. El sub-sistema de provisión de gases está formado por tubos de gases de ultra alta pureza comprimidos a alta presión (~ 300 atm), una válvula reguladora de una etapa, un tubo de cobre de $\frac{1}{4}$ de pulgada de diámetro y una válvula de acceso a la cámara de descargas. Los gases empleados en este equipo fueron N_2 , Ar e H_2 . Las descargas eléctricas estudiadas en esta tesis corresponden siempre a un único gas (alguno de los tres mencionados anteriormente) dado que no se realizaron mezclas de gases. Con el sistema de vacío y provisión de gases se obtiene una atmósfera estanca dentro de la cámara, requerida para realizar las descargas. Las presiones típicas de los gases empleados dentro de la cámara de descargas son: 1, 1.5, 5.5 y 10.5 mbar. Estas presiones se miden empleando un manómetro Leybold-Heraeus de aguja (tipo Bourdon), que se observa en la figura 2-4, cuya mínima división corresponde a la décima de mbar (éste dispositivo fue contrastado y recalibrado con un medidor capacitivo de presión Edwards, modelo 600 AB, en el rango 0.1 – 10 mbar). El sistema de vacío y provisión de gases se observa en la fotografía de la figura 2-5.

Como circuito eléctrico externo para el equipo CCII se emplearon sucesivamente 3 configuraciones RLC serie que denominaremos RLC1, RLC2 y RLC3.

2.1.1 Circuito RLC1

El circuito RLC1 se muestra en la figura 2-6. Está formado básicamente por un banco de 30 capacitores Maxwell modelo 30665 (cada uno con un valor nominal de $20 \mu F \times 7.5$ kV y 10 nH de inductancia espúrea serie equivalente), cuya capacidad medida es $C_1 = (628 \pm 5) \mu F$, una inductancia $L_1 = (7.15 \pm 0.05) \mu H$ (provista esencialmente por una bobina externa cilíndrica de 5 vueltas de alambre esmaltado AWG8, de ~ 30 cm de diámetro y longitud ~ 40 cm) y una resistencia $R_1 = (0.102 \pm 0.002) \Omega$ (provista esencialmente por una barra cilíndrica de acero inoxidable de diámetro ~ 1 cm y longitud ~ 2 m).



Figura 2-4: Manómetro de aguja (tipo Bourdon) empleado para medir la presión de trabajo en la cámara de descargas del equipo CCII.

La descarga se inicia por medio de la llave gaseosa rápida (o "spark-gap"), construída en el laboratorio del INFIP, que se observa en la figura 2-7. La llave rápida es controlada mediante un pulso de alta tensión ($V_{m\acute{a}x} > 10$ kV) producido por un circuito auxiliar (generador de pulsos de disparo). Este circuito se basa en la descarga de un pequeño banco de capacitores, cuya capacidad total es $C \sim 3.3 \mu\text{F} \times 630$ V, cargados a 622 V sobre una bobina de automóvil (a modo de bobina de Rumkfort). La tensión generada en esta bobina se aplica entre el electrodo principal de salida de la llave gaseosa rápida y el electrodo de control (alojado en el cuerpo del electrodo principal mencionado) a través de sendos capacitores auxiliares Sprague ($1000 \text{ pF} \times 40$ kV) que actúan como capacitores de bloqueo para la descarga principal.

Una señal de corriente típica $I(t)$ para el circuito RLC1 se muestra en la figura 2-8. Allí puede apreciarse que la corriente máxima provista por este circuito es ~ 16.5 kA y que este valor se alcanza a aproximadamente los $79 \mu\text{s}$ después del inicio de la descarga.

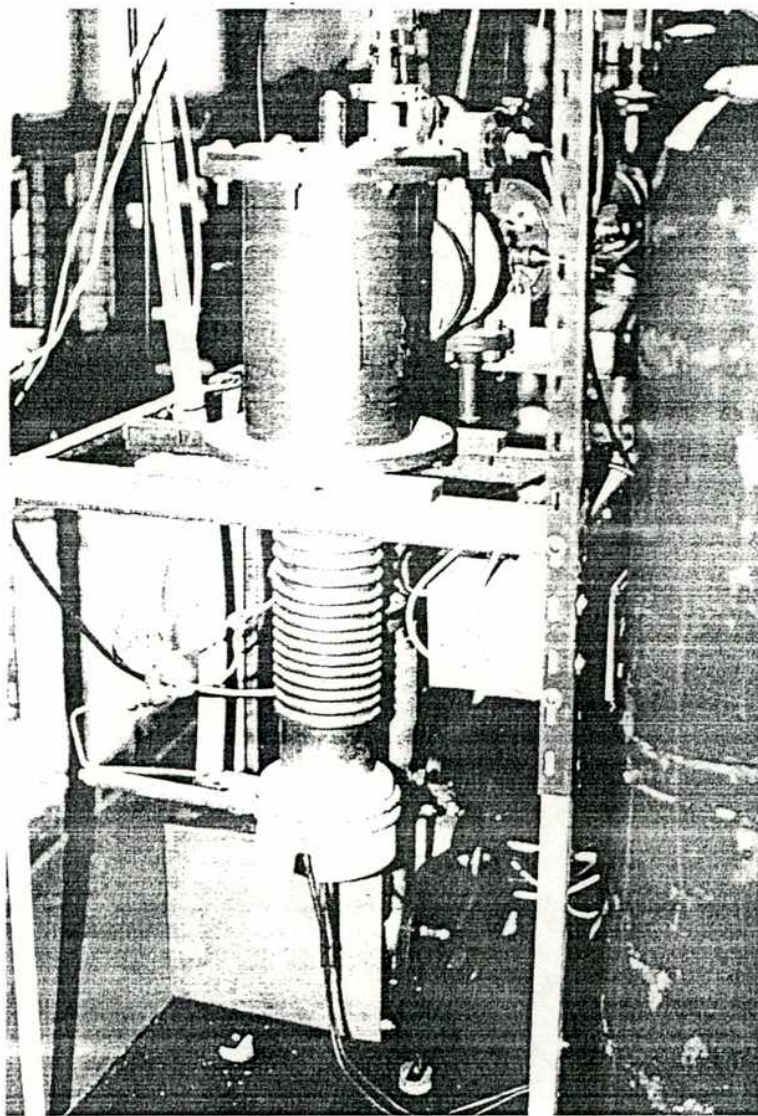


Figura 2-5: Sistema de vacío y provisión de gases para el equipo CCII.

La línea de transmisión entre el banco de capacitores y la cámara de descargas está formada por 4 cables RG 213 (la impedancia característica de cada uno es 50Ω), de aproximadamente 80 cm de longitud, dispuestos en paralelo.

El banco de capacitores se carga por medio de una fuente comercial (Altatec) de media onda y amplitud variable. Esta fuente de tensión opera con continuidad en el rango 0 – 4 kV (potencia media ~ 1 kW) y posee una resistencia interna limitadora de la corriente que le extrae la carga (que en este circuito es esencialmente el banco de capacitores). La tensión de carga empleada por el circuito RLC1 fue $\pm(3.00 \pm 0.02)$ kV en todas las experiencias. Esta fuente (cuyo panel frontal se observa en la figura 2-9), al permitir al experimentador invertir el signo de la tensión que provee, ofrece la posibilidad de estudiar la influencia del cambio de polaridad de los electrodos de la descarga en la dinámica y la morfología del plasma generado.

2.1.2 Circuito RLC2

El circuito RLC2 está formado por el mismo banco de capacitores del circuito RLC1 pero con nuevas inductancia y resistencia (la inductancia y resistencia parásitas del conector entre el banco de capacitores y la cámara de descargas), $L_2 \sim 1.3$ nH y $R_2 \sim 0.013 \Omega$.

Para este circuito se usan la misma llave rápida (con el mismo generador de pulsos de disparo) y la misma fuente de alta tensión que se emplearon en el circuito RLC1. Nuevamente es posible cambiar la polaridad de los electrodos de la descarga (utilizar el electrodo central como cátodo o como ánodo).

La señal de corriente típica $I(t)$ para el circuito RLC2 se muestra en la figura 2-10. Allí puede apreciarse que la corriente máxima generada por este circuito es ~ 41 kA y que este valor se alcanza a los $\sim 36 \mu s$ después del inicio de la descarga. Se emplea la misma línea de transmisión entre el banco de capacitores y la cámara de descargas que la utilizada en el circuito RLC1.

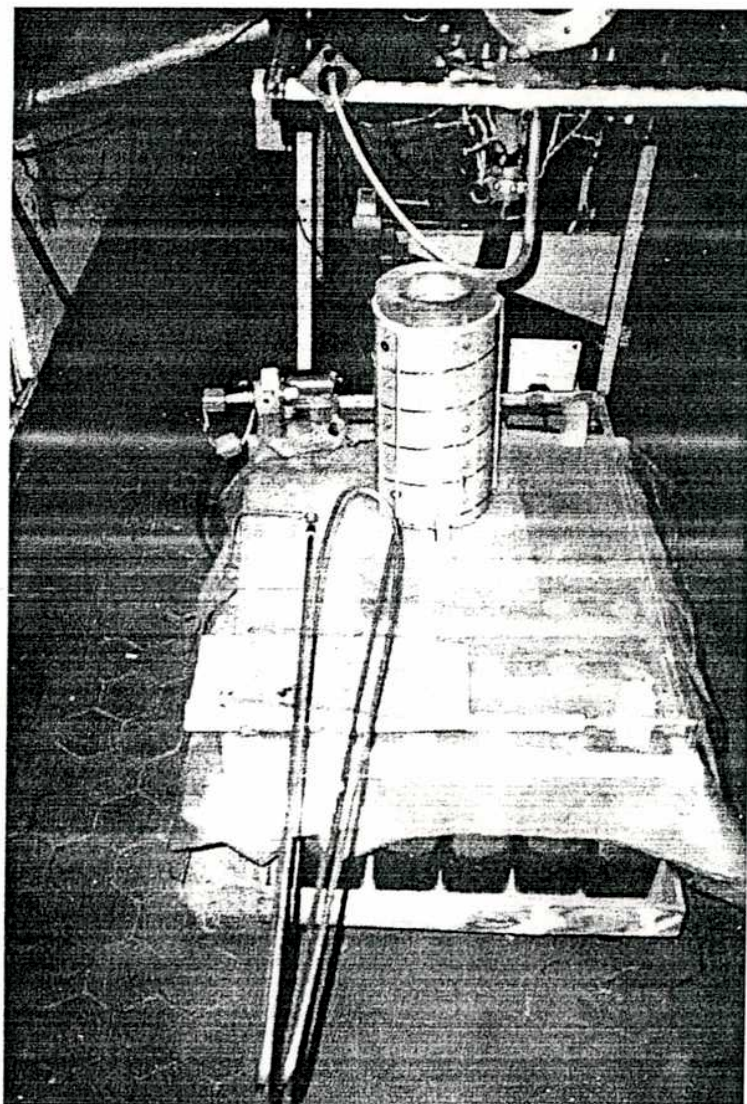


Figura 2-6: Circuito RLC1. Se observan el banco de capacitores, la resistencia y la inductancia junto con la llave rápida gaseosa y las principales conexiones.

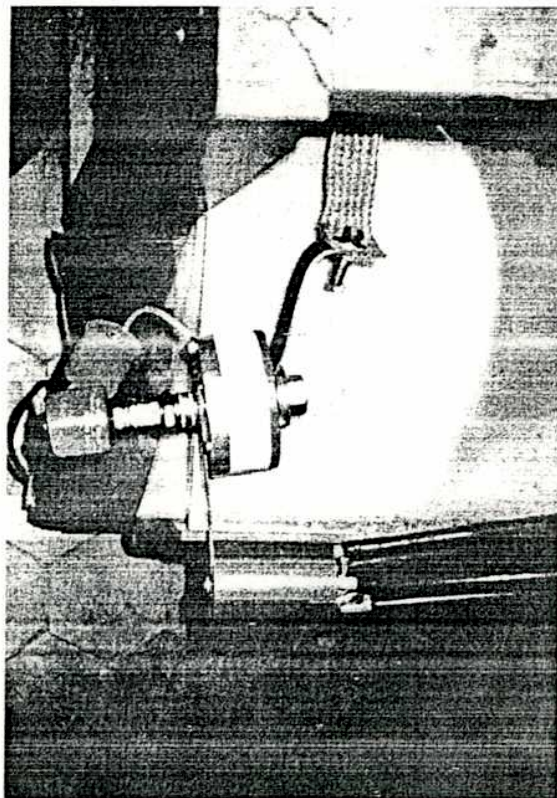


Figura 2-7: Detalle de la llave gaseosa rápida o "spark-gap" del equipo CCII y sus conexiones. A la izquierda se observa una bujía de automóvil que actúa de electrodo disparador y dos capacitores de bloqueo cilíndricos Sprague (1000 pF x 40 kV cada uno). En la zona inferior se distinguen los 4 cables RG 213 que obran de línea de transmisión entre el banco de capacitores y la cámara de descargas.

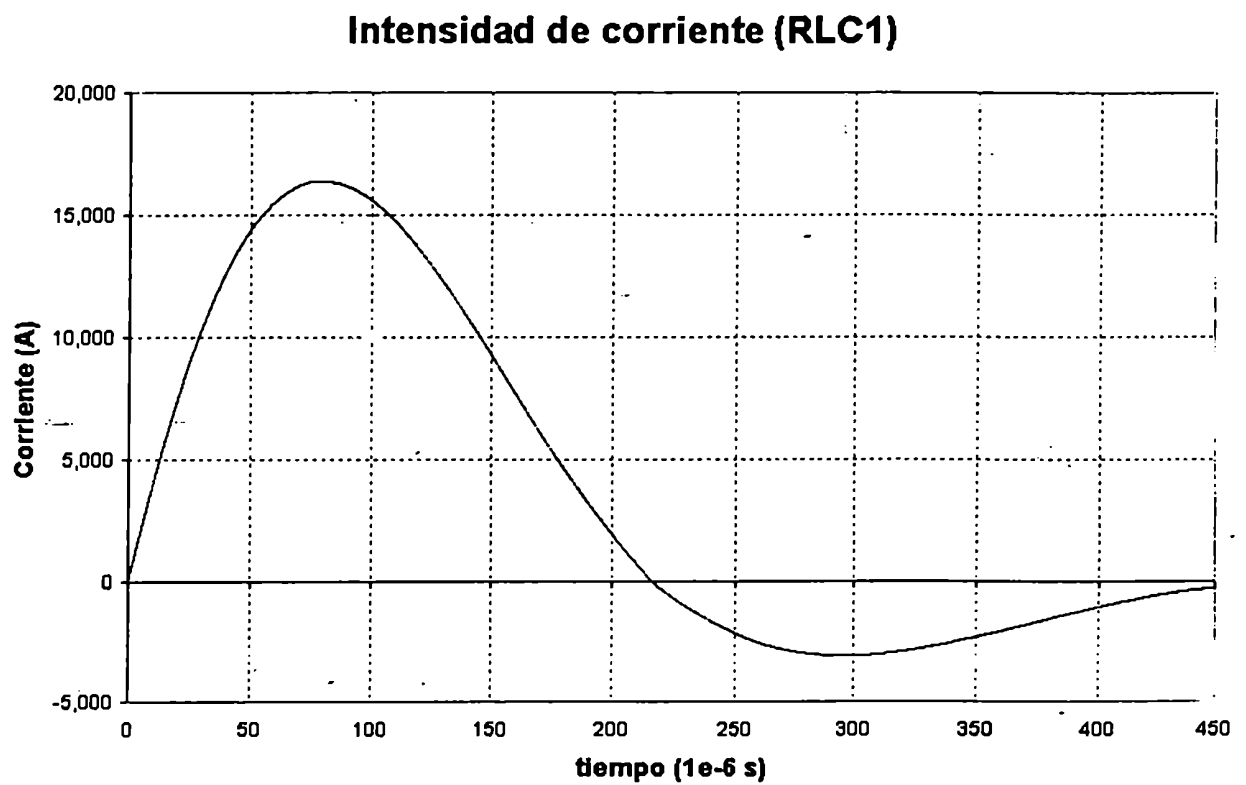


Figura 2-8: Señal típica de corriente para el circuito RLC1.



Figura 2-9: Fuente de tensión empleada para los circuitos RLC1 y RLC2.

2.1.3 Circuito RLC3

El circuito RLC3 se presenta en la figura 2-11. Está formado por un banco de 8 capacitores Maxwell modelo 31161 (cada uno de ellos de valor nominal de capacidad $0.7 \mu\text{F}$ x 50 kV, y 20 nH de inductancia espúrea serie equivalente).

La inductancia y la resistencia del circuito RLC están dadas por los respectivos elementos parásitos del conexionado entre el banco de capacitores y la cámara de descargas y son $L_3 \sim 1.9 \text{ nH}$ y $R_3 \sim 0.014 \Omega$. La descarga se inicia mediante una llave gaseosa rápida comercial (Spark Gap Maxwell modelo 40063, con rango de operación entre 20 kV y 100 kV, que se observa en la figura 2-12). Para este circuito se emplea el mismo generador de pulsos de disparo de los circuitos RLC1 y RLC2.

El banco de capacitores se carga mediante una fuente comercial de amplitud variable entre 0 y 50 kV. La fuente de tensión empleada se observa en la figura 2-13. La tensión de carga empleada para el circuito RLC3 fue $(20.0 \pm 0.2) \text{ kV}$ en todas las experiencias que se presentan en esta tesis. Esta fuente no permite la inversión del signo de la tensión de carga, por lo tanto en las experiencias correspondientes al circuito eléctrico RLC3 el

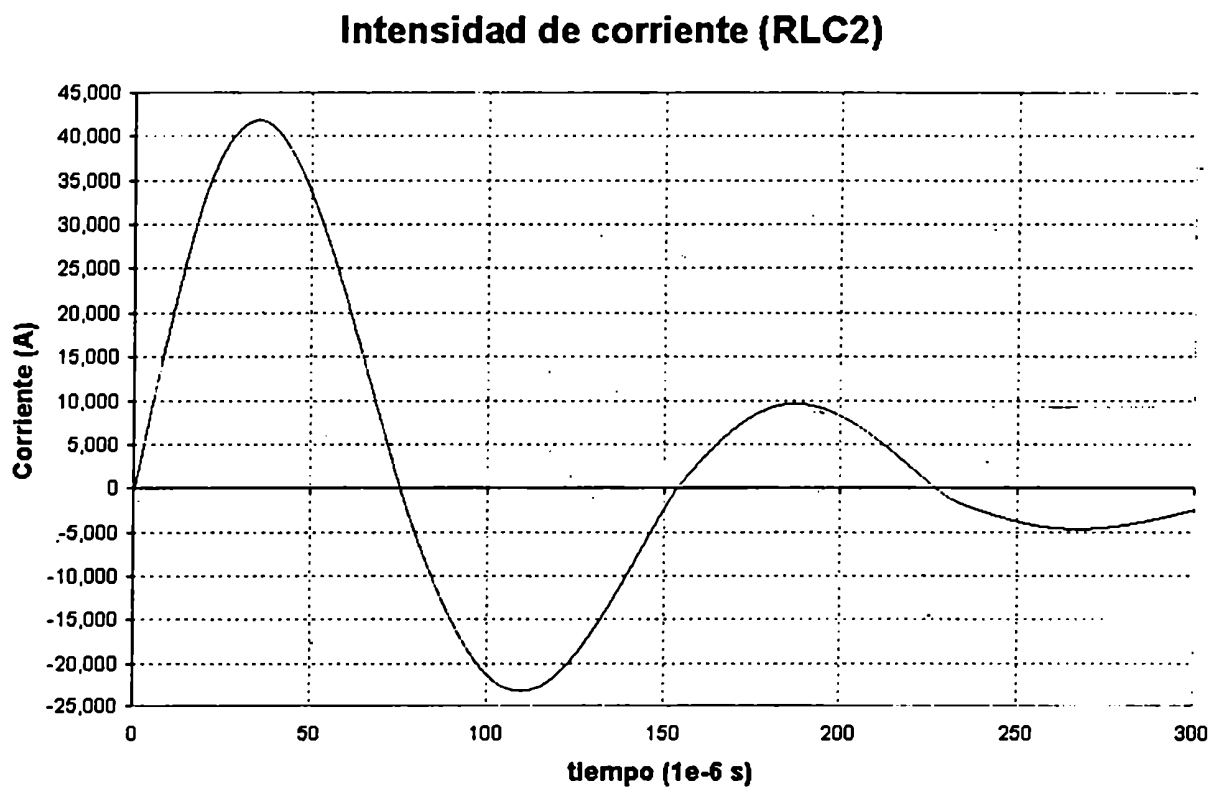


Figura 2-10: Señal típica de corriente para el circuito RLC2.

electrodo central es siempre el ánodo de la descarga.

Entre el banco de capacitores y la fuente se coloca una resistencia adicional de $\sim 500 \text{ k}\Omega$, (formada por 50 resistencias, cada una de $10 \text{ k}\Omega$ y 2 W) para limitar la corriente que se extrae de la fuente. Esto es especialmente necesario para proteger a la fuente en los casos en los que se produce una descarga espontánea (no generada por medio del circuito auxiliar de disparo) entre los electrodos.

La tabla 2-2 muestra los parámetros de los circuitos eléctricos RLC1, RLC2 y RLC3 comparados. Para cada uno de los circuitos RLC serie C , L y R representan los valores de capacidad, inductancia y resistencia respectivamente, $I_{m\acute{a}x}$ es la intensidad de corriente máxima, y $\tau_{m\acute{a}x}$ es el tiempo que transcurre desde el inicio de la descarga hasta que la intensidad de corriente alcanza su máximo valor. Los valores para C , L y R se obtuvieron a partir del análisis de descargas de cada uno de los circuitos sobre la misma pieza de cortocircuito especialmente diseñada para ese fin (la pieza de cortocircuito se ubica en reemplazo de los electrodos al realizar estas descargas) los valores de $I_{m\acute{a}x}$ y $\tau_{m\acute{a}x}$ son valores medios de las descargas obtenidas.

La señal de corriente $I(t)$ típica para el circuito RLC3 se observa en la figura 2-13. Allí puede apreciarse que la corriente máxima provista por este circuito es $\sim 200 \text{ kA}$ y que este valor se alcanza a $\sim 1.7 \mu\text{s}$ después del inicio de la descarga.

	RLC1	RLC2	RLC3
$C \text{ (}\mu\text{F)}$	628 ± 5	628 ± 5	~ 5.6
$L \text{ (nH)}$	7.15 ± 0.05	~ 1.3	~ 1.9
$R \text{ (}\Omega\text{)}$	0.102 ± 0.002	~ 0.013	~ 0.014
$I_{m\acute{a}x} \text{ (kA)}$	~ 15	~ 40	~ 200
$\tau_{m\acute{a}x} \text{ (}\mu\text{s)}$	~ 79	~ 36	~ 1.7
Energía (kJ)	~ 2.8	~ 2.8	~ 1.1
Potencia (MW)	~ 16	~ 35	~ 340

Tabla 2-2 Parámetros de los circuitos eléctricos.

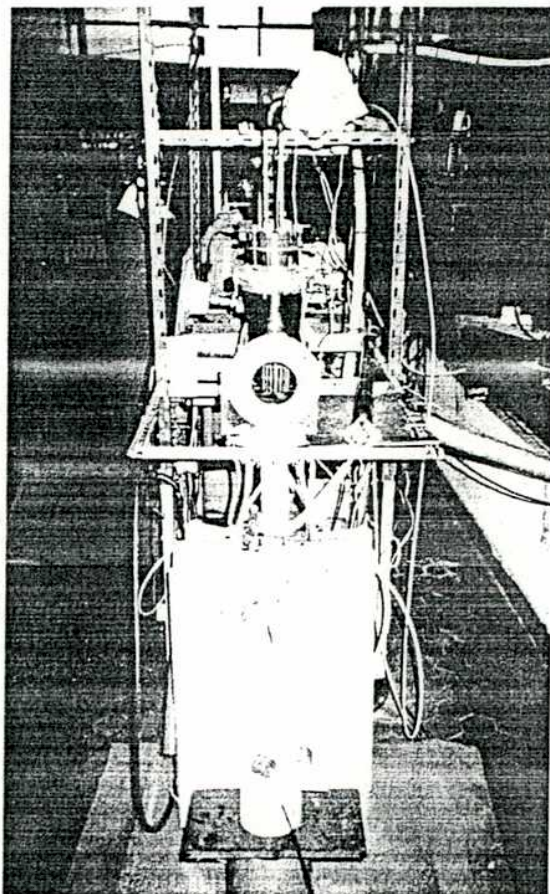
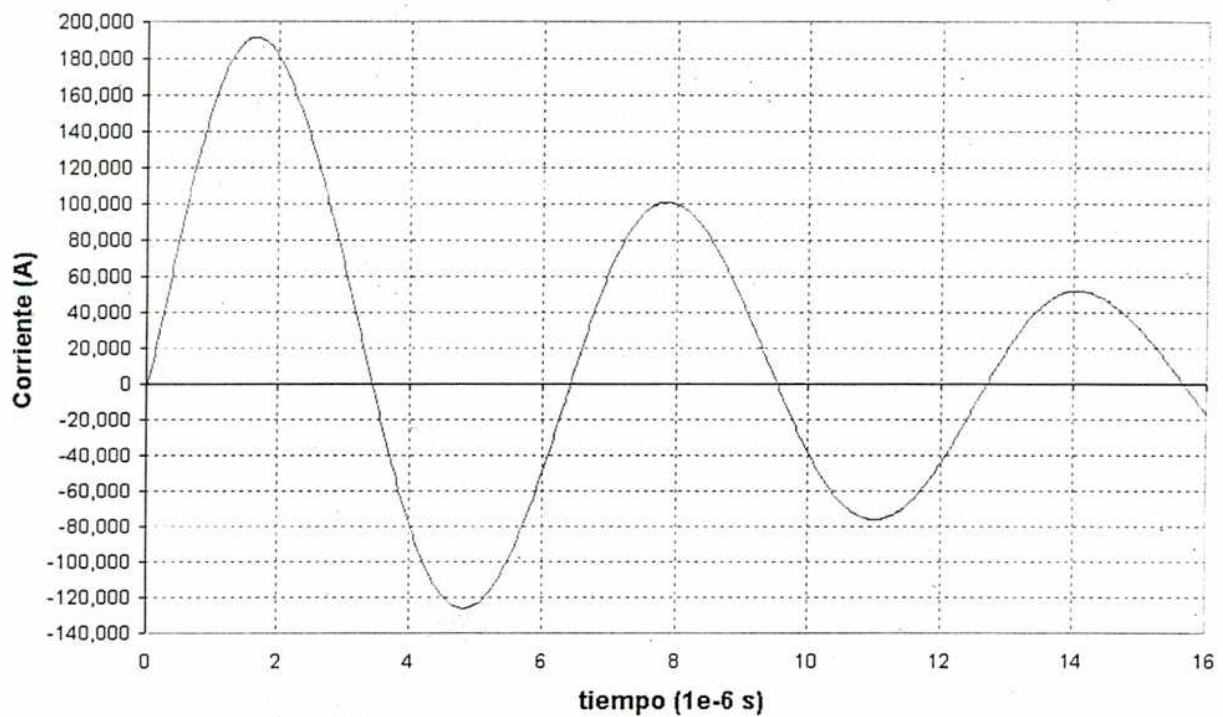


Figura 2-11: Circuito RLC3. Está formado básicamente por 8 capacitores de $0.7 \mu\text{F}$ x 50 kV cada uno, y la resistencia e inductancia propias del conexionado. En la parte inferior, en primer plano, se observan los dos capacitores de bloqueo que desacoplan el sistema de disparo.



Figura~2-12: Llave rápida gaseosa del equipo RLC3.

Intensidad de corriente (RLC3)



Figura~2-13: Señal típica de corriente para el circuito RLC3.

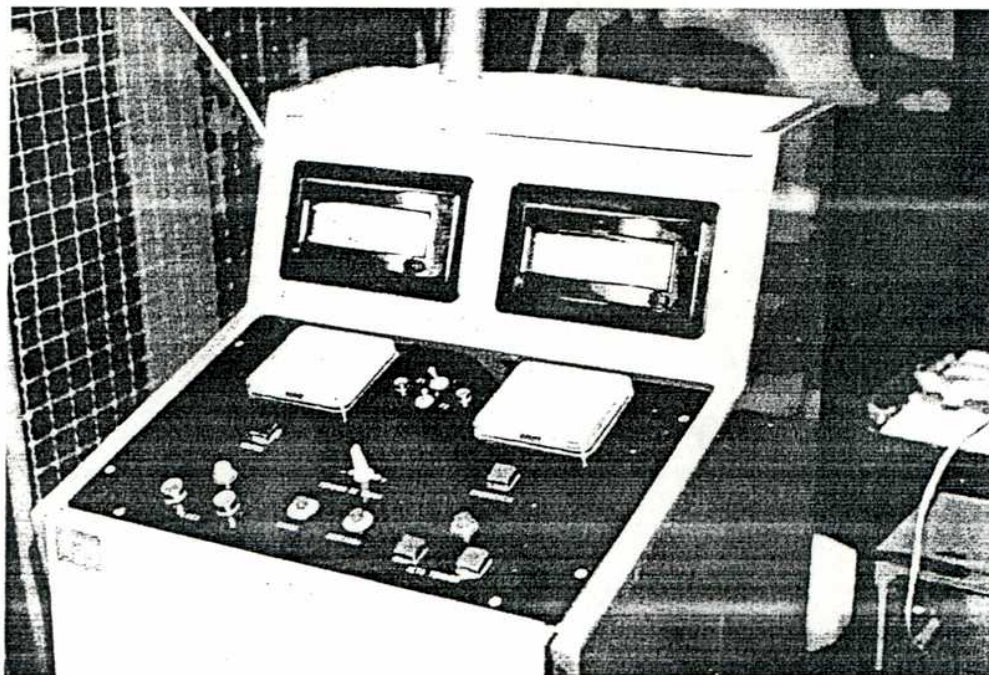


Figura 2-14: Fuente de tensión empleada en el circuito RLC3.

2.2 Diagnósticas empleadas en el equipo CCII

Las diagnósticas empleadas para caracterizar el plasma producido en el equipo CCII utilizaron los siguientes sensores: dos bobinas de Rogowski, un divisor resistivo de tensión, tres pares de sondas magnéticas inductivas, y un convertidor de imágenes. Cada uno de ellos se describe en detalle a continuación.

2.2.1 Bobinas de Rogowski

Dado que las estimaciones del máximo valor de dI/dt para los circuitos RLC1 y RLC2 ($dI/dt \cong 10^8 \text{ A/s}$) difieren en aproximadamente 2 órdenes de magnitud con la correspondiente al circuito RLC3 ($dI/dt \cong 10^{10} \text{ A/s}$), y teniendo en cuenta que la tensión entregada por la bobina de Rogowski debe ser medida en un osciloscopio (por lo que su amplitud no debe superar algunas decenas de voltios) se decidió diseñar y construir dos bobinas de

Rogowski, que llamaremos *ROGLEN* y *ROGRAP* (la primera destinada a medir dI/dt en RLC1 y RLC2, la segunda a hacerlo en RLC3).

La calibración de estos dos instrumentos se realizó mediante el uso de dos circuitos auxiliares RLC serie en cada uno de los cuales el valor de la resistencia se conoce con una incerteza inferior al 1 %. Midiendo la caída de tensión sobre esta resistencia conocida, con lo cual se obtiene una curva proporcional a la corriente eléctrica del circuito auxiliar en función del tiempo. Integrando numéricamente la señal entregada por la bobina de Rogowski cuando esta rodea alguna de las ramas del circuito auxiliar mencionado y comparando ambas curvas se obtienen las constantes de calibración de *ROGLEN* y *ROGRAP*, cuyos valores resultaron ser :

$$V_{rog} = k_{ROG} \cdot \frac{dI}{dt} \Rightarrow$$

$$k_{ROGRAP}^{-1} = (2.55 \pm 0.10) 10^{10} \frac{A}{s.V}$$

$$k_{ROGLEN}^{-1} = (5.75 \pm 0.10) 10^7 \frac{A}{s.V}$$

Estos valores se corresponden con sus constantes de calibración constructivas

$$k_{ROGCONSTRUCT} = \mu_0 \pi \frac{N}{L} (a^2 - b^2) = (4\pi 10^{-7}) \pi \frac{N}{L} (a^2 - b^2) \Rightarrow$$

$$k_{ROGRAPCONSTRUCT}^{-1} = (2.25 \pm 0.30) 10^{10} \frac{A}{s.V}$$

$$k_{ROGLENCONSTRUCT}^{-1} = (5.73 \pm 0.62) 10^7 \frac{A}{s.V}$$

Donde μ_0 es la permeabilidad magnética del vacío, $\frac{N}{L}$ la densidad de espiras (N es el número de espiras de la bobina y L la longitud sobre la cual están uniformemente distribuidas), a el radio de las espiras y b el radio del conductor de la espira central de retorno[2]. Los parámetros constructivos de las bobinas *ROGLEN* y *ROGRAP* se presentan en la tabla 2-3. La bobina de Rogowski *ROGLEN* se muestra en la figura 2-15.



	<i>ROGLEN</i>	<i>ROGRAP</i>
$\frac{N}{L} \left(\frac{1}{\text{cm}} \right)$	2	0.25
$a \text{ (mm)}$	9.5 ± 0.1	1.8 ± 0.02
$b \text{ (mm)}$	2.4 ± 0.1	1.2 ± 0.02
$k_{ROG}^{-1} \left(\frac{\text{A}}{\text{s.V}} \right)$	$(5.75 \pm 0.10)10^7$	$(2.55 \pm 0.10)10^{10}$

Tabla 2-3 Datos geométricos y constantes de calibración de las bobinas de Rogowski.

2.2.2 Divisor resistivo de tensión

Para medir la tensión entre los electrodos de la descarga eléctrica se empleó un divisor resistivo de tensión formado por una cadena de 62 resistencias de $(680 \pm 34) \Omega$, $\frac{1}{8} \text{ W}$, que posee una resistencia total de $(41.81 \pm 0.05) \text{ k}\Omega$. Esta cadena se ubica en el eje de un tubo cilíndrico de bronce ($\phi_{int} \sim 36 \text{ cm}$, longitud $\sim 1 \text{ m}$). El cilindro de bronce se halla a potencial de tierra y la cadena de resistencias se conecta al tubo a través de una resistencia de $(561.0 \pm 0.5) \Omega$. Las resistencias están aisladas eléctricamente por medio de un tubo de vidrio de $\phi_{ext} \sim 1.15 \text{ cm}$ y espesor $\sim 1 \text{ mm}$. La calibración de este sensor se realizó empleando un pulso cuadrado de tensión (de amplitud $\sim -200 \text{ V}$, duración variable entre 10 ns y $1 \mu\text{s}$, y tiempo de subida o “rise time” $\sim 2 \text{ ns}$) que provee un generador de pulsos comercial Princeton Instruments FG-100. El factor de calibración obtenido fue:

$$\frac{V_{in}}{V_{out}} = 911.7 \pm 0.5$$

El divisor resistivo cumple una función adicional cuando está conectado al equipo CCII, y ésta es determinar que el electrodo central posea al inicio de la descarga un potencial de tierra.

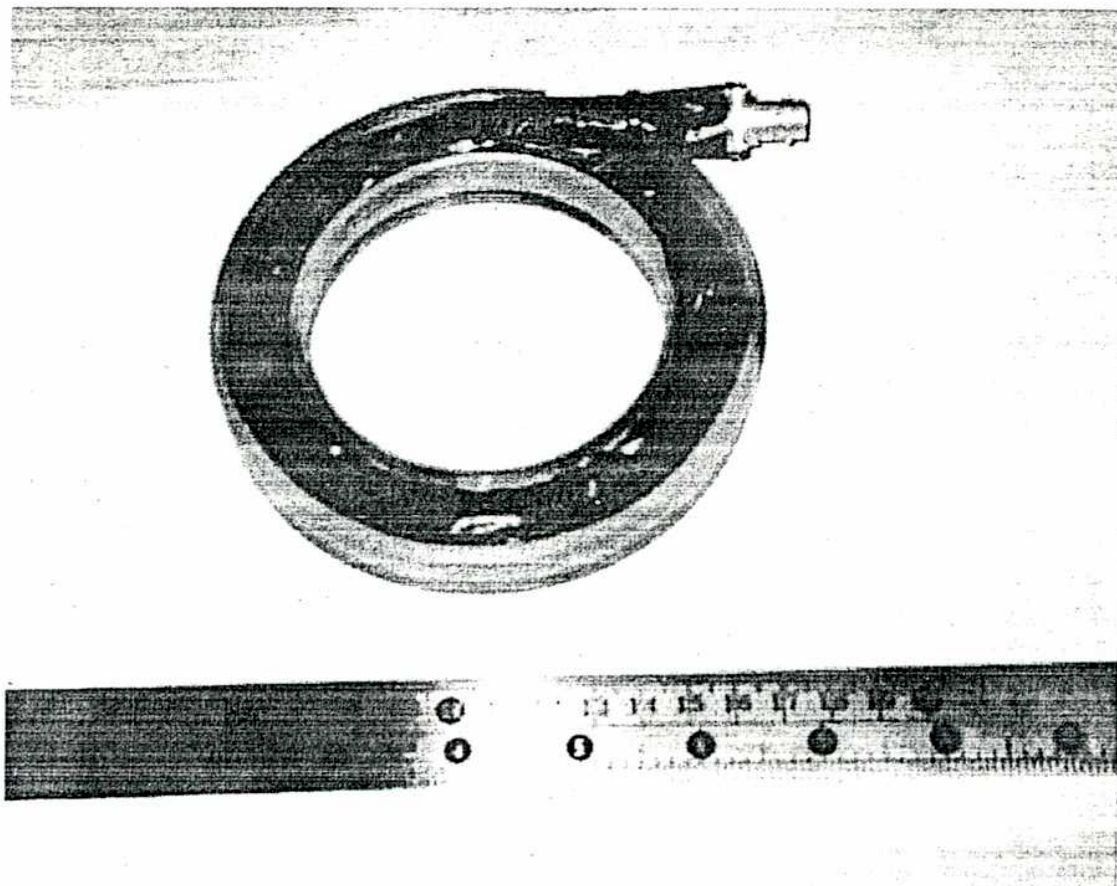


Figura 2-15: Bobina de Rogowski *ROGLEN*. En la fotografía se aprecia la sede de acrílico en la que fue alojada con el fin de aumentar su aislación e impedir que deformaciones posteriores cambien su constante de calibración. Se observa también el conector coaxial por el cual se extrae la señal medida por el instrumento.

2.2.3 Sondas magnéticas inductivas

Se construyeron tres pares de sondas magnéticas inductivas para el equipo CCII denominadas (S_1, S_2) , (S_3, S_4) y (S_5, S_6) . Cada par corresponde a un diámetro externo $\Phi_{\text{aislante exterior}}$ distinto del vidrio aislante que los recubre. La figura 2-16 muestra una fotografía de dos pares de sondas junto a las piezas con las cuales son introducidas a la cámara de descargas (fuelle de bronce o “Bellow” y portasondas). Las características de estas sondas se indican en la tabla 2-4. En todos los casos se emplea un cable microcoaxial (del tipo RPA 174 A/U, con impedancia característica de 50Ω) para transportar la señal de tensión provista por la bobina sensora, alojada lo más cerca posible del extremo cerrado del tubo aislante que la contiene, hasta el extremo abierto del mismo tubo. En el caso de S_1 y S_2 este microcoaxial presenta una malla extra exterior (también incluida dentro del tubo de vidrio) para mejorar el blindaje electromagnético de la señal que transporta. Desde el extremo del tubo de vidrio aislante y hasta el osciloscopio digitalizador la señal viaja por un cable coaxial RG 58 (con impedancia característica de 50Ω).

La pieza que realiza el soporte de los cuerpos de las sondas (portasondas en la figura 2-16) realiza también el cierre de vacío, mantiene el paralelismo entre los tubos de vidrio y permite desplazar las sondas en la dirección Z (dirección del eje de simetría de los electrodos coaxiales, que a su vez es vertical) y rotarlas en el ángulo azimutal Ψ alrededor del eje de simetría mencionado.

La pieza fuelle o “Bellow” permite corregir mediante tres tornillos micrométricos pequeñas diferencias de alineación entre el eje de rotación de las sondas y el eje de simetría del cañón coaxial. La posibilidad de alinear ambos ejes y de desplazar en esta dirección los cuerpos de las sondas, cambiando en consecuencia la posición de sus bobinas sensoras, permite obtener las curvas de $\frac{dB}{dt}$ (derivada total del campo magnético respecto al tiempo) en función del tiempo para distintos valores de Z , tomando como $Z = 0$ el extremo cerrado del cañón coaxial, y con ellas inferir la cinemática de la lámina de corriente.

Para poder determinar el valor de la derivada temporal del campo magnético sentido

por cada sonda es necesario medir el área efectiva de su bobina sensora e identificar su normal. Para cada sonda construída este área se midió utilizando un generador de pulsos de campo magnético diseñado especialmente para este tipo de mediciones (que se observa en la figura 2-17). El método de calibración se basa en comparar la señal que provee la sonda magnética de área desconocida con la de una espira cuya área se conoce con una precisión de $\sim 1.4\%$ cuando ambas se ubican en una zona de campo magnético uniforme y variable en el tiempo. El campo magnético variable se produce en el interior de una bobina (bobina generadora), que forma parte de un circuito RLC serie. El área de la espira conocida o espira patrón es $A_p = (326.5 \pm 4.5) \text{ mm}^2$. La uniformidad del campo magnético generado en la zona donde se ubican ambas sondas está garantizada tanto por los cálculos basados en la geometría de la bobina generadora como por la exploración radial realizada con las sondas a ser calibradas. A partir de las señales obtenidas se realiza una correlación lineal entre los valores de tensión de la sonda a calibrar y los valores de tensión de la espira patrón para extraer el valor del área efectiva $A_{efectiva}$ de la sonda a calibrar. Esto es así debido a que la pendiente de la recta que surge de graficar las tensiones mencionadas una en función de la otra es el cociente de las áreas efectivas de ambas sondas.

La determinación de la normal de cada sonda se realizó comparando las señales obtenidas al variar su orientación respecto del eje magnético de la bobina generadora. Cuando se obtiene la señal máxima se identifica la normal pegando al cuerpo de la sonda un anillo de acrílico que contiene un indicador que identifica a partir de ese momento la dirección normal al plano que contiene las espiras de la bobina que forma la sonda magnética. Se verificó también que, para el caso en el que la normal de la sonda construída y el eje magnético de la bobina generadora son perpendiculares, la señal sensada por la sonda sea del orden de la incerteza de digitalización, de esta forma se verifica la ausencia áreas espúreas apreciables en las bobinas construídas. Se verificó asimismo en cada caso la completa inversión de la señal de la sonda al girar su normal 180° . Esto permite afirmar que las tensiones inducidas capacitivamente en la sonda magnética son despreciables

frente a las inducidas inductivamente. La figura 2-18 muestra una comparación típica de señales de tensión entre una sonda a calibrar y la espira patrón realizada en el proceso de calibración.

	$\Phi_{\text{aislante exterior}} \text{ (mm)}$	$A_{\text{efectiva}} \text{ (mm}^2\text{)}$
S_1	6.0 ± 0.2	39.6 ± 0.9
S_2	6.0 ± 0.2	31.7 ± 0.6
S_3	4.0 ± 0.2	43.8 ± 0.7
S_4	4.0 ± 0.2	54.1 ± 0.9
S_5	3.0 ± 0.2	47.5 ± 1.1
S_6	3.0 ± 0.2	44.6 ± 1.1

Tabla 2-4 Parámetros geométricos y áreas efectivas de las sondas magnéticas inductivas.

2.2.4 Convertidor de imágenes

Dada la naturaleza ultrarrápida de las descargas luminosas en estudio (su duración está entre $1 \mu\text{s}$ y $100 \mu\text{s}$) se empleó un convertidor de imágenes (CI) CORDIN modelo 511B para obtener fotografías que permitan caracterizarlas estudiando la morfología de la lámina de corriente generada en la descarga, la interacción de esta lámina con los electrodos y las sondas magnéticas, etc..

La señal de alta tensión que produce la obturación electro-óptica del convertidor de imágenes, con tiempos de exposición de película fotográfica de 5 ns, 10 ns, 50 ns, 100 ns y 1000 ns, cuando se utiliza el circuito interno de retrasos temporales como en el caso de este estudio, que permite retrasos continuos entre 600 ms y $100 \mu\text{s}$, debe accionarse mediante la llegada al conector “delay in positive” del CI de un pulso de tensión con $V_{\text{MÁX}} \gtrsim 30 \text{ V}$ y con un tiempo de subida de la señal o $t_{\text{RISETIME}} \lesssim 1 \mu\text{s}$.

Para producir este pulso y sincronizarlo con la señal TTL que provee el osciloscopio-

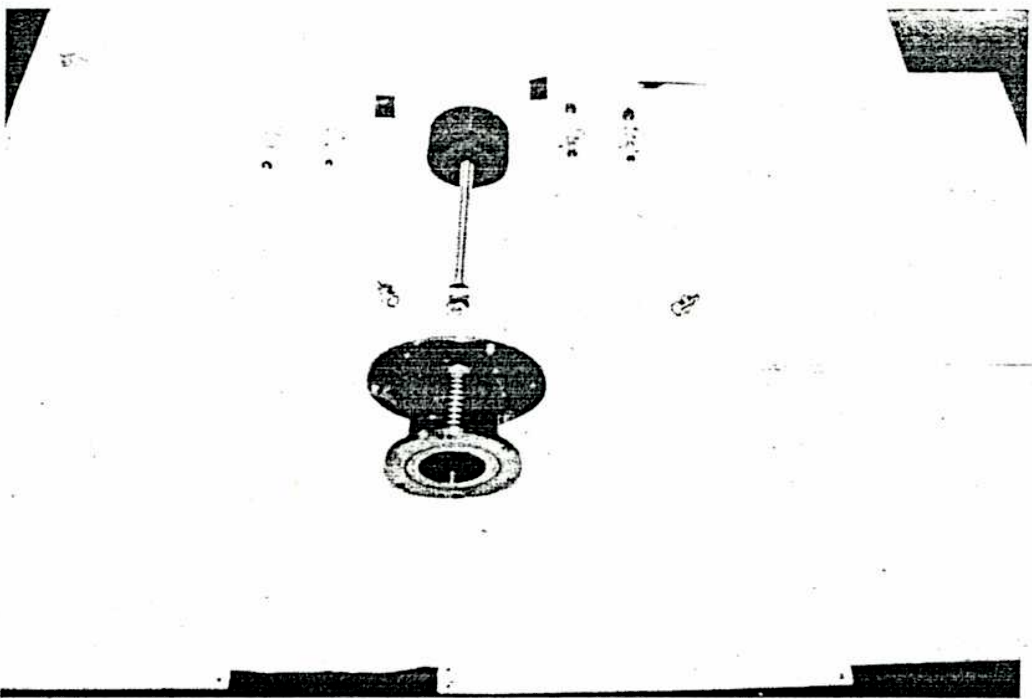
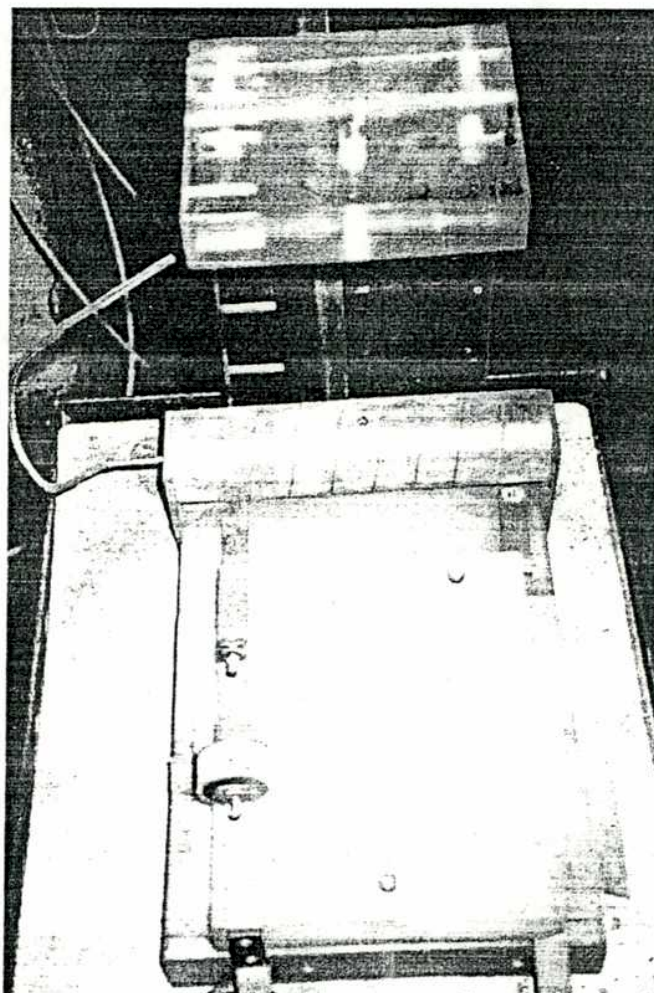


Figura 2-16: Portasondas, sondas magnéticas y fuelle (o "Bellow").



Figura~2-17: Circuito generador de pulsos utilizado para calibrar las sondas magnéticas.

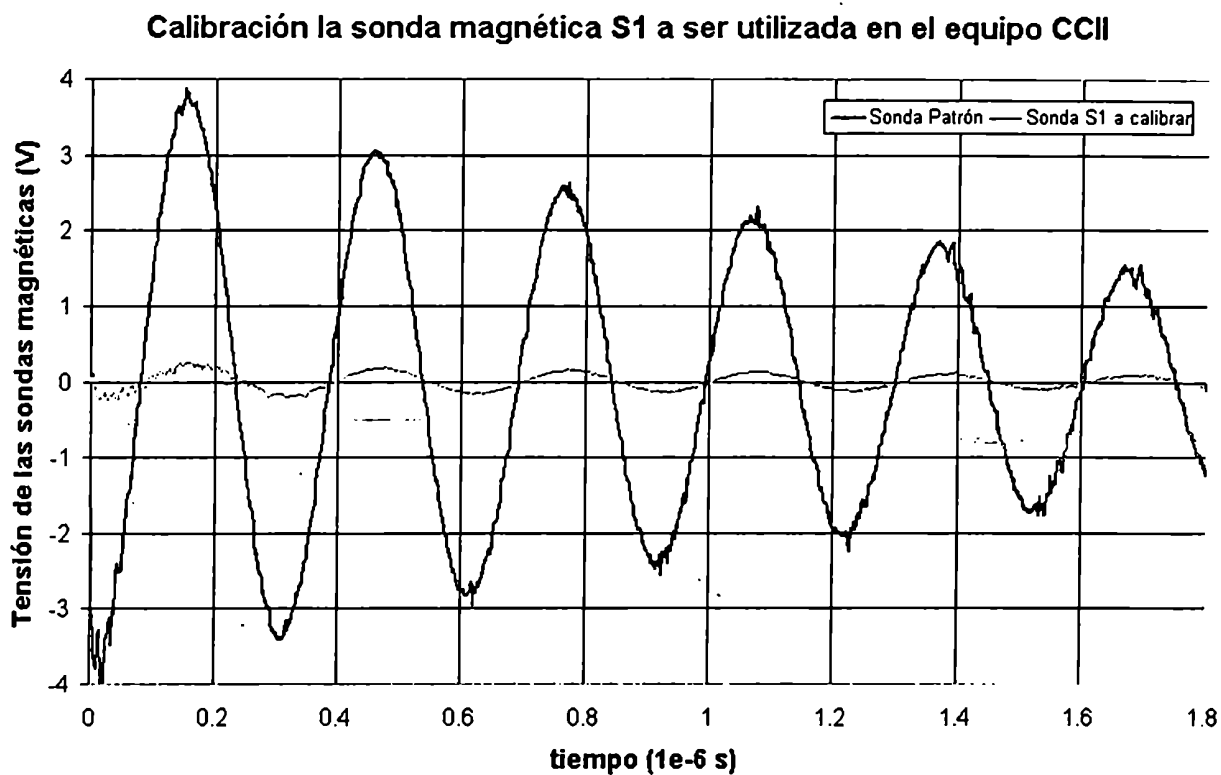


Figura 2-18: Gráfico de las señales de tensión empleadas para calibrar una sonda magnética.

digitalizador empleado debió construirse el circuito electrónico de la figura 2-19, este circuito además permite además adicionar retrasos temporales ($100 \mu s - 1 ms$) a los que ya produce el circuito retrasador temporal interno del CI. La sincronización se realiza electrónicamente utilizando la siguiente propiedad de la señal TTL provista el osciloscopio digitalizador: esta señal, que normalmente presenta una tensión constante en el tiempo de $V \sim 4 V_{TTL}$, baja a $V \sim 0 V_{TTL}$ durante el tiempo en el cual el osciloscopio digitalizador se encuentra adquiriendo una señal de tensión externa. La figura 2-20 muestra la parte posterior del CI, el frente de la caja metálica que contiene al circuito electrónico construido y la película fotográfica Polaroid empleada para obtener las fotografías (Polaroid 667, Blanco y Negro 3000 ASA). En la figura 2-21 se observa el panel posterior del CI con mayor detalle.

Dado que, como se observa en la figura 2-20, las fotografías se obtienen a través de una ventana ubicada en uno de los brazos de la cámara de descargas fue necesario también construir piezas que permitiesen posicionar el cañón coaxial total o parcialmente a la altura de esta ventana óptica. Se construyeron entonces dos suplementos (presentados en la figura 2-22) que elevan los electrodos respecto de su posición original (todo el cañón coaxial esta contenido en el brazo inferior de la cruz de vidrio), es decir los ubican de forma tal que su mitad superior (suplemento de 5 cm de longitud) o toda su longitud (suplemento de 10 cm de longitud) se encuentre a la altura de la ventana óptica. Las piezas construidas debieron naturalmente cumplir con el requisito de cerrar vacío en la cámara de descargas y ser capaces de conducir la corriente de retorno de la descarga.

2.3 Descripción del equipo GN1

El equipo GN1, cuya fotografía se muestra en la figura 2-23, también puede describirse como consistiendo básicamente de tres partes: un par de electrodos alojados en una cámara de descargas, un sistema de vacío y provisión de gases, y un circuito eléctrico externo (RLC4).

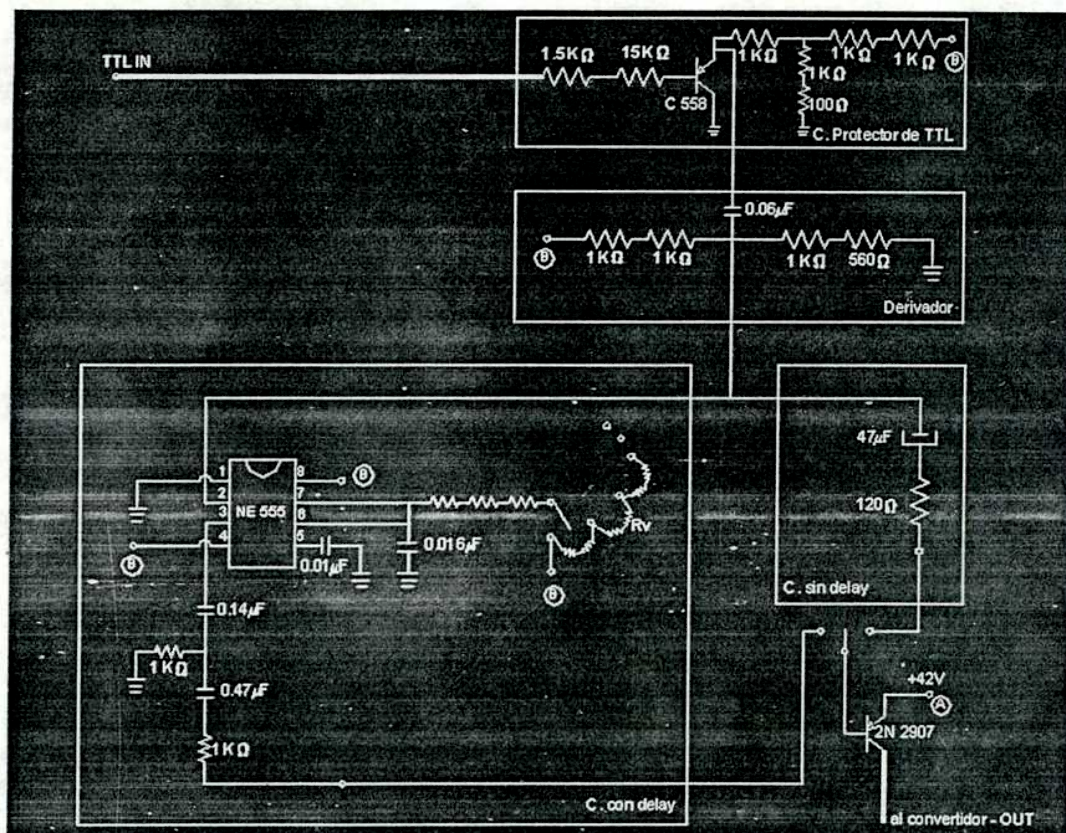


Figura 2-19: Circuito conformador y retrasador del pulso que dispara al CI. La señal de TTL que provee el osciloscopio al detectar el inicio de la descarga atraviesa un circuito protector y es derivada electrónicamente. La señal derivada se utiliza para excitar el circuito que dispara el CI adicionando retrasos (izquierda) o el circuito que simplemente dispara el CI (derecha). El punto denominado A corresponde a una fuente de tensión continua de 42 V, el punto denominado B corresponde a una fuente de tensión continua de 15 V (esta última por ejemplo es utilizada como fuente de alimentación del circuito integrado 555).

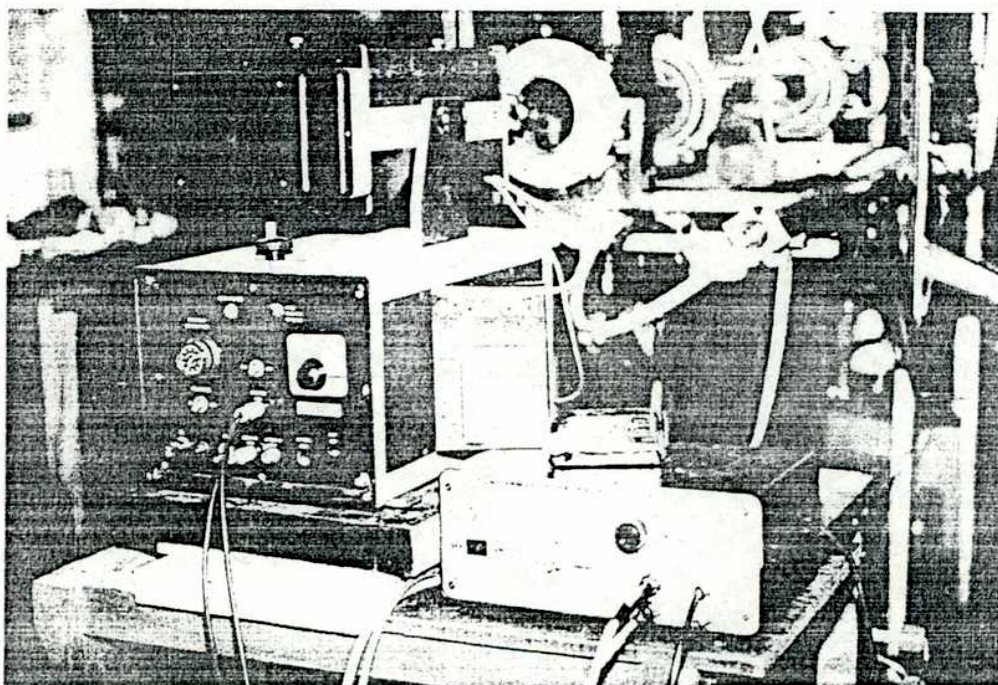


Figura 2-20: Convertidor de imágenes, circuito conformador/retrasador y película Polaroid utilizada en este estudio.

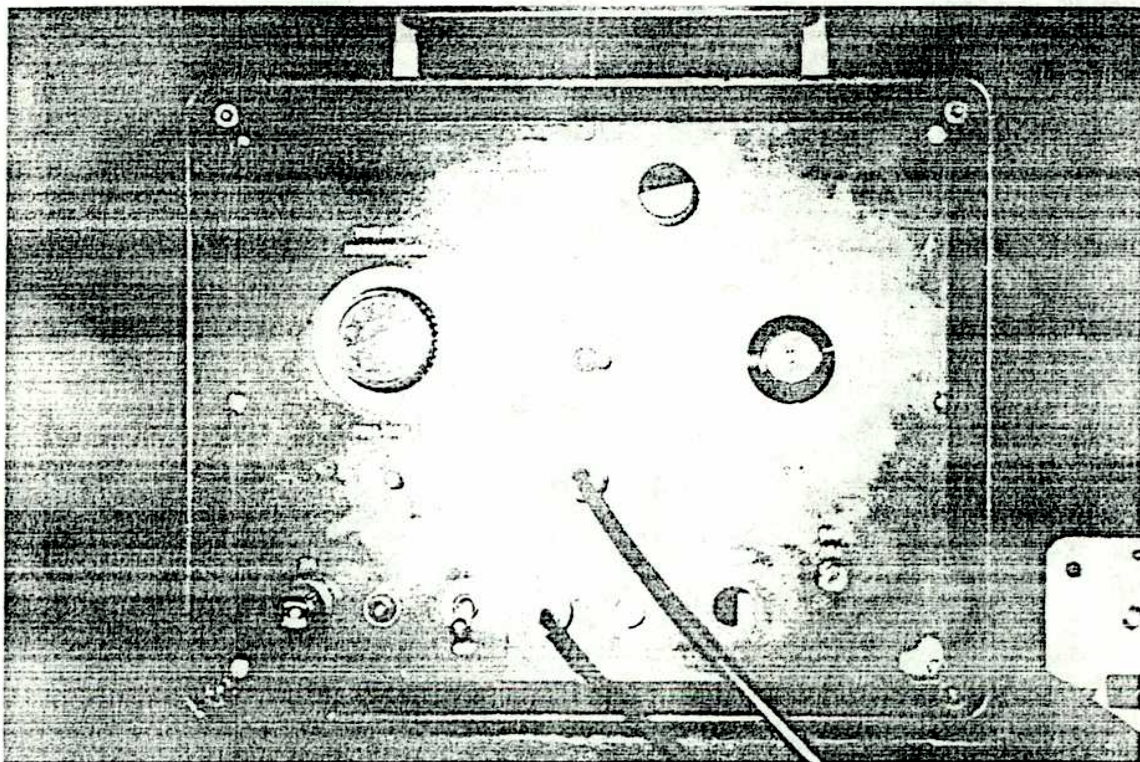


Figura 2-21: Vista del panel posterior de control del CI. Se observa el control de retraso interno y el control de tiempo de exposición.

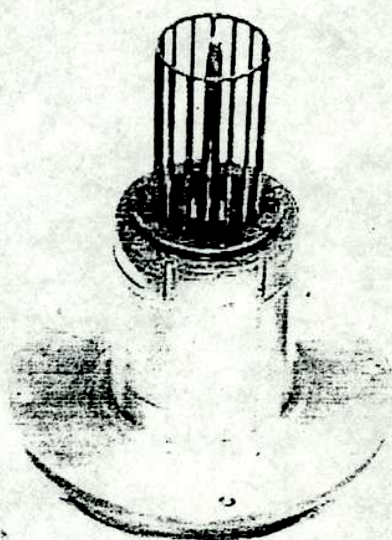


Figura 2-22: Piezas construídas para ubicar el sistema de electrodos o su mitad superior a la altura de la ventana óptica.

Los electrodos, al igual que en el equipo CCII, forman un cañón coaxial donde el cilindro central es un tubo hueco de cobre electrolítico de radio externo $r_{\text{externoA}} = (19.0 \pm 0.5)$ mm, aproximadamente 1.5 mm de espesor, y longitud $l_A = (87.0 \pm 0.5)$ mm. El cilindro externo está formado por 12 barras de bronce (cada una de ellas de radio $r_C = (1.5 \pm 0.1)$ mm) de longitud $l_B = (100.0 \pm 0.5)$ mm, cuyos ejes se encuentran dispuestos en una circunferencia de radio $r_B = (36.0 \pm 0.5)$ mm.

En el extremo libre del cañón las barras se unen a un anillo de bronce que posee un radio medio igual a r_B . Como aislante eléctrico entre ambos electrodos cilíndricos se ubica un tubo cilíndrico de vidrio Pyrex de aproximadamente 35 mm de longitud y un espesor de 4 mm. En la tabla 2-5 se describen los parámetros geométricos descriptos y en la figura 2-24 se muestra con detalle la ubicación de los electrodos y del vidrio aislante dentro de la cámara de descargas para el GN1. En la tabla 2-5 r_{internoA} , r_{externoA} y l_A representan el radio interno, el radio externo y la longitud del electrodo hueco central, en tanto que r_{internoB} , r_{externoB} y l_B representan parámetros análogos para el electrodo barrado externo.

Como se observa en la figura 2-24 los electrodos cilíndricos se ubican dentro de una cámara (también cilíndrica) de descargas de acero inoxidable de aproximadamente 157 mm de longitud, 96 mm de diámetro y 3 mm de espesor. Esta cámara tiene una entrada del tipo NW25 para acceder al sistema de vacío y de provisión de gases.

El sistema de vacío está formado por una bomba mecánica (Varian SD 700) y una bomba difusora de aceite (Varian VHS-6), y permite alcanzar, al ser empleado para vaciar la cámara de descargas mediante las conexiones apropiadas, una presión mínima de 10^{-8} mbar a la entrada de la bomba difusora. Esta presión de base se mide con un manómetro de ionización Varian modelo 563, del tipo Bayard-Alport.

El sistema de provisión de gases está formado por un tubo de gas Deuterio (D_2) de ultra alta pureza, una válvula reguladora de una etapa, un tubo de cobre de $\frac{1}{4}$ de pulgada de diámetro y una válvula de acceso a la cámara de descargas. En la figura 2-23, a la derecha, y en la figura 2-25 se presenta el sistema completo de vacío y provisión de gases

para el equipo GN1.

Las presiones de llenado de la cámara de descargas se encuentran típicamente en el rango 1 – 10 mbar de D_2 y son medidas con un manómetro capacitivo Edwards, modelo Barocel 600AB (con rango de operación 0.1 – 10 mbar).

$r_{internoA}$ (mm)	19.0 ± 0.5
$r_{externoA}$ (mm)	20.5 ± 0.5
l_A (mm)	87.0 ± 0.5
$r_{interno(aislante)}$ (mm)	23.2 ± 0.5
$r_{externo(aislante)}$ (mm)	27.2 ± 0.5
$l_{(aislante)}$ (mm)	35.0 ± 0.5
$r_{internoB}$ (mm)	34.5 ± 0.5
$r_{externoB}$ (cm)	37.5 ± 0.5
l_B (mm)	100.0 ± 0.5

Tabla 2-5 Parámetros de los electrodos del equipo GN1.

2.3.1 Circuito RLC4

El circuito eléctrico externo, RLC4, está formado por un banco de capacitores, una inductancia y una resistencia conectados en serie con la cámara de descargas. El banco de capacitores está formado por 3 módulos de 5 capacitores Maxwell, modelo 31161 (que como se mencionó anteriormente poseen valores nominales de capacidad $C \sim 0.7 \mu F$ x 50 kV y ~ 20 nH de inductancia espúrea), lo cual representa una capacidad total de $C = (10.5 \pm 0.1) \mu F$. Los tres módulos son disparados simultáneamente mediante 3 llaves rápidas gaseosas (o “spark-gaps”) Maxwell, modelo 40065, cuyo rango de operación es 20 – 100 kV. Estas llaves rápidas gaseosas son sincronizadas mediante un único pulso de tensión de disparo (50 – 70 kV de tensión máxima y una duración de $\sim 10 - 100$ ns)

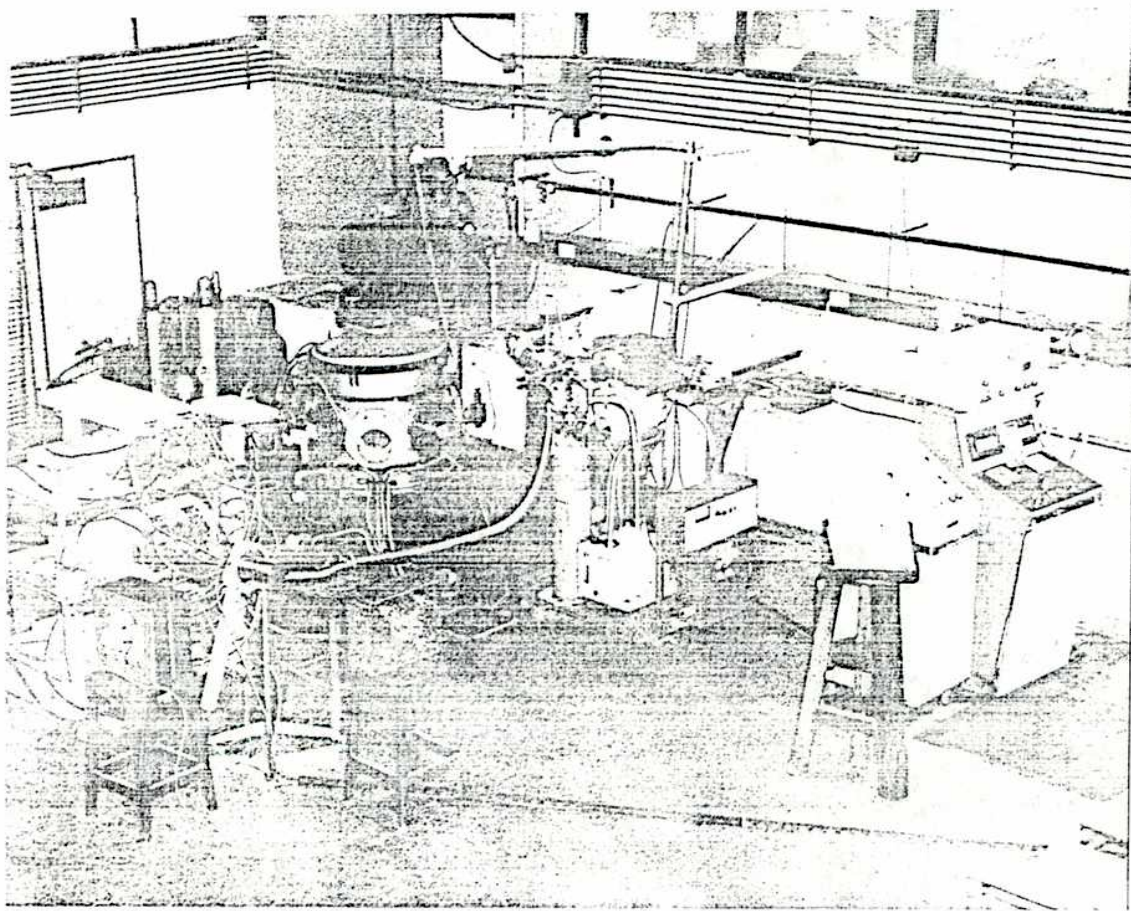
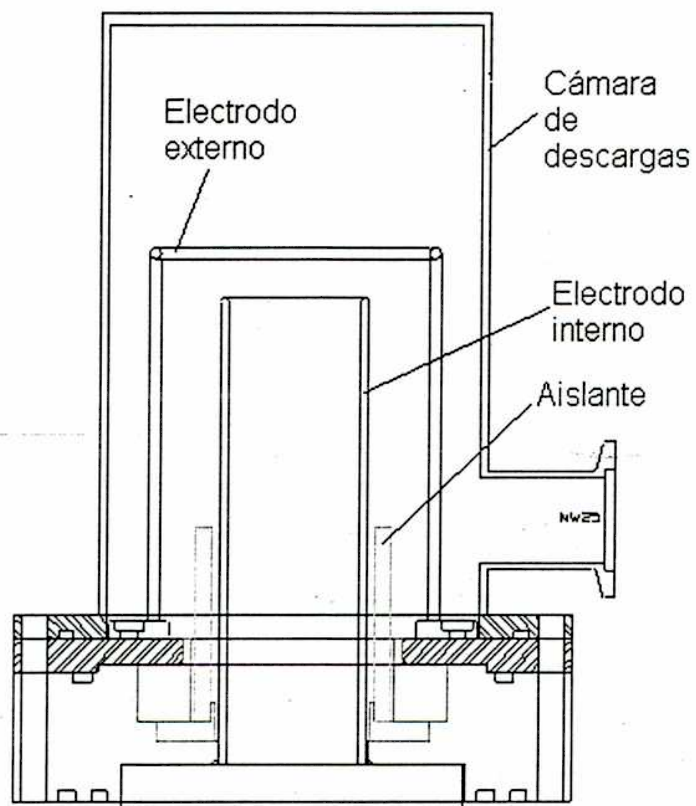


Figura 2-23: Disposición experimental del equipo GN1.



Figura~2-24: Detalle de la cámara de descargas del equipo GN1, su aislante, sus electrodos y su conexión de vacío NW 25.

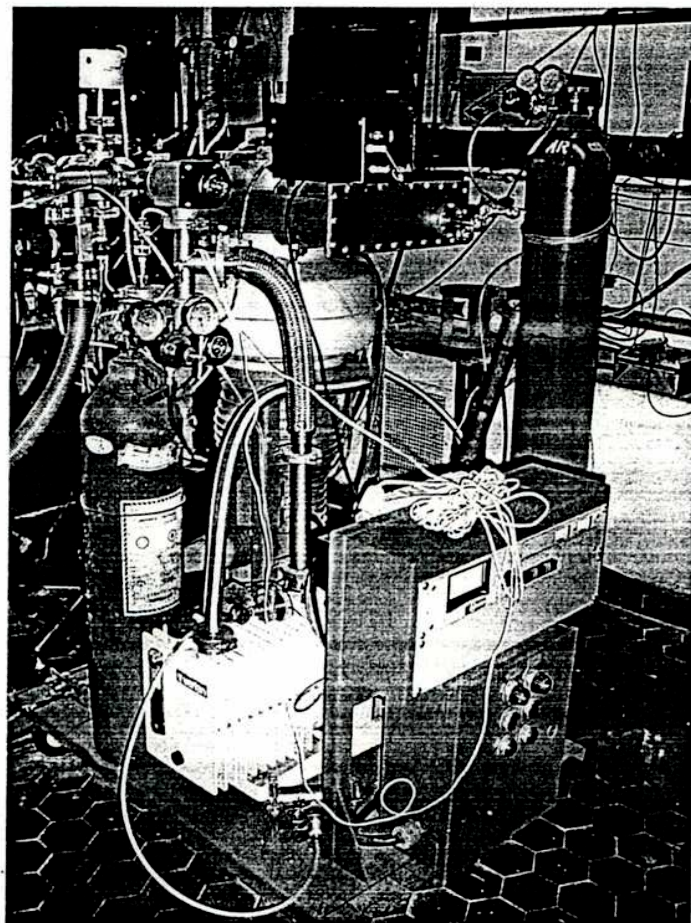


Figura 2-25: Sistema de vacío y provisión de gases para el equipo GN1.

provisto por un circuito auxiliar (basado en una válvula Thyatron) que es controlado por el experimentador.

Entre el banco de capacitores y la fuente de tensión se coloca una resistencia de $470\text{ k}\Omega$ (formada por 47 resistencias comerciales de $10\text{ k}\Omega$, 2 W cada una) para proveer la limitación de corriente que se extrae de la fuente, especialmente en el caso de producirse una descarga espontánea del banco de capacitores. En la configuración utilizada en este estudio el cilindro central (electrodo central de la cámara de descargas) fue siempre el ánodo de la descarga.

La tensión es transportada mediante 15 cables coaxiales (uno por cada capacitor) del tipo RG 213 (de impedancia característica $50\ \Omega$) desde el conjunto de capacitores y llaves rápidas gaseosas hasta la base de los electrodos ubicados en la cámara de descargas.

La inductancia y la resistencia del circuito RLC4 están dadas por la inductancia y la resistencia parásitas del conexionado entre el banco de capacitores y la cámara de descargas, y son $L \sim 40\text{ nH}$ y $R \sim 0.01\ \Omega$.

La señal típica de corriente en función del tiempo, $I(t)$, para el equipo GN1 se muestra en la figura 2-26 (la presión de D_2 a la cual se realizó esta descarga es 7 mbar). Allí puede apreciarse que la corriente máxima provista por este circuito es $\sim 300\text{ kA}$ y que este valor se alcanza a los $\sim 1.2\ \mu\text{s}$ después del inicio de la descarga (la tensión de trabajo en el equipo GN1 con el circuito RLC4 es 30 kV). La tabla 2-6 resume los parámetros eléctricos del circuito RLC4 para el equipo GN1 (C , L y R representan los valores de capacidad, inductancia y resistencia respectivamente, $I_{m\acute{a}x}$ es la intensidad de corriente máxima, y $\tau_{m\acute{a}x}$ es el tiempo que transcurre desde el inicio de la descarga hasta que la intensidad de corriente alcanza su máximo valor). La fuente de tensión empleada en el equipo GN1 se presenta en la figura 2-27.

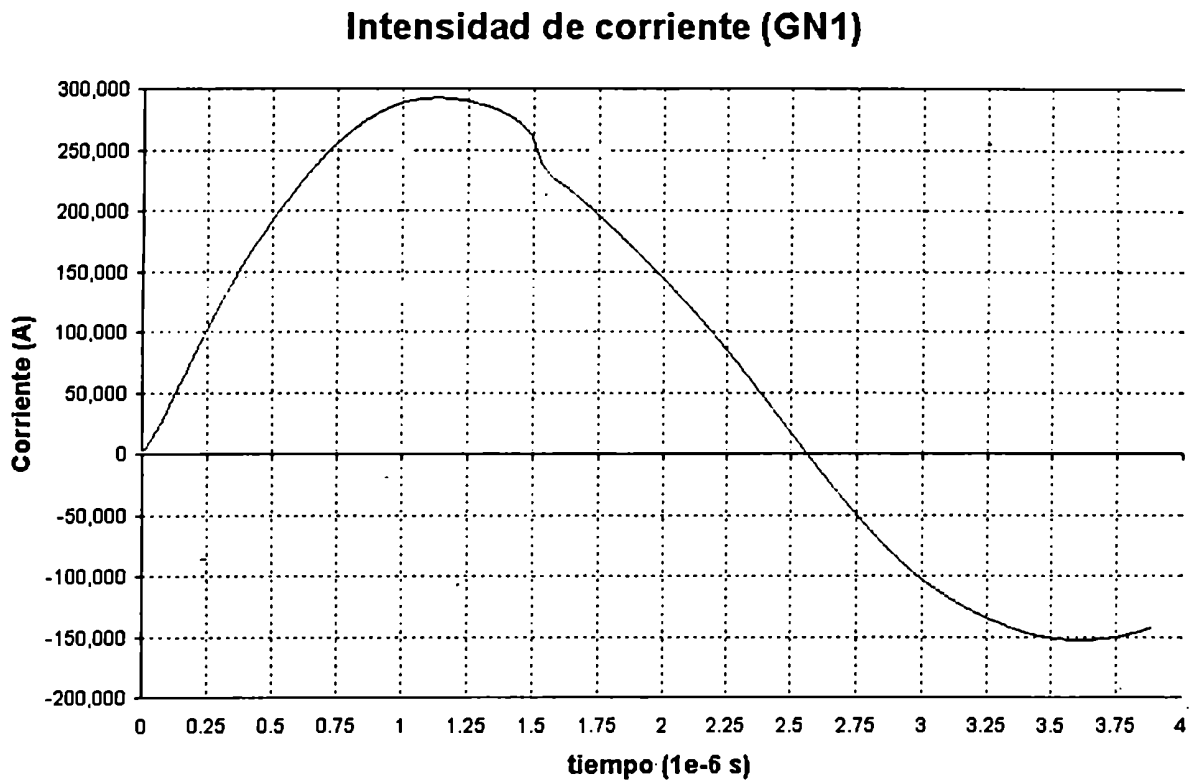


Figura 2-26: Señal típica de corriente para el circuito RLC4 del equipo GN1 (la presión de D_2 empleada fue 7 mbar).

	RLC4
C (μF)	(10.5 ± 0.1)
L (nH)	(40 ± 10)
R (Ω)	(0.010 ± 0.005)
$I_{m\acute{a}x}$ (kA)	(295 ± 5)
$\tau_{m\acute{a}x}$ (μs)	(1.15 ± 0.10)

Tabla 2-6 : Parámetros del circuito RLC4.

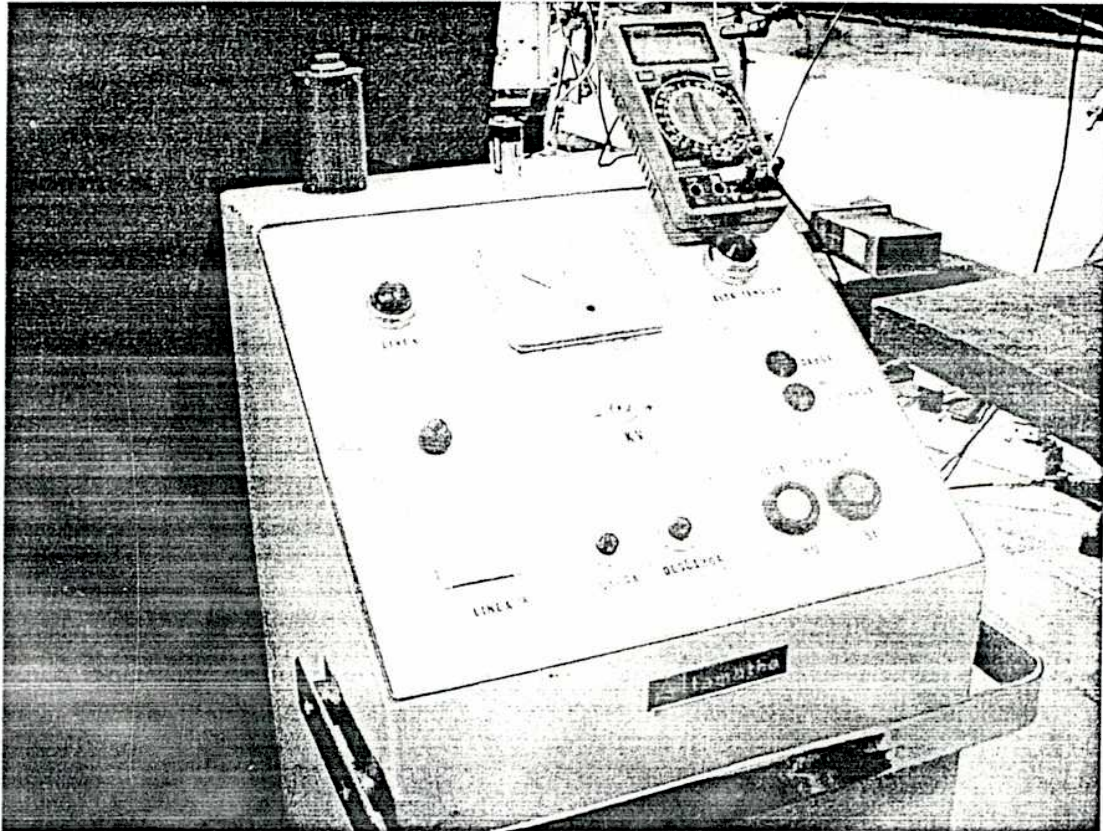


Figura 2-27: Fuente de tensión empleada en el circuito RLC4, en el equipo GN1.

2.4 Diagnósticas empleadas en el equipo GN1

Las diagnósticas empleadas para caracterizar el plasma producido en el equipo GN1 utilizaron los siguientes sensores: bobina de Rogowski, divisor resistivo de tensión, detector de neutrones, fototubo y sistema de obtención de radiografías. Cada uno de ellos se describe en detalle a continuación.

2.4.1 Bobina de Rogowski

Se diseñó y construyó una bobina de Rogowski para el equipo GN1, *ROGGN1*. Sus parámetros constructivos se describen en la tabla 2-7, donde N es el número de espiras de la bobina, L la longitud sobre la cual están distribuidas, a el radio de las espiras y b el radio del conductor de la espira central de retorno, de forma tal que pudiese alojarse en el surco circular de la pieza aislante de la base de los electrodos (diámetro del surco ~ 105 mm, y profundidad del surco ~ 4 mm). Su constante de calibración constructiva [2][3] es:

$$k_{ROGGN1} = \mu_0 \pi \frac{N}{L} (a^2 - b^2) = (4\pi 10^{-7}) \pi \frac{N}{L} (a^2 - b^2) = (7.26 \pm 0.11) 10^{-11} \frac{\text{V.s}}{\text{A}}$$

$$k_{ROGGN1}^{-1} = (1.38 \pm 0.21) 10^{10} \frac{\text{A}}{\text{V.s}}$$

	<i>ROGGN1</i>
$\frac{N}{L} \left(\frac{1}{\text{cm}} \right)$	0.3
a (mm)	0.75 ± 0.01
b (mm)	0.10 ± 0.01
$k_{ROG}^{-1} \left(\frac{\text{A}}{\text{V.s}} \right)$	$(1.38 \pm 0.21) 10^{10}$

Tabla 2-7 Datos geométricos y constante de calibración para la bobina de Rogowski empleada en el equipo GN1.

2.4.2 Divisor resistivo de tensión

En el equipo GN1 se utilizó un divisor resistivo de tensión formado por una cadena de 100 resistencias, cada una de valor nominal $r = (47.0 \pm 4.7) \Omega$ y $\frac{1}{8}$ W, ubicadas en el interior de un tubo cilíndrico de bronce de diámetro $\Phi \sim 50$ mm y longitud $l \sim 700$ mm.

La tensión de salida se toma de la última resistencia de la serie (en paralelo con los 50Ω de impedancia de entrada del osciloscopio digitalizador).

Su calibración se realizó empleando el pulso cuadrado de tensión provisto por un generador de pulsos comercial (Princeton Instruments, modelo FG-100, descrito anteriormente). El factor de calibración obtenido fue:

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = 185 \pm 3$$

Este factor concuerda con el obtenido mediante la expresión que utiliza el cociente de resistencias medidas:

$$\frac{R_{total}}{R_{out}} = \frac{4.56 \text{ k}\Omega}{24.4 \Omega} = 187 \pm 5$$

La cadena de resistencias está aislada eléctricamente por medio de un tubo plástico tipo "Cassucci" de diámetro externo $\Phi \sim 6$ mm y espesor ~ 1 mm.

Los resultados de un análisis sobre su respuesta en frecuencia muestran que el divisor construido resuelve pulsos de tensión de 10 ns de duración sin producir distorsiones apreciables en su perfil $V_{out}(t)$ [4].

Este dispositivo al inicio de la descarga (cuando está conectado al equipo) cumple también con la función adicional de "poner a tierra" el potencial del electrodo central del cañón coaxial en la cámara de descargas.

2.4.3 Detectores de neutrones

Se emplearon tres sistemas detectores de neutrones. Dos de ellos son paralelepípedos de parafina recubiertos con madera para facilitar su manipulación y formados por 4 detectores Geiger-Müller rodeados de una lámina de plata e inmersos en un bloque rectangular de parafina ($\sim 17 \text{ cm} \times 30 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$, con 900 cm^2 de área sensible). En una de sus caras de mayor área son practicados cuatro orificios cilíndricos de ~ 2 cm de diámetro

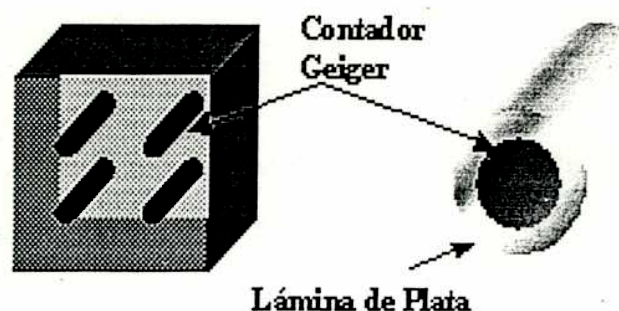


Figura 2-28: Disposición de los tubos Geiger-Müller en el detector de neutrones por plata activada.

y ~ 9 cm de profundidad, en los vértices de un rectángulo imaginario concéntrico con dicha cara (ver figura 2-28). En cada orificio se inserta un contador Geiger (Victoreen 1B85) revestido por una lámina cilíndrica de Ag de 0.3 mm de espesor.

El tercer sistema es similar pero posee solamente 3 detectores Geiger-Müller y no está incluido en parafina (de diámetro $\Phi \sim 10$ cm y longitud $l \sim 35$ cm).

Los dos primeros detectores utilizan el método de detección de neutrones por activación de plata[5] y por lo tanto integran temporalmente la emisión de los neutrones de 2.45 MeV generados en las reacciones de fusión Deuterio - Deuterio que se producen en el foco de plasma característico de los equipos Plasma Focus. El tercero también integra temporalmente la emisión de neutrones pero fue diseñado para ser sensible a neutrones termalizados por la presencia de compuestos hidrogenados en las inmediaciones del detector.

Los detectores se conectan a un escalímetro Alfanuclear, modelo S.T.P. 1500 y pueden medir simultáneamente la presencia de neutrones gracias a un sistema de circuitos integrados analizadores/contadores de pulsos desarrollado en el laboratorio del Instituto de Física del Plasma [13].

La figura 2-23 muestra los dos sistemas de detectores de neutrones por plata activada

rectangulares, en la fotografía ambos detectores se ubicaron a una distancia aproximada de $d \sim 60$ cm del foco de plasma y reciben el flujo neutrónico que produce la descarga con una diferencia angular azimutal de 90° . La figura 2-29 presenta el panel frontal del escalímetro empleado.

La calibración de estos detectores rectangulares se realizó por comparación con la lectura de detectores TLD provistos y analizados por personal de CNEA en 1998. El valor aproximado de calibración obtenido para los detectores rectangulares fue

$$C_n \sim \frac{10^8 \text{ neutrones}}{1000 \text{ cuentas}} \text{ (los neutrones son medidos en } 4\pi \text{ radianes)}$$

Con lo cual el número de neutrones detectados por cada sistema rectangular (cuando se ubican a 60 cm del foco de plasma) durante el tiempo de conteo resulta:

$$Y_n = C_n(N_c - N_f)$$

Donde N_c es el número de cuentas registradas en el escalímetro durante el tiempo de conteo y N_f es el número de cuentas que son debidas a la radiación de fondo (este valor es $N_f = (64 \pm 8)$ cuentas). La tensión de polarización usada en los tubos Geiger-Müller es $V_{polarizac} \sim 800$ V. Lecturas típicas (operando el equipo GN1 con gas D_2) para disparos con buena producción neutrónica caen en el rango 3000 - 3500 cuentas.

2.4.4 Configuración experimental utilizada para la detección de agua

La configuración experimental empleada para la detección del agua se observa en la figura 2-30, en ella se emplea uno de los detectores de neutrones que utiliza el método de plata activada (detector de referencia en la figura citada), y el detector cilíndrico sensible a neutrones termalizados (rotulado detector de neutrones en la figura citada), también introducido en la sección anterior. El detector de referencia se colocó a 90° del eje de simetría de los electrodos y a 60 cm de la cámara de descargas. El detector cilíndrico se ubicó en el eje de simetría de los electrodos y a una distancia de ~ 1.5 m de la cámara de descargas (identificada en la figura 2-30 con el rótulo plasma focus). Los bloques que señalan la presencia de agua representan a 4 bidones de 20 l de agua cada uno que se

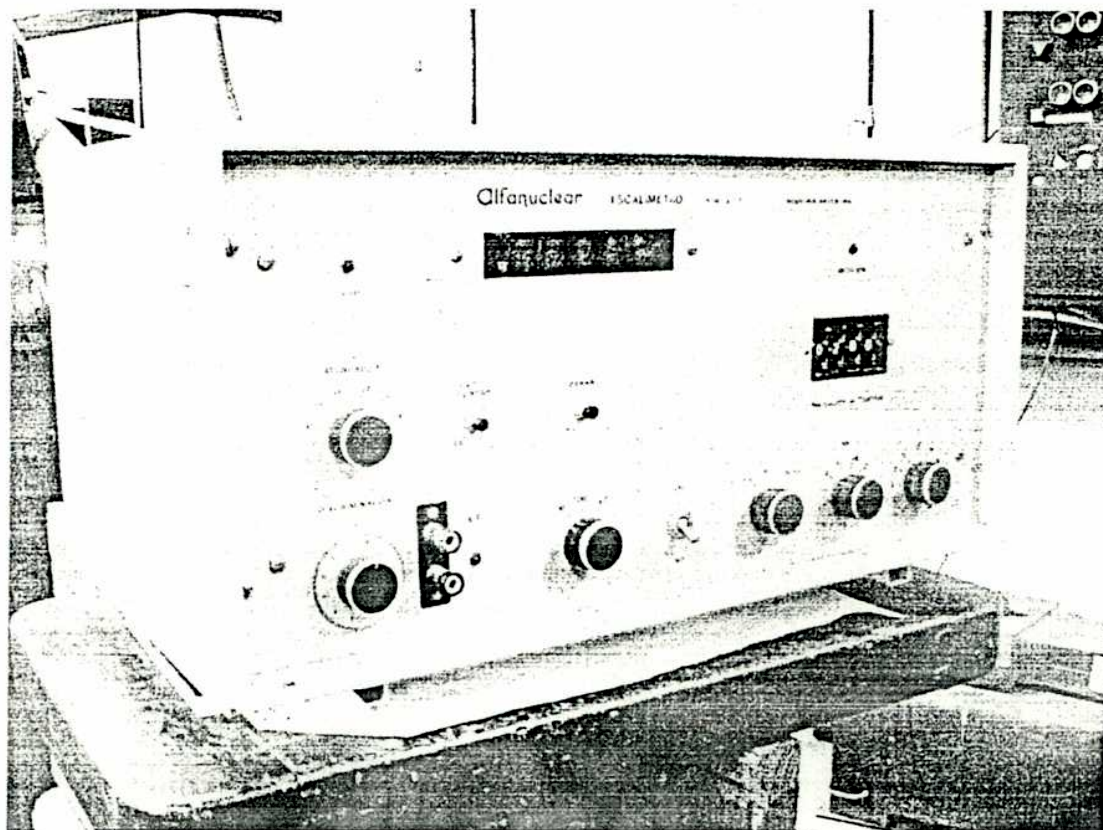


Figura 2-29: Escalímetro empleado para el conteo de pulsos de los detectores de neutrones por activación de plata.

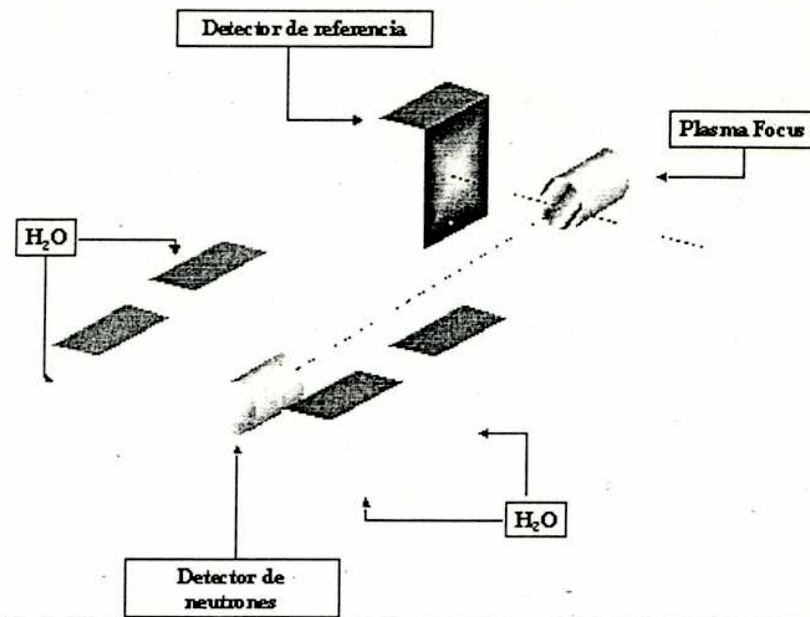


Figura 2-30: Se observa la disposición experimental empleada para la detección de agua con el equipo GN1. El detector de referencia es un detector de 4 tubos Geiger-Muller, el denominado detector de neutrones es un detector de 1 tubo Geiger-Muller.

ubicaron a ambos lados del detector cilíndrico y a una distancia de ~ 0.5 m.

g

2.4.5 Sistema centellador-fotomultiplicador

Se utilizó como detector con resolución temporal de radiación X y neutrónica un sistema formado por un fotomultiplicador (PMT) unido a un cilindro centellador plástico, modelo NE102A (de diámetro $\Phi \sim 50$ mm y longitud $l \sim 50$ mm).

Este sistema PMT/centellador se ubicó a una distancia de $D_{PMT/C} \sim 3.9$ m de la cámara de descargas del equipo GN1. Señales típicas cuando se opera el equipo GN1 con gas D_2 muestran un pico de gran intensidad de radiación X seguido, luego de aproximadamente 150 ns, por un pico menos intenso y más ancho temporalmente característico de la producción neutrónica (donde el retraso manifiesta la diferencia de

tiempos de vuelo entre los fotones y los neutrones emitidos por la descarga, $v_{fotón} \sim 1 \text{ m} / 3 \text{ ns}$ y $v_{neutrón 2.45 \text{ MeV}} \sim 1 \text{ m} / 48 \text{ ns}$). En particular la intensidad del pico de tensión identificado con la radiación X se emplea como un control rápido para determinar si las películas con las que se pretende obtener radiografías han recibido o no la radiación X necesaria para ser reveladas.

2.4.6 Método de obtención de radiografías X

El arreglo experimental empleado se observa en la figura 2-31. Las muestras a ser radiografiadas se ubican en el eje de simetría de los electrodos coaxiales del equipo GN1, y a una distancia aproximada de $d \sim 83 \text{ cm}$ de la región donde focaliza el plasma. Como película radiográfica se empleó la película comercial Curix ST-G2 de AGFA, se utilizaron también las soluciones de revelado y fijado sugeridas por AGFA. Las películas se ubican dentro de una caja plástica Curix de AGFA, la cual contiene dos láminas de un plástico intensificador sensible a la radiación X. Estas láminas, de un espesor aproximado $\sim 300 \mu\text{m}$, contienen fósforo para convertir la radiación X incidente en luz verde e impresionar de este modo la película. La caja plástica que contiene la película se coloca lo más cerca posible del objeto que se desea radiografiar para favorecer la calidad de la imagen final. Entre 1 y 3 descargas son necesarias para obtener una imagen.

2.5 Sistema de adquisición y registro de señales eléctricas

Las señales eléctricas de este estudio se obtuvieron mediante un osciloscopio digitalizador Tektronix 540A de 500 MHz de ancho de banda analógica y 1 Gs/s. El osciloscopio se encuentra ubicado en el interior de una jaula de Faraday (de volumen $Vol \sim 8 \text{ m}^3$). En la figura 2-32 se observa el panel frontal del osciloscopio digitalizador empleado.

La adquisición de las señales digitalizadas en el osciloscopio y su almacenamiento en una PC se realizaron con una interfaz GPIB y empleando el programa GETN.exe (con

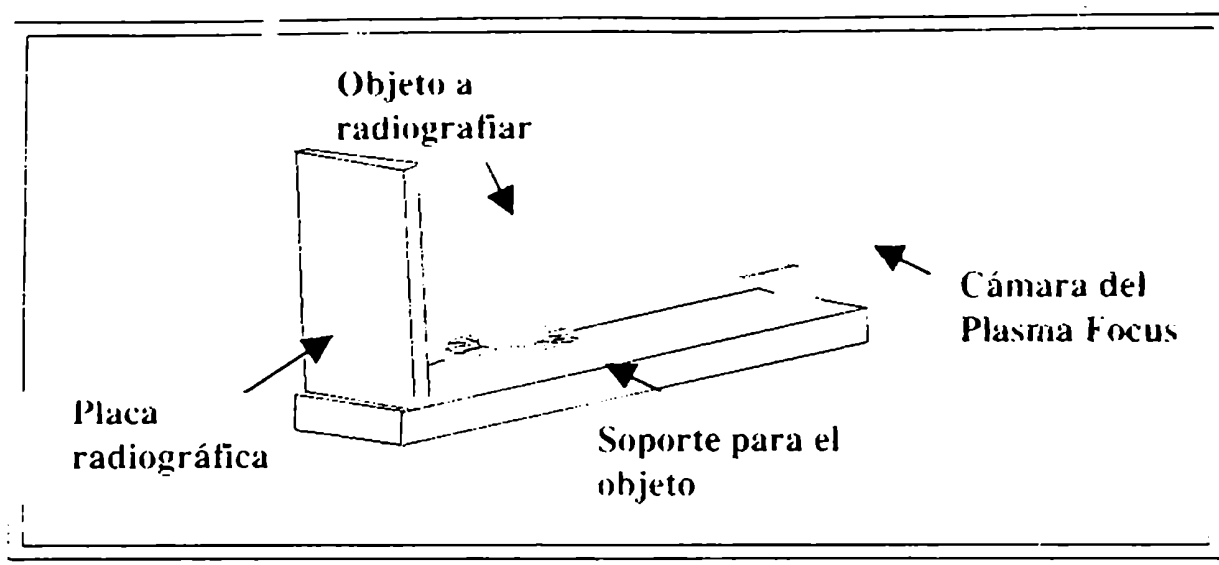


Figura 2-31: Esquema del arreglo experimental utilizado para obtener radiografías empleando el equipo GN1.

código fuente en Powerbasic) desarrollado en el laboratorio.

En la figura 2-33 se muestra un detalle del ingreso de los cables coaxiales provenientes del experimento a la jaula de Faraday. Sus conexiones se realizan de forma que no destruyan la conexidad de la superficie que blindará efectivamente los campos electromagnéticos externos a la jaula de Faraday.

Los cables coaxiales empleados, tanto en el equipo CCII como en el equipo GN1 poseen doble mallado externo para aumentar sustancialmente su capacidad de blindar señales electromagnéticas espúreas (producidas, por ejemplo, durante una focalización particularmente brusca de plasma).

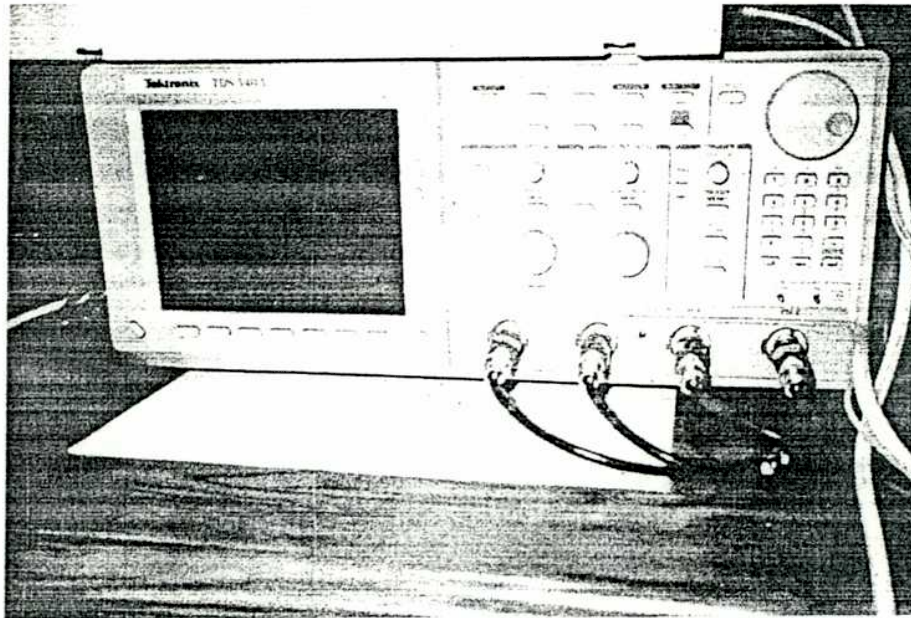


Figura 2-32: Osciloscopio digitalizador utilizado para la detección y registro de todas las señales eléctricas.

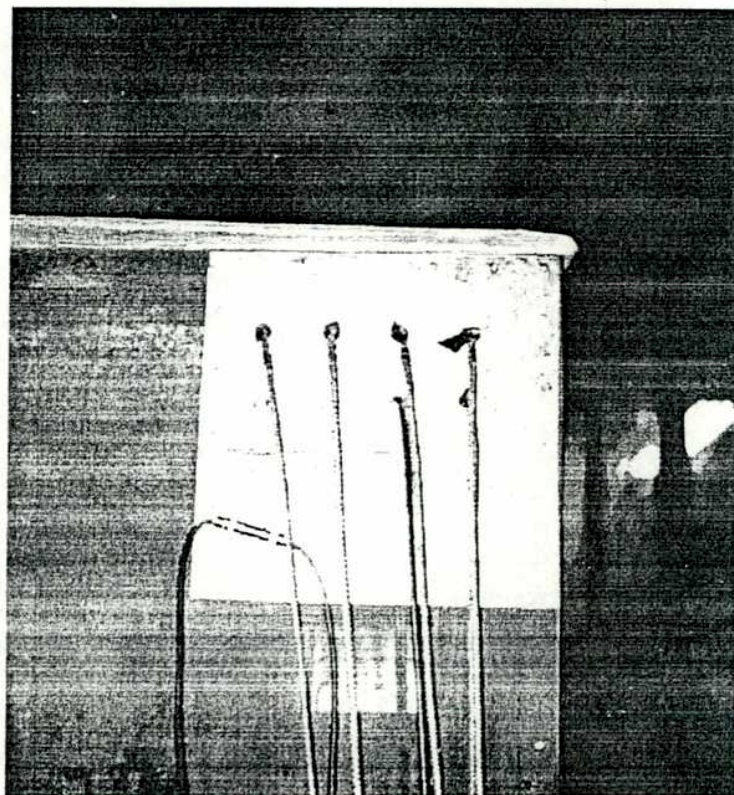


Figura 2-33: Detalle de la entrada de los cables coaxiales que transportan las señales medidas a la jaula de Faraday.

Capítulo 3

Resultados Experimentales

Una parte importante del estudio realizado en la presente tesis consistió en inferir la cinemática de la lámina de corriente (LC) que se forma entre los electrodos para distintas condiciones impuestas a la descarga. Los parámetros de la descarga que se variaron para obtener las curvas de cinemática fueron los siguientes: presión del gas en la cámara de descargas, tipo de gas, material del electrodo central de la descarga, y presencia o no del electrodo externo barrado. Las curvas de las correspondientes cinemáticas brindan una imagen confiable del comportamiento promedio de la LC en su tránsito a lo largo del cañón coaxial desde su base hasta su extremo abierto.

Otra parte de este estudio lo forman las fotografías ultrarrápidas de la LC obtenidas con el convertidor de imágenes presentado anteriormente. Éstas fueron tomadas en paralelo con los registros de las señales eléctricas destinadas a construir las cinemáticas y muestran interesantes características de la morfología de la LC y de cómo varía ésta con los parámetros mencionados.

Una breve reseña de cómo se construyeron las curvas de las cinemáticas de la lámina a partir de las señales de las sondas magnéticas se describe en la primera sección de este capítulo.

La segunda sección del capítulo expone los resultados obtenidos para el equipo CCII en sus tres configuraciones energéticas (de energía creciente). Para ello se presenta en

cada caso:

- un gráfico que ilustra simultáneamente una señal típica de sonda magnética y la correspondiente señal de la corriente eléctrica del circuito,
- las curvas de cinemática de la LC obtenidas, y
- las fotografías ultrarrápidas de la LC.

La tercera sección del capítulo contiene los resultados que caracterizan al equipo GN1. Los resultados que se muestran son:

- el número de neutrones producidos en función de la presión del gas (D_2) presente en la cámara de descargas, y
- la curva de los tiempos en los que se produce el foco de plasma, también en función de la presión del gas de trabajo (D_2).

Si bien se construyeron tres pares de sondas magnéticas (de diámetros 6, 4 y 3 mm cada uno) las mediciones presentadas en esta tesis corresponden en su totalidad al par de sondas de diámetro ~ 6 mm. Esto se debe principalmente a que no se observó diferencias significativas entre las curvas registradas por los otros dos pares de sondas y las que fueron finalmente utilizadas, y a la fragilidad que presentaban las sondas de diámetros menores.

3.1 Construcción de la cinemática de una lámina de corriente

Como se mencionó en el capítulo anterior, el par de sondas magnéticas es introducido sistemáticamente a distintas distancias de la base del cañón coaxial y en la posición radial media entre los electrodos. Las sondas proveen señales eléctricas proporcionales a la derivada temporal total del campo magnético en la posición de la bobina sensora de

cada sonda. Algunas de estas señales (para distintas posiciones Z , tal como se describe en el capítulo anterior) junto con la señal de la bobina de Rogowski, que mide la derivada temporal de la corriente eléctrica del circuito, se muestran en la figura 3-1.

En esta figura puede observarse que es posible, convencionalmente, identificar el pasaje de la LC por la posición de la bobina sensora con el pico de la señal de la sonda magnética y también que, tomando como origen de tiempo al instante en el que la señal de la bobina de Rogowski crece abruptamente (inicio de la descarga, $t = 0$ s), es posible asignar una duración temporal al tránsito de la LC desde su formación hasta que alcanza la posición de la bobina sensora.

Esta determinación del tiempo de arribo de la LC a la posición de la bobina sensora de la sonda se realiza para ambas sondas. En todas las mediciones que se presentan en este estudio ambas sondas se desplazaron juntas en la dirección del eje de simetría de los electrodos ubicándose en cada caso en la misma posición Z . Los dos valores obtenidos se promedian y se obtiene así el tiempo medio de arribo de la LC a esa posición para una descarga. Para obtener un valor representativo y confiable de este tiempo medio de arribo se realizan 10 descargas consecutivas manteniendo las sondas exactamente en la misma posición, y manteniendo también todos los demás parámetros experimentales fijos, se promedian sus tiempos medios y se calcula su dispersión estándar.

El tiempo obtenido del promedio mencionado se asigna a la posición en la que se ubicaron las bobinas sensoras de las sondas magnéticas (por ejemplo $Z = (5.0 \pm 0.1)$ cm) para construir la curva de la cinemática de LC. La dispersión estándar del promedio se asigna como su incerteza. La figura 3-2 muestra un gráfico de los tiempos medios de cada sonda en función de las posiciones de la bobina sensora de la sonda magnética para varias descargas sucesivas sin efectuar ningún promedio con el propósito de mostrar al lector la variabilidad típica del fenómeno. Los tiempos corresponden a señales de sondas magnéticas obtenidas para 0.5 y para 5 mbar de gas N_2 en una configuración que utiliza el circuito eléctrico externo RLC3.

Señales de Rogowski y de sondas magnéticas ($P_o = 1$ mbar N_2)

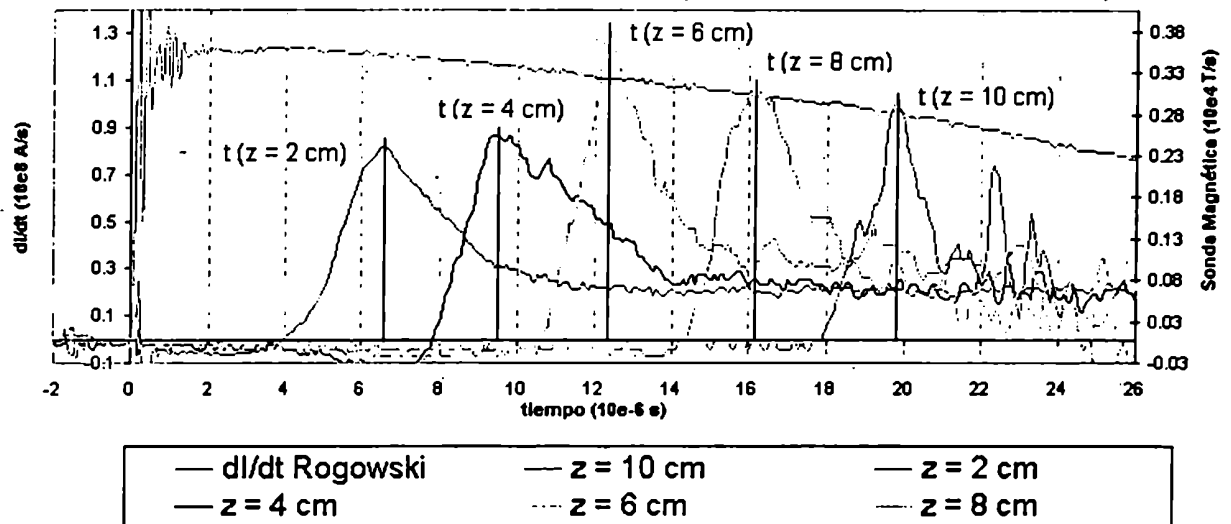


Figura 3-1: Señales de la bobina de Rogowski y de sondas magnéticas ubicadas a distintas distancias Z medidas desde el extremo cerrado del cañón coaxial. Estas señales se obtuvieron para una configuración experimental que empleaba el circuito eléctrico externo RLC2.

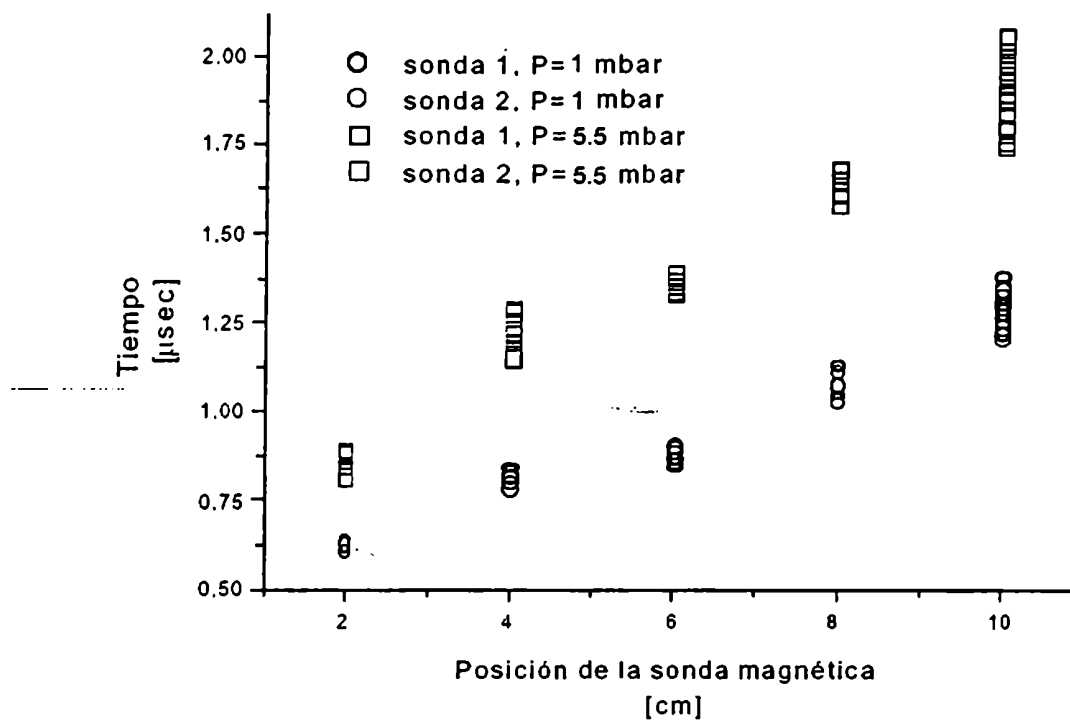


Figura 3-2: Se muestran los tiempos de arribo de la LC a la posición de las bobinas sensoras de las sondas sin promediar para ilustrar la variabilidad del fenómeno.

3.2 Equipo CCII

El equipo CCII es básicamente un banco de pruebas de sistemas de descargas coaxiales. Como tal, dado su fin casi exclusivamente académico, presenta al experimentador la posibilidad de explorar el comportamiento de un sistema de descargas variando una serie de parámetros con relativa facilidad. Permite, además, ensayar distintos tipos de diagnósticas del plasma (eléctricas, ópticas, magnéticas, etc.) dada la versatilidad de su cámara de descargas. El término diagnóstica de plasma se emplea para nombrar típicamente a un instrumento y su método de medición si ambos permiten caracterizar al plasma determinando alguno de los parámetros mencionados. Esta capacidad de exploración que ofrece el equipo CCII se utilizó para producir los resultados que se muestran a continuación.

3.2.1 Circuito RLC1

Señales eléctricas

La figura 3-3 muestra una señal típica de sonda magnética, obtenida con la sonda S_1 cuando su bobina sensora se ubicaba en $Z = (5.0 \pm 0.1)$ cm y los electrodos se encontraban inmersos en una atmósfera de 1 mbar de N_2 . Se observa también la curva de la corriente eléctrica $I(t)$ correspondiente.

Cinemática de la lámina de corriente

La figura 3-4 presenta la cinemática de la LC obtenida para una configuración en la cual se emplea un electrodo central de titanio (polarizado como cátodo de la descarga), un electrodo barrado externo, nitrógeno y el circuito RLC1 (RLC1 Ti-N₂CE).

La figura 3-5 muestra la cinemática de la LC obtenida para una configuración que difiere de la anterior en que el electrodo central de titanio se polariza como ánodo de la descarga (RLC1 Ti+N₂CE).

Señales típicas de corriente y sonda magnética (1 mbar N₂, z = 5 cm) para CCII RLC1

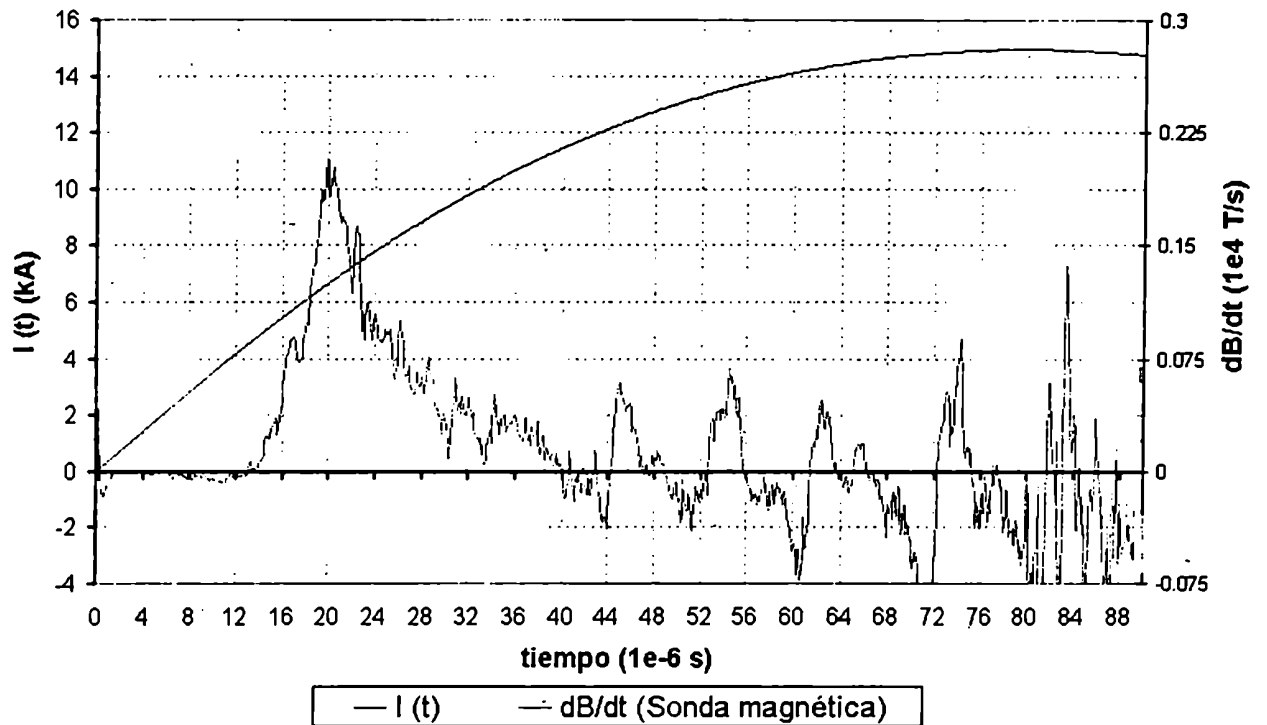


Figura 3-3: Señales típicas de sonda magnética y de corriente para el circuito RLC1 y el equipo CCII. El patrón de picos y valles que se observa en la señal está probablemente relacionado con procesos de eyección de masa que se producen en el extremo libre del electrodo central al arribar la lámina de corriente a esta posición.

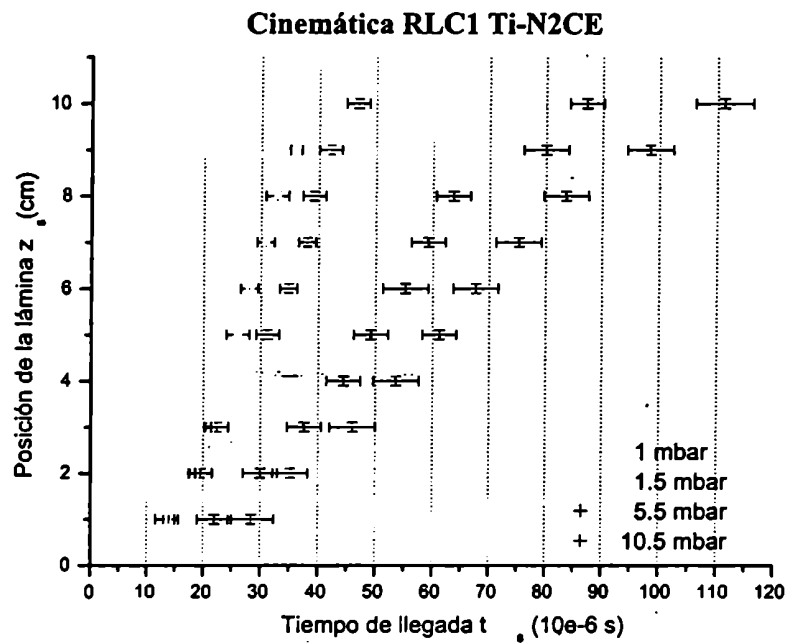


Figura 3-4: Cinemática de la LC para una configuración con electrodo central de titanio (cátodo) y electrodo externo barrado. Se emplea nitrógeno y el circuito RLC1.

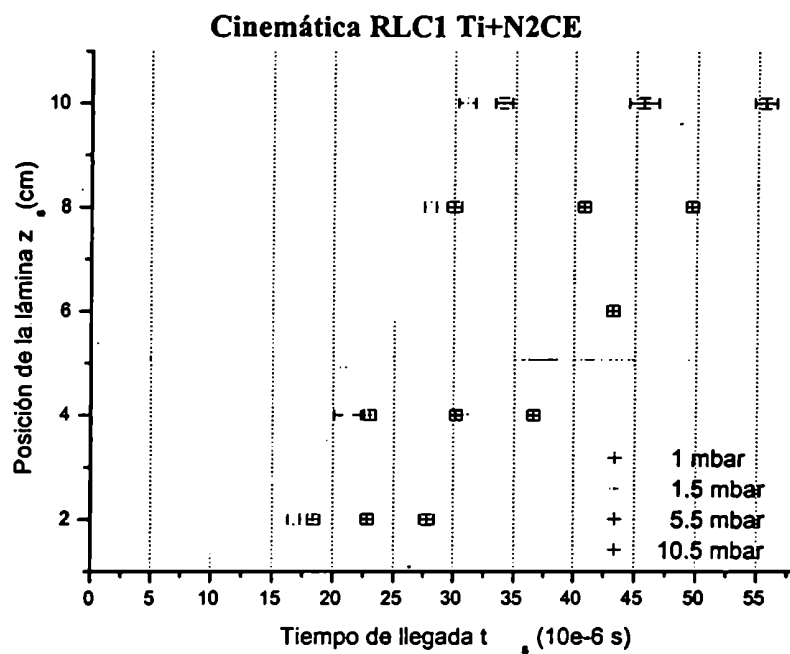


Figura 3-5: Cinemática de la LC para una configuración con electrodo central de titanio (ánodo) y electrodo externo barrado. Se emplea nitrógeno y el circuito RLC1.

Fotografías ultrarrápidas

En la figura 3-6 se observa el marcado contraste en la forma de la LC que origina el cambio de polaridad de los electrodos. Las fotografías 1, 2 y 3 corresponden a descargas donde el electrodo central es el cátodo y las fotografías 4, 5 y 6 corresponden a descargas donde el electrodo central es el ánodo. La configuración empleada es la mencionada al presentar las curvas de cinemáticas. Las presiones de nitrógeno utilizadas son 1 mbar (fotografías 4 y 6), 1.5 mbar (fotografía 5) y 5.5 mbar (fotografías 1, 2 y 3).

3.2.2 Circuito RLC2

Señales eléctricas

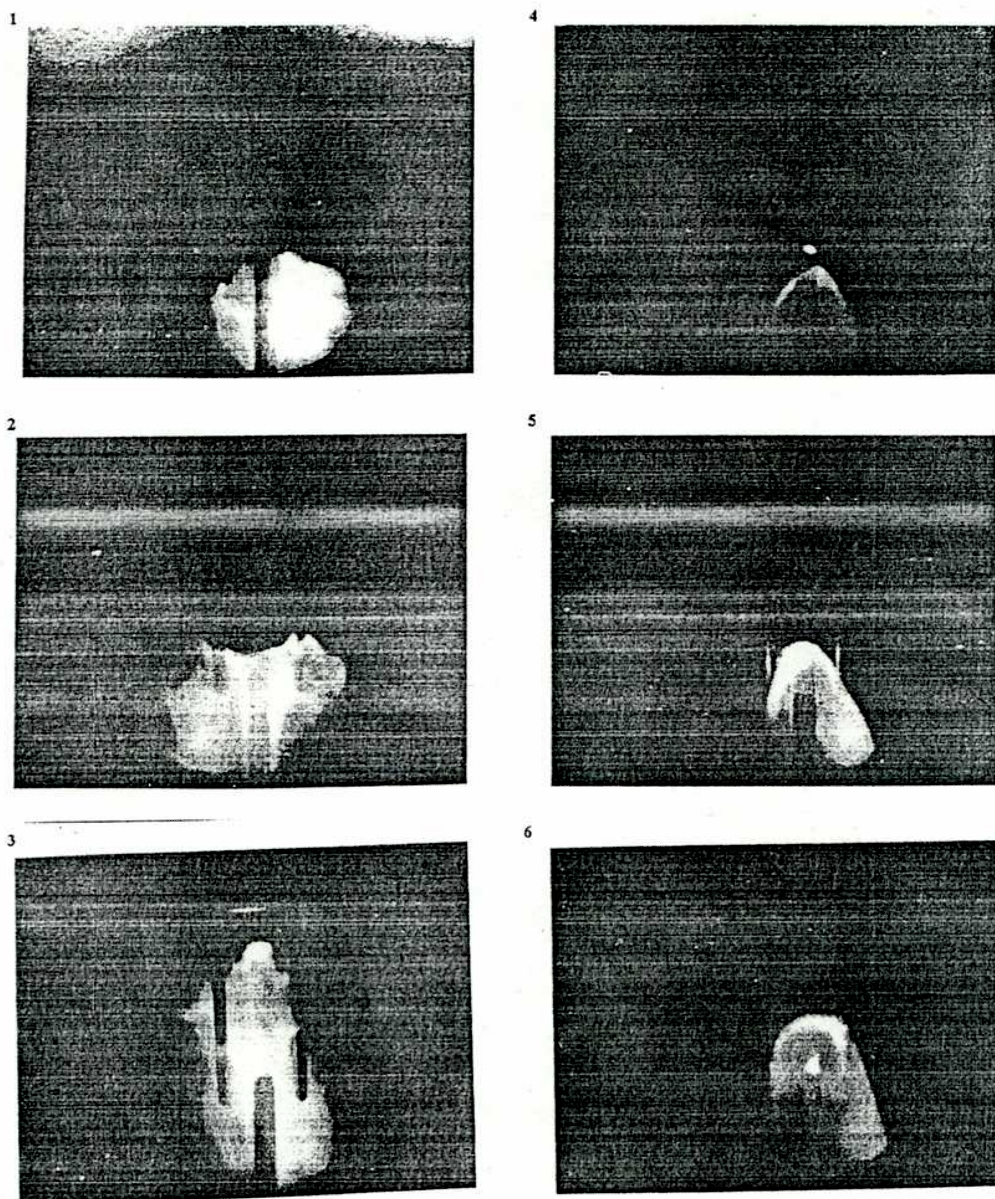
La figura 3-7 muestra una señal típica de sonda magnética, obtenida con la sonda S1 cuando su bobina sensora se ubicaba en $Z = (6.0 \pm 0.1)$ cm y los electrodos se encontraban inmersos en una atmósfera de 1 mbar de N_2 . Se observa también la curva de la corriente eléctrica $I(t)$ correspondiente.

Cinemática de la lámina de corriente

La figura 3-8 presenta la cinemática de la LC obtenida para una configuración en la cual se emplea un electrodo central de titanio (polarizado como cátodo de la descarga), el electrodo barrado externo, gas nitrógeno y el circuito RLC2 (RLC2 Ti-N₂CE). La figura 3-9 muestra la cinemática de la LC para una configuración que se diferencia de la anterior en que el electrodo central es el ánodo de la descarga (RLC2 Ti+N₂CE).

Las figuras 3-10 y 3-11 representan la cinemática de la LC cuando se retira el electrodo barrado externo para una configuración en la cual el electrodo central de titanio es el cátodo o el ánodo de la descarga respectivamente. El gas utilizado es nitrógeno y el circuito empleado es RLC2 ((RLC2 Ti-N₂SE y RLC2 Ti+N₂SE respectivamente).

La figura 3-12 muestra la cinemática de la LC para una configuración en la cual se emplea cobre como electrodo central (polarizado como cátodo de la descarga), el



Figura~3-6: Fotografías de la lámina de corriente con cátodo central (1, 2 y 3) y con ánodo central (4, 5 y 6). Se empleó una configuración que utiliza el circuito eléctrico externo RLC1, nitrógeno y ausencia del electrodo barrado externo.

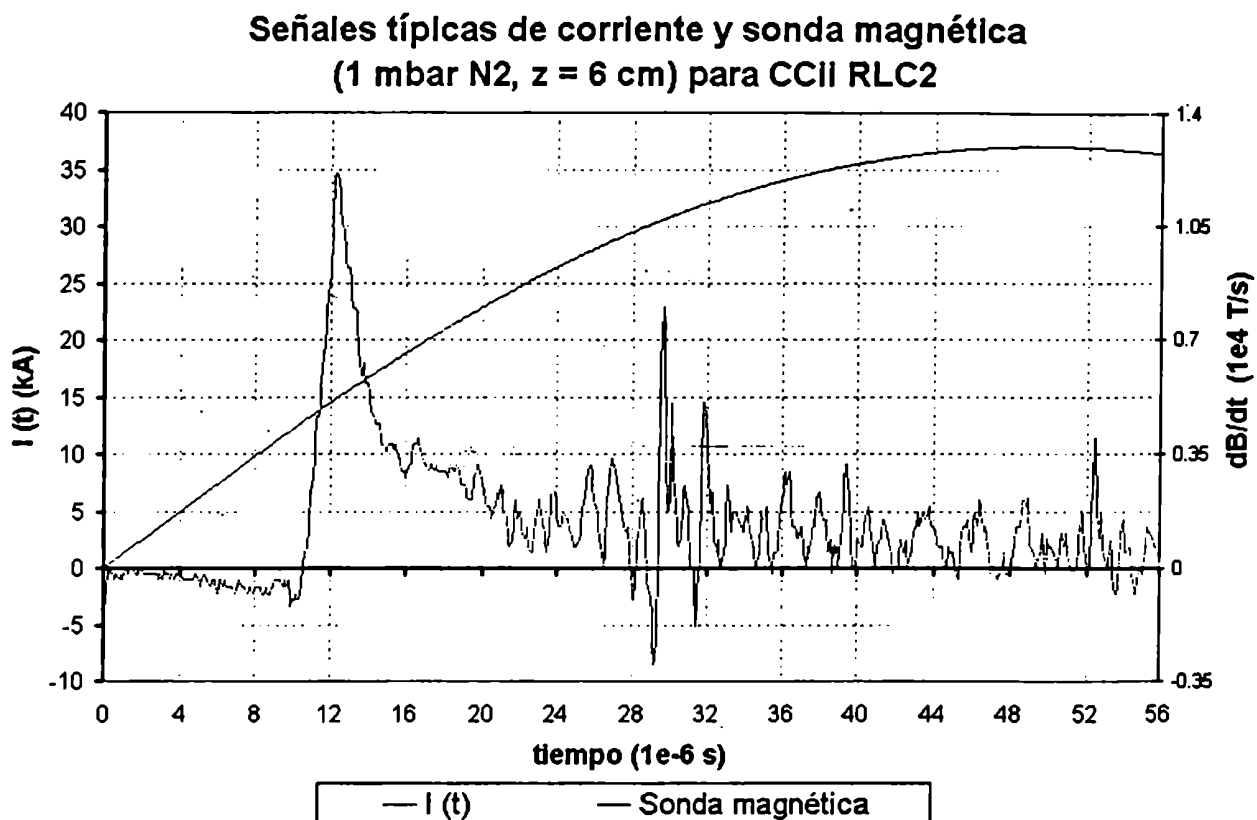


Figura 3-7: Señales típicas de sonda magnética y de corriente para el circuito RLC2 y el equipo CCII.

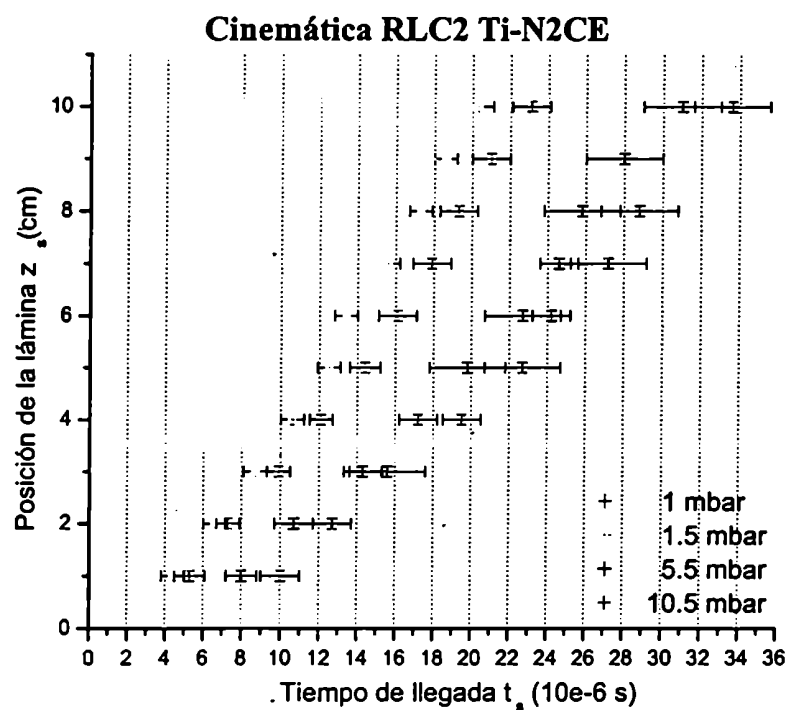


Figura 3-8: Cinemática de la LC para una configuración con electrodo central de titanio (cátodo) y electrodo externo barrado. Se emplea nitrógeno y el circuito RLC2.

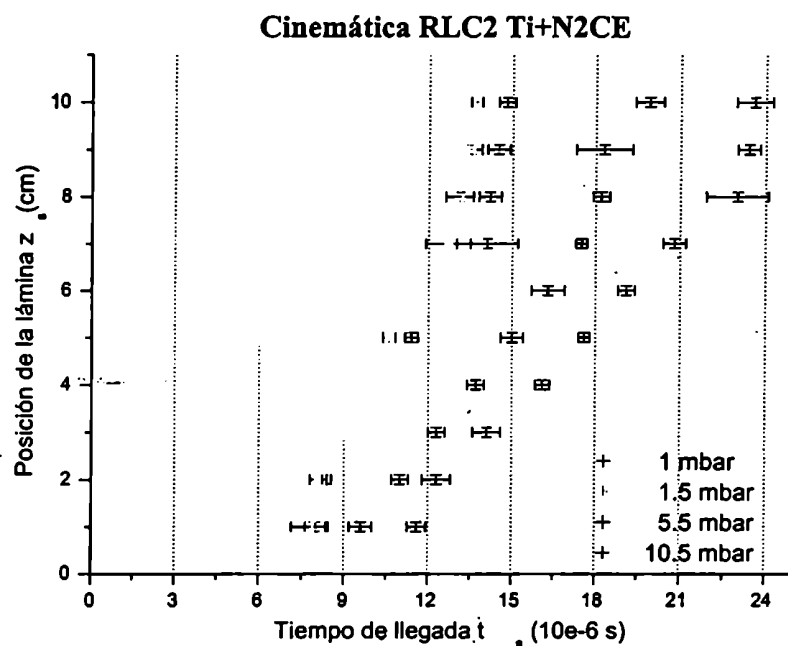


Figura 3-9: Cinemática de la LC para una configuración con electrodo central de titanio (ánodo) y electrodo externo barrado. Se emplea nitrógeno y el circuito RLC2.

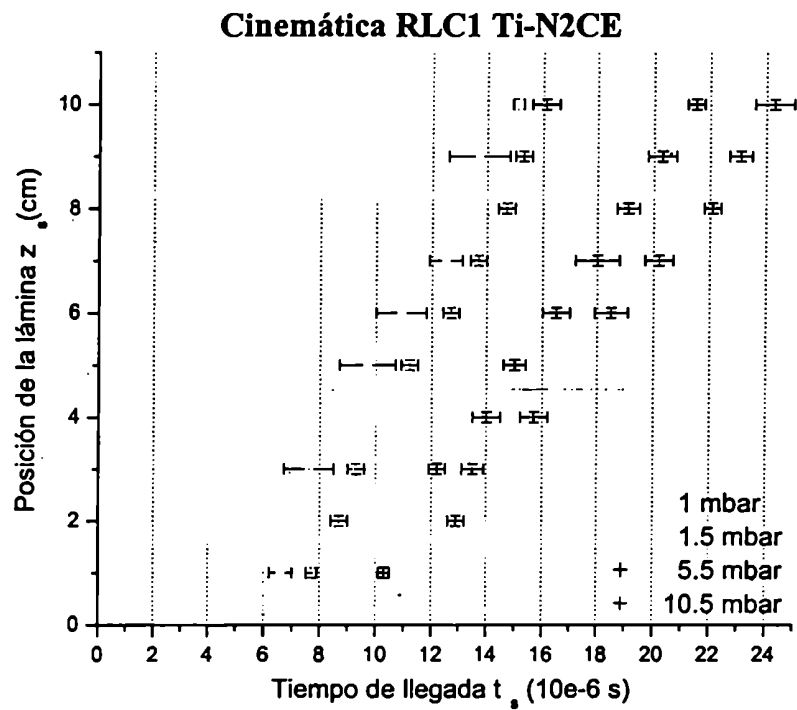


Figura 3-10: Cinemática de la LC para una configuración con electrodo central de titanio (cátodo) y sin el electrodo externo barrado. Se emplea nitrógeno y el circuito RLC2.

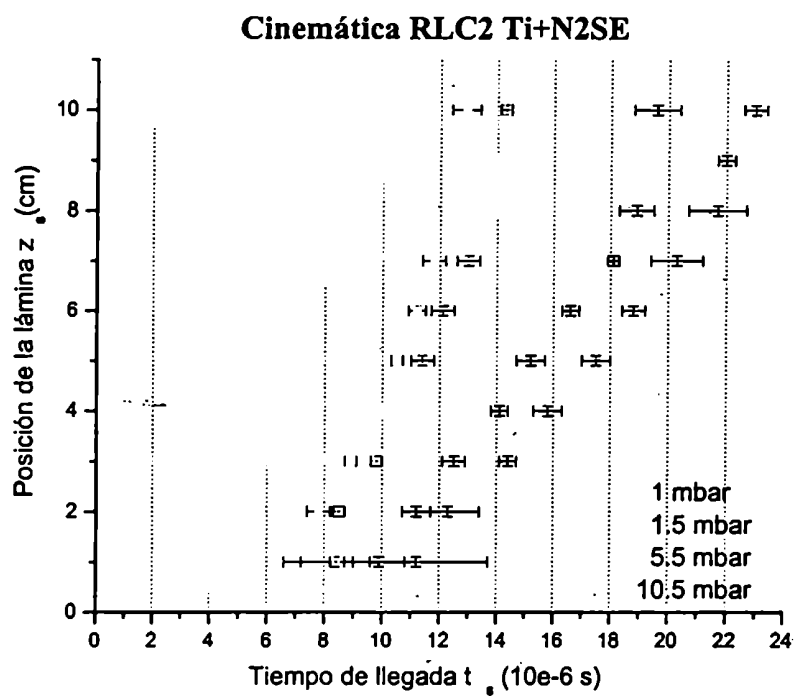


Figura 3-11: Cinemática de la LC para una configuración con electrodo central de titanio (ánodo) y sin el electrodo externo barrado. Se emplea nitrógeno y el circuito RLC2.

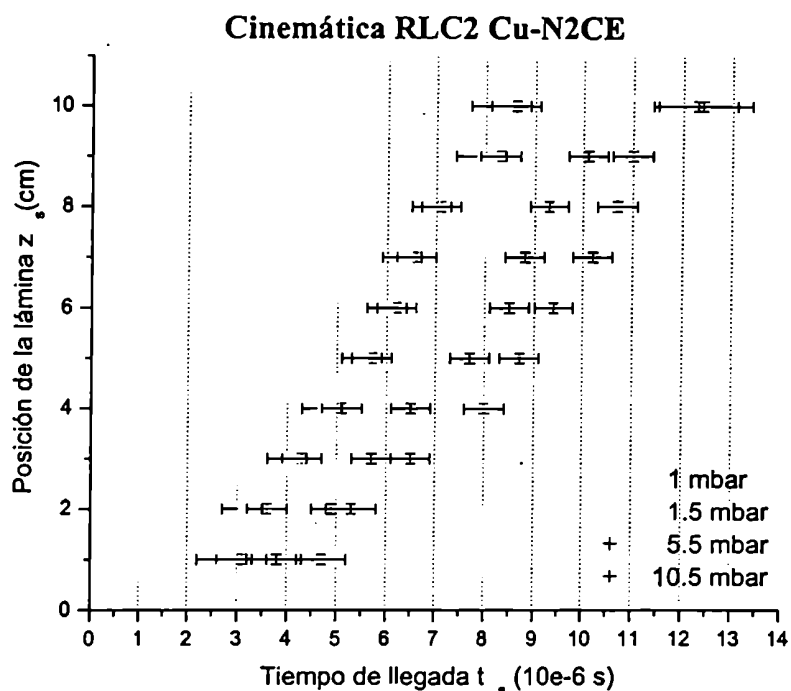


Figura 3-12: Cinemática de la LC para una configuración con electrodo central de cobre (cátodo) y con el electrodo externo barrado. Se emplea nitrógeno y el circuito RLC2.

electrodo barrado externo, gas nitrógeno y el circuito RLC2 (RLC2 Cu-N₂CE). La figura 3-13 presenta la cinemática de la LC para una configuración en la que se utiliza titanio como electrodo central (polarizado como ánodo de la descarga), el electrodo barrado externo, gas argón, y el circuito RLC2 (RLC2 Ti+ArCE).

Fotografías

En la figura 3-14 se observa nuevamente el marcado contraste en la forma de la LC que origina el cambio de polaridad de los electrodos. Las fotografías 1, 2 y 3 corresponden a descargas donde el electrodo central es el cátodo y las fotografías 4, 5 y 6 corresponden a descargas donde el electrodo central es el ánodo. La configuración empleada es la

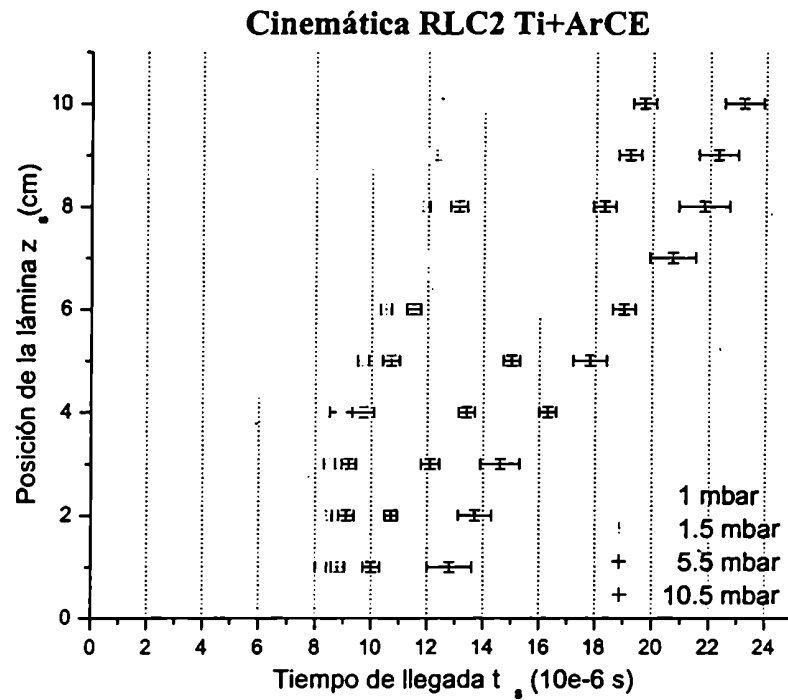


Figura 3-13: Cinemática de la LC para una configuración con electrodo central de titanio (ánodo) y sin el electrodo externo barrado. Se emplea argón y el circuito RLC2.

mencionada al presentar las curvas de cinemáticas. Las presiones de nitrógeno utilizadas son 1 mbar (fotografías 1, 2, 3 y 4), 5.5 mbar (fotografía 5) y 10.5 mbar (fotografía 6).

La figura 3-15 muestra en 4 fotografías la evolución de la LC y su interacción con la pluma de plasma que se observa en el extremo superior del electrodo central. Las fotografías 1 y 3 corresponden a una presión de 5.5 mbar de N_2 y fueron obtenidas a $20.2 \mu s$ y $21 \mu s$ respectivamente, mientras que las fotografías 2 y 4 corresponden a una presión de 1 mbar de N_2 y fueron obtenidas a $16 \mu s$ y $16.6 \mu s$ respectivamente.

La figura 3-16 presenta la evidencia de puntos calientes catódicos (o “hot-spots”) en la cara lateral del electrodo central para 1.5 mbar (fotografía 2) y para 5.5 mbar (fotografía 1) de nitrógeno para una configuración con el electrodo central de titanio polarizado como cátodo de la descarga. En la fotografía 1 la lámina acaba de pasar por la zona de observación y en la fotografía 2 la LC está atravesando la zona de observación. La fotografía 3 muestra un detalle de la interacción entre la LC y el electrodo central para una presión de 1 mbar de N_2 . En las tres fotografías de la figura 3-16 el electrodo central es el cátodo de la descarga.

3.2.3 Circuito RLC3

Señales eléctricas

La figura 3-17 muestra una señal típica de sonda magnética, obtenida con la sonda S1 cuando su bobina sensora se ubicaba en $Z = (5.0 \pm 0.1)$ cm y los electrodos se encontraban inmersos en una atmósfera de 0.5 mbar de N_2 . Se observa también la curva de la corriente eléctrica $I(t)$ correspondiente (circuito RLC3).

Cinemática de la lámina de corriente

La figura 3-18 presenta la cinemática de la LC obtenida para una configuración en la cual se emplea un electrodo central de titanio polarizado como ánodo de la descarga, el electrodo barrado externo, gas hidrógeno y el circuito RLC3 (RLC3 Ti-H₂CE). La

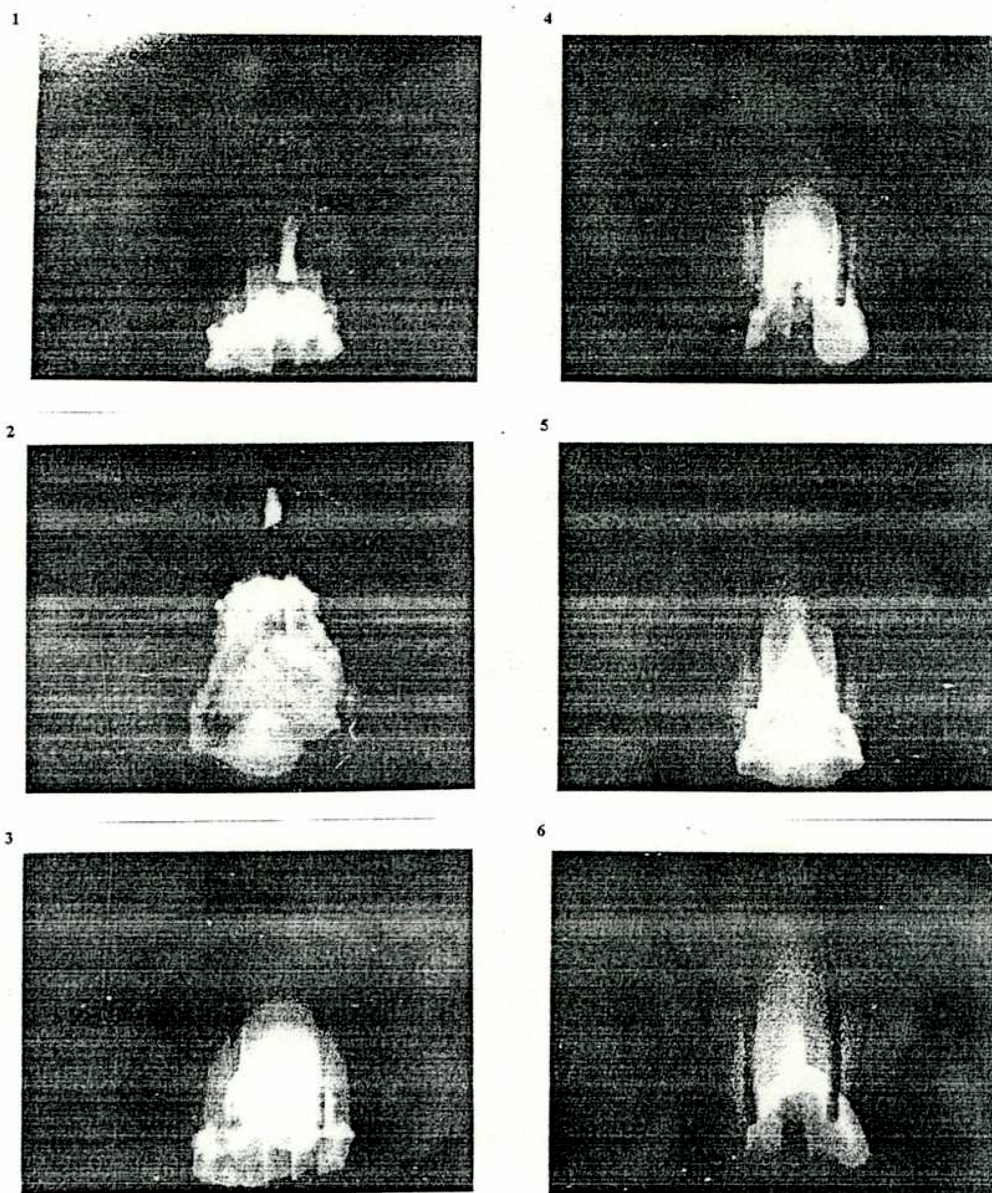


Figura 3-14: Fotografías de la LC con cátodo central (1, 2 y 3) y con ánodo central (4, 5 y 6). Se empleó una configuración que utiliza el circuito eléctrico externo RLC2, nitrógeno y ausencia del electrodo barrado externo.

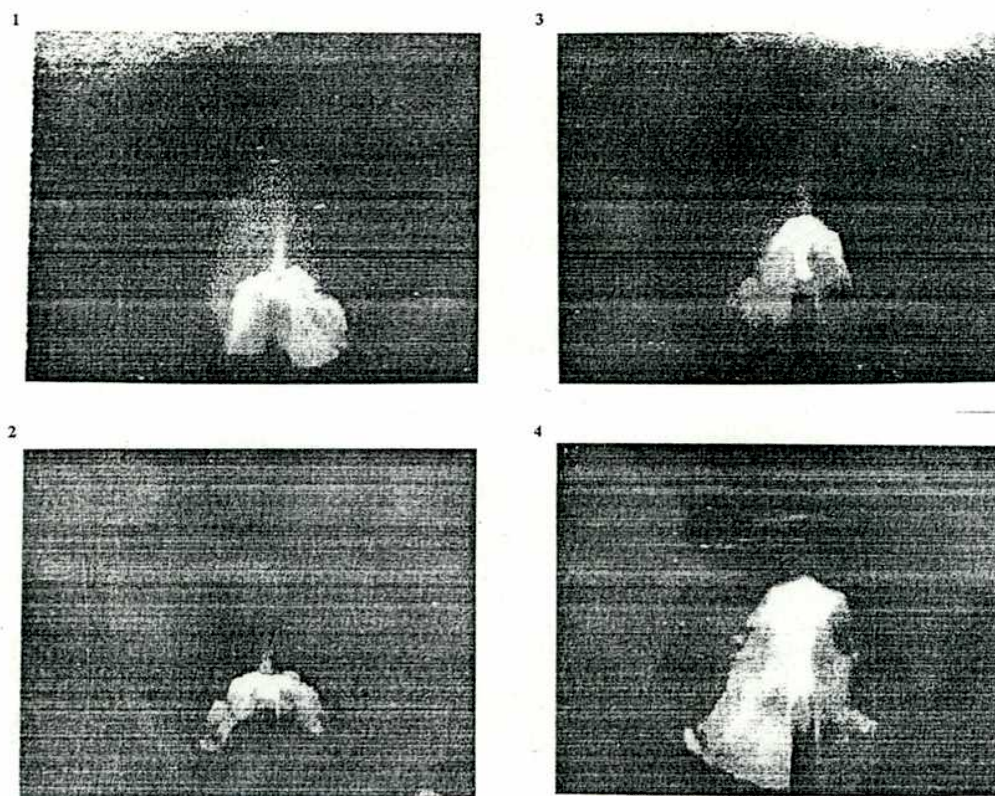


Figura 3-15: Fotografías de la lámina de corriente con cátodo central mostrando la evolución temporal de la lámina y su interacción con la pluma de plasma formada en el extremo superior del electrodo central. Las fotografías 1 y 3 corresponden a una presión de 5.5 mbar de N_2 y fueron obtenidas a $20.2 \mu s$ y $21 \mu s$ respectivamente, mientras que las fotografías 2 y 4 corresponden a una presión de 1 mbar de N_2 y fueron obtenidas a $16 \mu s$ y $16.6 \mu s$ respectivamente. Se empleó una configuración que utiliza el circuito eléctrico RLC2, nitrógeno y ausencia del electrodo barrado externo.

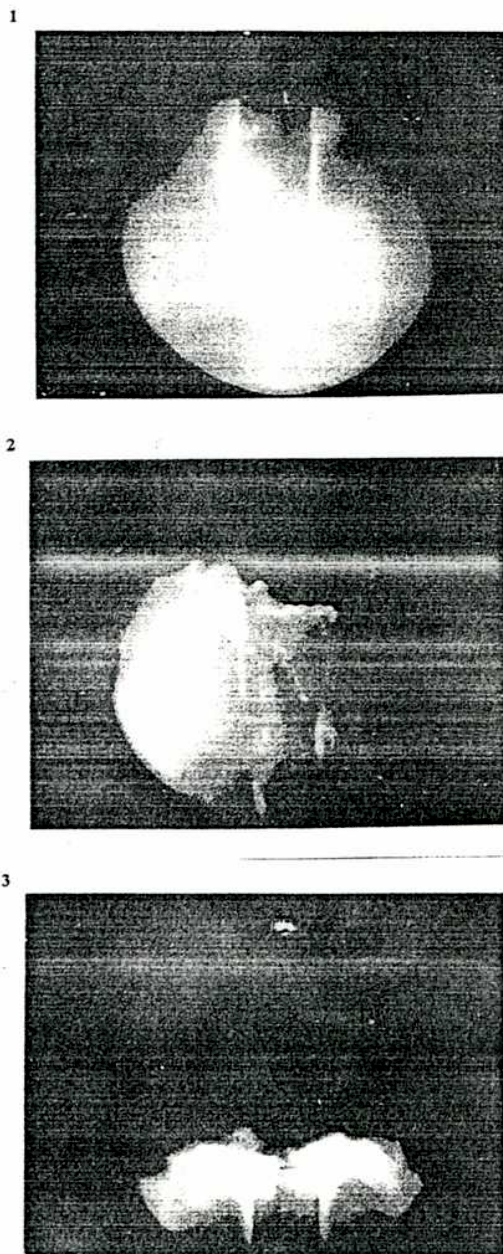


Figura 3-16: Fotografías que muestran la evidencia de puntos calientes catódicos sobre el electrodo central y un detalle de la interacción entre la LC y el electrodo central. Se empleó una configuración que utiliza el circuito eléctrico RLC2, nitrógeno y ausencia del electrodo barrado externo.

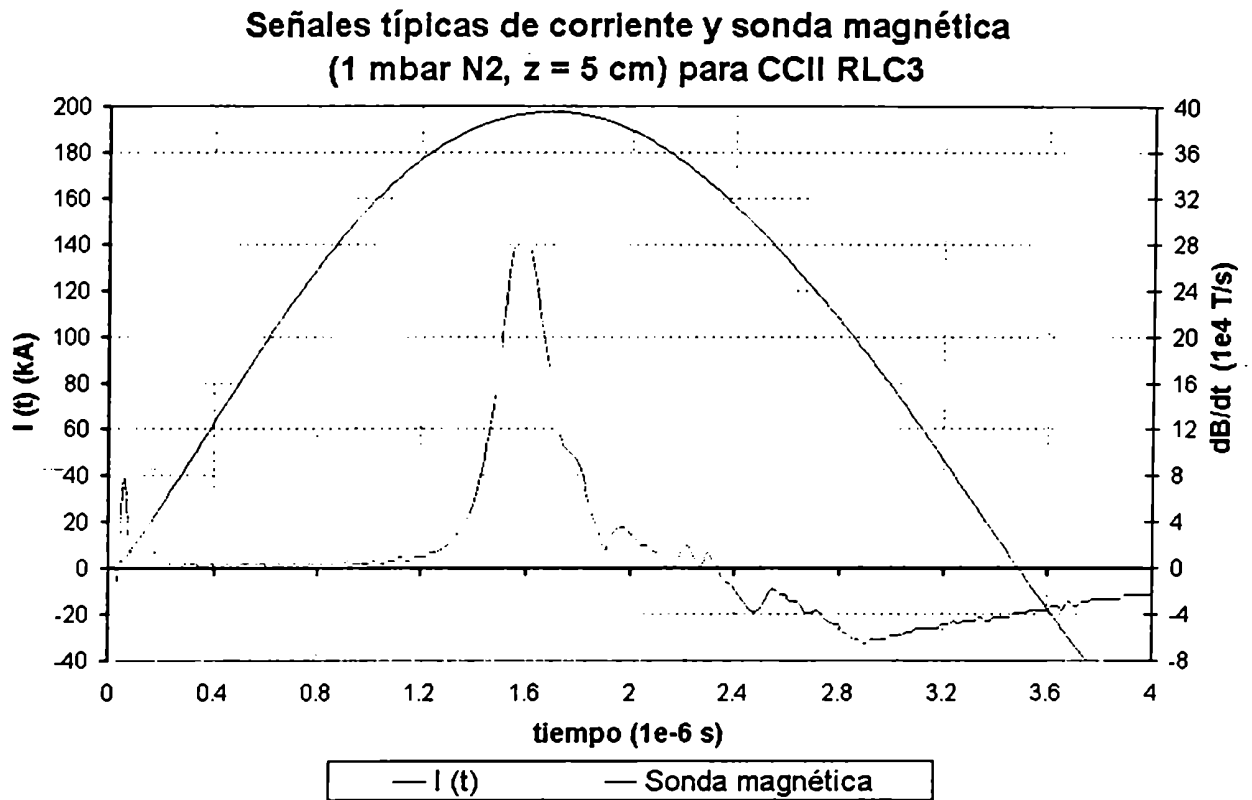


Figura 3-17: Señales típicas de sonda magnética y de corriente para el circuito RLC3 y el equipo CCII. La inversión de la polaridad de la señal de sonda magnética se corresponde con el signo negativo de la señal de dI/dt , a la cual la sonda sigue una vez que la lámina ha superado la posición de la bobina sensora de la sonda.

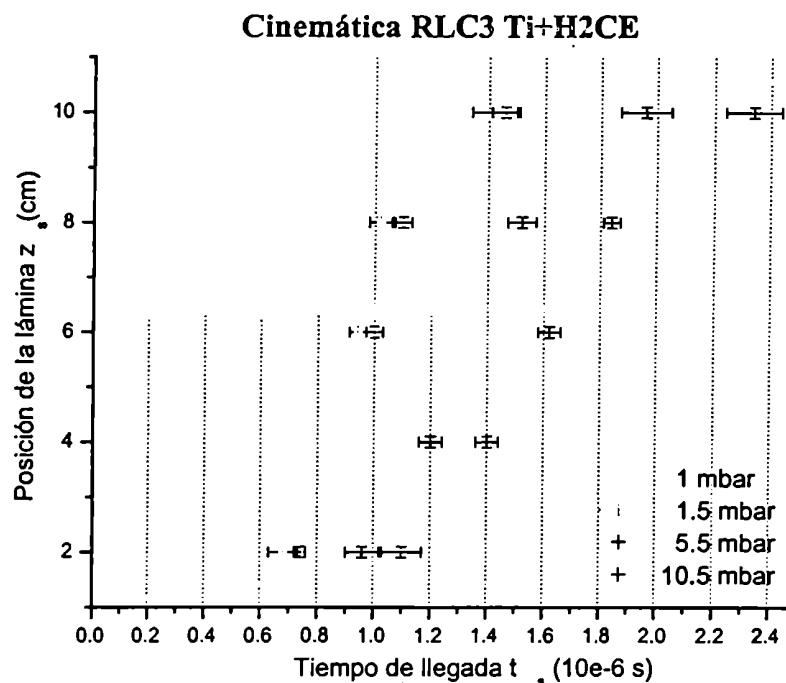


Figura 3-18: Cinemática de la LC para una configuración con electrodo central de titanio (ánodo) y electrodo externo barrado. Se emplea hidrógeno y el circuito RLC3.

figura 3-19 muestra la cinemática de la LC para una configuración que se diferencia de la anterior en que el electrodo barrado externo no está presente (RLC3 Ti+H₂SE).

Fotografías

En la figura 3-20 se aprecia la forma y la textura de la LC cuando el gas de llenado es hidrógeno. La configuración empleada utiliza el circuito eléctrico externo RLC3 y la ausencia del electrodo barrado externo. Las presiones de hidrógeno empleadas son 1 mbar (fotografías 1 y 2) y 1.5 mbar (fotografía 3). Las fotografías 1, 2 y 3 se obtuvieron a los tiempos 1 μ s, 1.04 μ s y 1.15 μ s respectivamente. La figura 3-21 ilustra una sucesión análoga para una configuración en la cual se utiliza el electrodo barrado externo con el

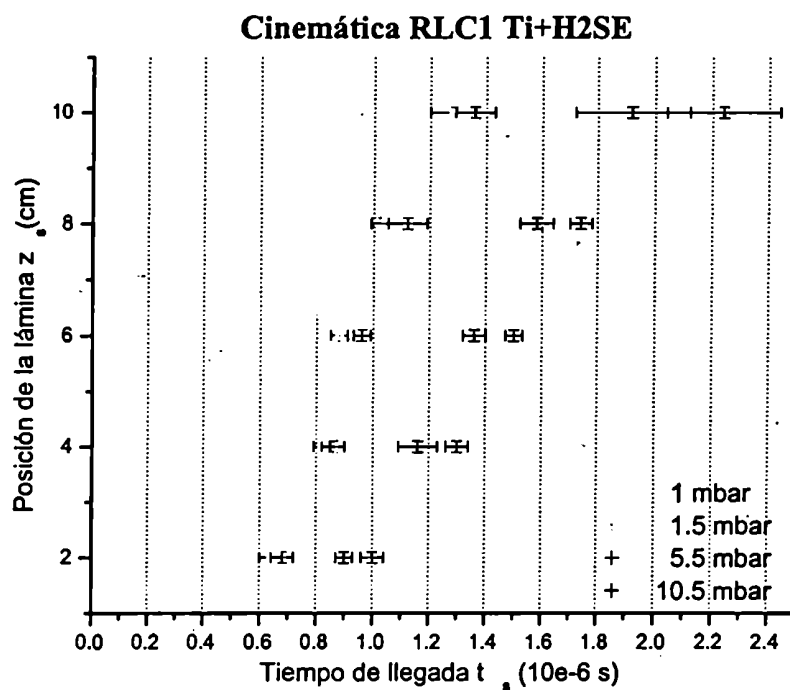


Figura 3-19: Cinemática de la LC para una configuración con electrodo central de titanio (ánodo) y sin electrodo externo barrado. Se emplea hidrógeno y el circuito RLC3.

electrodo central de titanio (ánodo) y el electrodo externo presente en una atmósfera de 1 mbar de gas hidrógeno. Las fotografías 1, 2, 3, 4, 5 y 6 se obtuvieron a los tiempos 1.01 μ s, 1.04 μ s, 1.14 μ s, 1.15 μ s, 1.21 μ s y 1.37 μ s respectivamente.

3.3 Equipo GN1

Este equipo, a diferencia del equipo CCII, está destinado exclusivamente a aplicaciones y por lo tanto, por sus características de diseño, no permite la exploración con sondas magnéticas ni la fotografía del plasma formado en su interior. Como puede apreciarse en la descripción del equipo, presentada en el capítulo anterior, la cámara de descargas del GN1 es básicamente un cilindro de acero inoxidable con un único acceso lateral (empleado para realizar el vacío e introducir los gases apropiados), ésto se debe principalmente a dos motivos:

- ventanas adicionales que permitiesen fotografiar la descarga o introducir sondas magnéticas (u otro tipo de diagnósticas) implicarían poner al plasma generado en contacto con otros materiales (típicamente vidrios Pyrex, O-rings, etc.) degradando de esta forma su composición, por la consecuente ablación de estos materiales, y con ello la optimización global (número de neutrones, intensidad de radiación X, etc.) del equipo

- cualquier equipo destinado a aplicaciones, esto es destinado a proveer un servicio concreto a futuros usuarios (radiografías, tomografías, detección de sustancias, etc.), debe tener entre sus cualidades más preciadas el ser lo más compacto y liviano posible, facilitando de esta forma su transporte y su operación en el ámbito que motivó su construcción (hospital, industria metalúrgica, industria aeronáutica, etc.).

Esta orientación tan específica del equipo GN1 permitió obtener los resultados que se muestran a continuación.

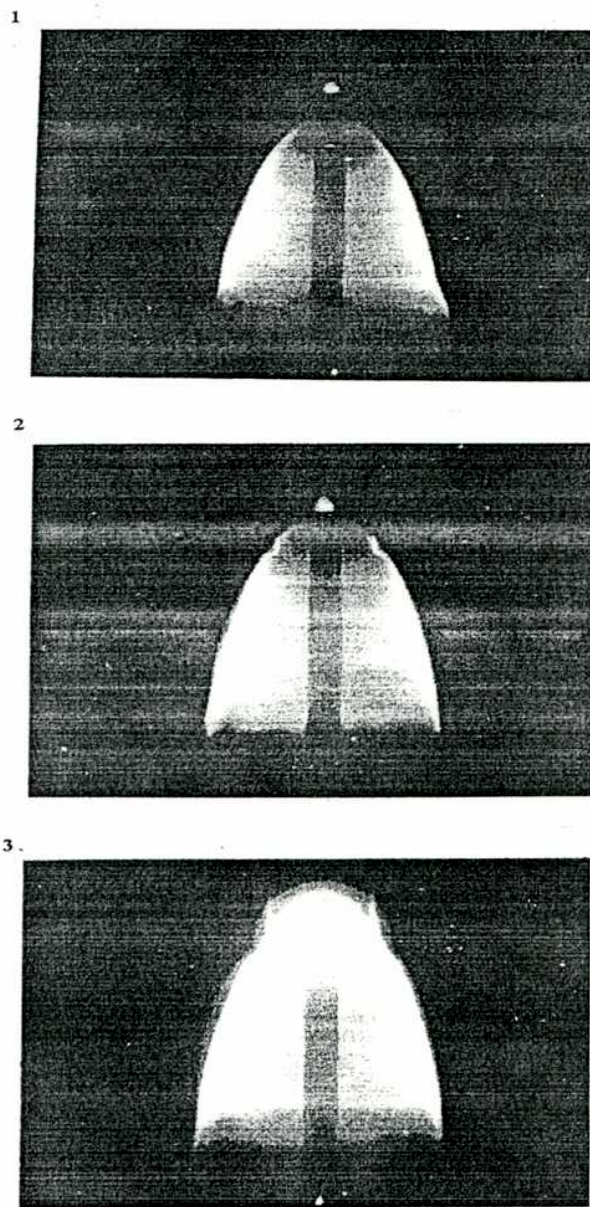


Figura 3-20: Fotografías de la LC con ánodo central en una atmósfera de hidrógeno (1, 2 y 3) y en una atmósfera de nitrógeno (4, 5 y 6). Las fotografías se obtuvieron en una configuración que utiliza el circuito eléctrico RLC3, hidrógeno y ausencia del electrodo barrado externo.

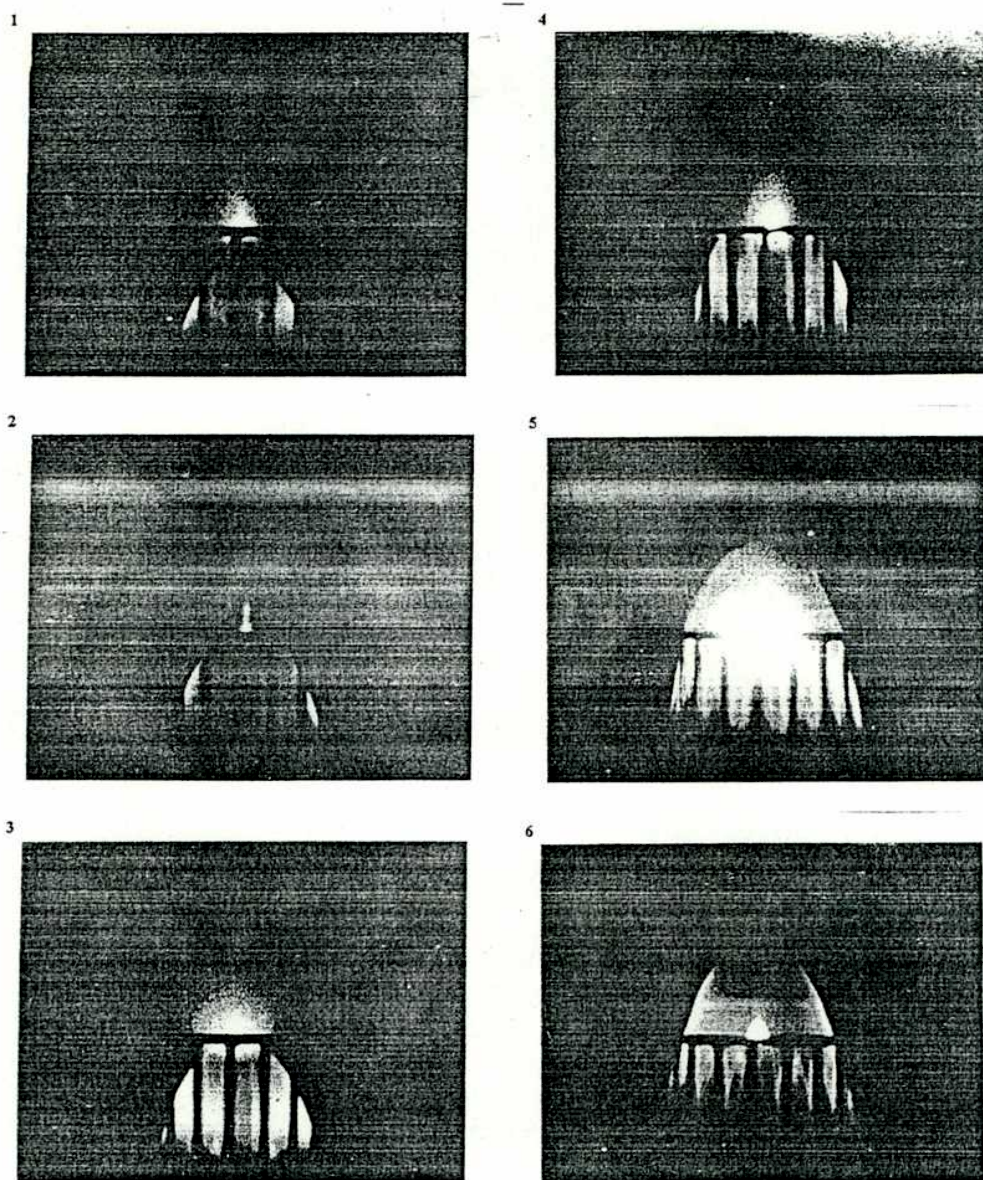


Figura 3-21: Fotografías de la LC con ánodo central en una atmósfera de hidrógeno y con el electrodo barrado externo presente. Se empleó el circuito eléctrico externo RLC3.

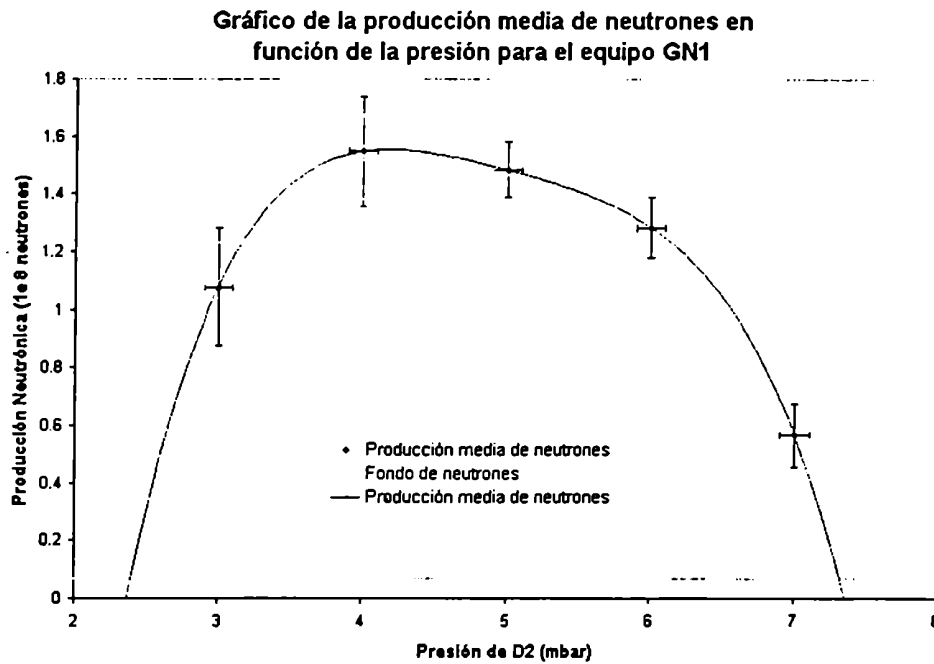


Figura 3-22: Producción neutrónica en función de la presión (D_2) para el equipo GN1.

3.3.1 Circuito RLC4

Producción neutrónica

La figura 3-24 presenta la curva que caracteriza la producción neutrónica del equipo GN1. Cada punto en la curva representa la información de aproximadamente 50 descargas realizadas en las mismas condiciones (presión de D_2 , tensión de carga, etc.)

Tiempos al foco de plasma

La figura 3-25 presenta la curva de los tiempos al foco (tiempos a los cuales se produce el foco de plasma, medidos respecto al inicio de la descarga) en función de la presión de llenado de la cámara de descargas del GN1 (en todos los casos el gas empleado fue D_2). Esta curva puede interpretarse también como una cinemática aproximada de la LC del equipo GN1 (asumiendo que la focalización se produce a poca distancia del extremo

Tiempos a los que se producen los focos de plasma para las distintas presiones de D2 empleadas

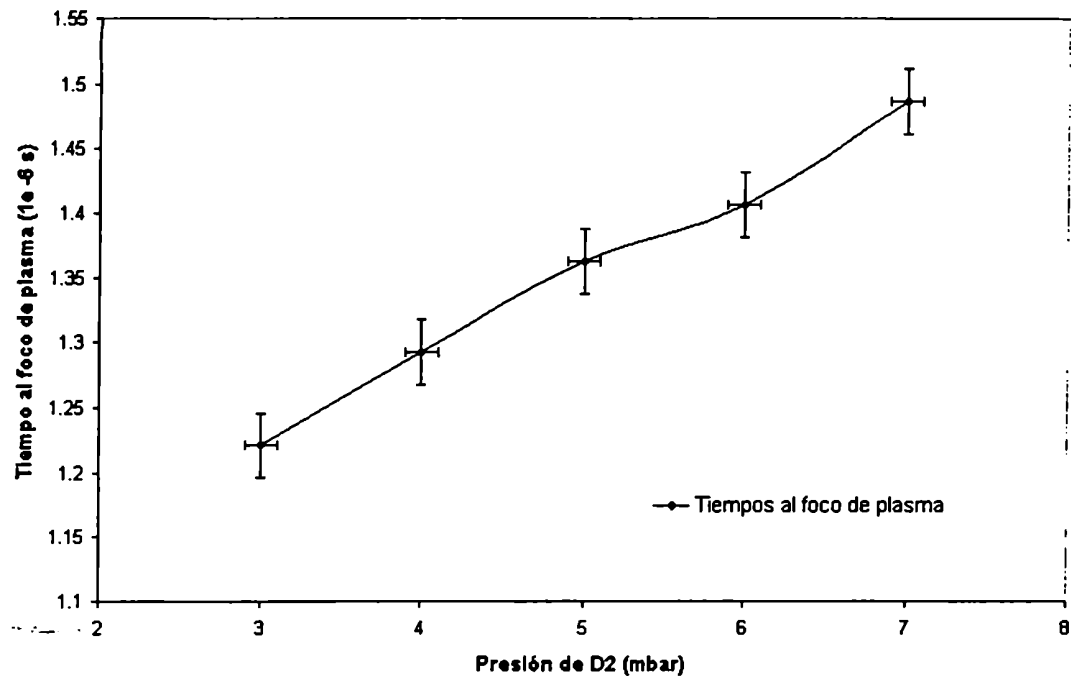


Figura 3-23: Tiempos a los cuales se produce el foco de plasma para las presiones de trabajo (siempre utilizando gas D_2).

abierto del cañón coaxial que forman los electrodos del GN1, y que su ubicación no varía con la presión en el rango estudiado).

Capítulo 4

Análisis de Resultados

En este capítulo se busca dar una interpretación física a las curvas experimentales medidas y a las fotografías presentadas en el capítulo anterior. Las ideas que subyacen son profundizar nuestro conocimiento acerca del rangos de aplicación y las limitaciones del modelo teórico aceptado en la literatura para los dispositivos coaxiales pulsados, evaluar las diferencias que introduce la variación de la potencia que entrega el circuito eléctrico externo en la morfología y la dinámica de la lámina, y presentar resultados novedosos sobre la morfología de la lámina. Para ello:

- una primera sección de este capítulo discute la validez y confiabilidad de las señales medidas,
- la segunda sección introduce luego un modelo bidimensional analítico que describe el movimiento y la forma de la lámina de corriente que se forma entre los electrodos coaxiales, en ella también se comparan las curvas experimentales con las curvas que predice el mencionado modelo teórico, se comparan los perfiles $Z(r)$ de las láminas de corriente que se observan en las fotografías con los perfiles $Z(r)$ que predice este modelo teórico, y se discuten los ajustes realizados,
- en la tercera se presentan y discuten los anchos de la lámina de corriente en función del tiempo,

- en la cuarta se presentan fotografías y señales eléctricas simultáneas con la intención de dar pautas generales sobre la estructura de la lámina de corriente.

4.1 Análisis de las mediciones realizadas con sondas magnéticas inductivas

Siguiendo la bibliografía sobre el análisis de mediciones realizadas con sondas magnéticas inductivas [6] el lector encontrará que uno de los temas que aparece jugando un papel central en la interpretación de estas señales es la magnitud de la perturbación introducida en el plasma por la presencia del cuerpo de la sonda magnética. Este cuerpo es típicamente un tubo de material aislante (vidrio Pyrex, alúmina, etc.) que protege a la bobina sensora del plasma y de las corrientes eléctricas que por él circulan. Pero la presencia misma de un cuerpo aislante en el seno del plasma distorsiona localmente la distribución espacial de estas corrientes eléctricas y esto se traduce en una perturbación del campo magnético que quiere medirse.

Los otros dos factores muy citados en la bibliografía que contribuyen a distorsionar la señal inducida en la bobina sensora de la sonda son: la distancia a la que se encuentra ubicada la bobina sensora respecto al extremo cerrado de la sonda magnética, y la contaminación local del plasma de la descarga por la ablación de material de la superficie del cuerpo aislante de la sonda magnética.

Para el caso de una descarga eléctrica coaxial pulsada, donde el plasma generado entre los electrodos tiene la forma de una lámina de corriente que es perforada por el cuerpo de la sonda magnética (y donde las sondas magnéticas utilizadas poseen un extremo cerrado semiesférico), un criterio aceptado [3] para evaluar la magnitud de la perturbación en el campo magnético sentido que proviene de la exclusión de la corriente por la presencia del cuerpo de la sonda surge de comparar el diámetro externo del cuerpo de la sonda magnética (típicamente cilíndrico) con el ancho espacial de la lámina de corriente. Para una lámina de corriente que tiene un ancho espacial igual al diámetro

de la sonda resultados numéricos muestran que la señal de la sonda magnética se ve ensanchada espacialmente al menos 3 veces. En cambio para el caso de una lámina de corriente con un ancho 4 o más veces mayor al diámetro del cuerpo de la sonda, la señal inducida en la sonda presenta un ensanchamiento espacial despreciable.

Como se discutirá en una de las secciones siguientes, al presentar los anchos de la lámina de corriente y su evolución temporal, el ancho espacial medio de la lámina en el equipo CCII es en todos los casos estudiados superior a los 3 cm (para la posición radial a la cual se ubica la sonda magnética), y por lo tanto mayor al triple del diámetro exterior de las sondas magnéticas utilizadas (las de mayor diámetro poseen ~ 6 mm).

Para las sondas magnéticas inductivas que se utilizaron en esta tesis, por construcción la distancia entre el extremo cerrado del cuerpo de la sonda magnética y la posición de la bobina sensora se redujo al mínimo posible, esto es el espesor de la pared de vidrio del casquete semiesférico que se forma al cerrar uno de los extremos del tubo de vidrio que contiene a la bobina sensora. Este espesor en las sondas utilizadas es aproximadamente 0.5 mm, con lo cual [3], dado el diámetro externo de las sondas empleadas, su efecto perturbador de la señal medida puede despreciarse.

Estimaciones basadas en los resultados publicados sobre la interacción entre el plasma de la descarga y la pared del cuerpo aislante de una sonda magnética [9][8] permiten afirmar que la ablación de material que puede producirse en la etapa coaxial (donde el plasma es relativamente frío) no llega a ser significativa.

De esta discusión se sigue que las señales de tensión sensadas por las sondas magnéticas inductivas empleadas en el equipo CCII para esta tesis reflejan fielmente la física de la descarga eléctrica estudiada sin distorsiones ni ensanchamientos espúreos apreciables.

4.2 Comparación de la dinámica experimental de la lámina de corriente con el modelo semianalítico de Gratton-Vargas

4.2.1 Breve descripción del modelo semianalítico de Gratton-Vargas

Recordemos aquí brevemente lo discutido en la introducción, la dinámica de una lámina de corriente en una descarga coaxial pulsada puede caracterizarse en 3 etapas:

- la etapa de formación: en ella ocurre la formación misma de la lámina en el extremo cerrado del cañón coaxial;
- la etapa coaxial: el tránsito de la lámina de corriente a lo largo del cañón coaxial, desde su extremo cerrado hasta su extremo abierto;
- la etapa de focalización o colapso: en ella, una vez que la lámina desborda los electrodos coaxiales, se produce el colapso radial y la formación de regiones de muy alta densidad y temperatura en las que, dadas las condiciones apropiadas, se producen las reacciones de fusión.

El modelo semianalítico de Gratton-Vargas[7] resuelve la ecuación de movimiento de una lámina de corriente en una descarga coaxial pulsada (originalmente el problema se planteó y resolvió para la configuración conocida como Plasma Focus) para las etapas coaxial y de focalización.

Planteando el teorema del flujo de la cantidad de movimiento bidimensional sobre una superficie de control que encierra a un sector de corona circular infinitesimal de la lámina de corriente (sobre un sistema de coordenadas fijo a la lámina de corriente) Gratton y Vargas obtienen dos ecuaciones acopladas que describen el movimiento

de la lámina (una en la dirección normal y otra en la dirección tangencial a la lámina). Emplean luego las hipótesis siguientes:

- la presión magnética es mucho mayor que las presiones del gas en reposo delante de la lámina, del gas en la lámina y del gas detrás de la lámina de corriente,
- la densidad de masa delante de la lámina de corriente es mucho mayor que la densidad de masa detrás de la lámina,
- el espesor de la lámina es mucho menor que el radio de curvatura de la lámina de corriente (esta condición coincide con despreciar la aceleración de la lámina de corriente o despreciar su inercia),

Y con estas hipótesis logran desacoplar ambas ecuaciones y sintetizarlas en la ecuación 4-1 para describir la forma y el movimiento de la lámina de corriente. Esta ecuación 4-1 mediante la expresión 4-2 para la velocidad normal del gas que incide sobre la lámina se transforma en la ecuación 4-3 o ecuación del modelo de Gratton-Vargas.

$$\rho_0 \cdot v_n^2 = \frac{B_\theta^2}{2 \cdot \mu_0} \quad (4.1)$$

$$v_n = \frac{\partial f}{\partial t} \cdot \cos \phi = \pm \frac{\frac{\partial f}{\partial t}}{\sqrt{1 + \left(\frac{\partial f}{\partial r}\right)^2}} \quad (4.2)$$

$$\frac{\partial f}{\partial t} = \sqrt{\frac{\mu_0}{8 \cdot \pi^2 \cdot \rho_0}} \cdot \frac{I(t)}{r} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{\partial f}{\partial r}\right)^2} \quad (4.3)$$

Donde ρ_0 es la densidad de masa del gas en reposo entre los electrodos (delante de la lámina de corriente), v_n es la componente de la velocidad del gas normal a la lámina de corriente, B_θ es la componente azimutal del campo magnético (θ es el ángulo de giro alrededor del eje de simetría de los electrodos), μ_0 la permeabilidad magnética del vacío, $Z = f(r, t)$ es el perfil de la lámina de corriente (su revolución

en θ genera el borde superior de la lámina de corriente), ϕ es el ángulo entre el versor normal a la porción de lámina que encierra la superficie de control y el eje de simetría de los electrodos, $I(t)$ es la corriente eléctrica y r es la coordenada radial.

La solución de la ecuación 4-3, obtenida por el método de las características, para la etapa coaxial (la más relevante en relación a las mediciones realizadas en esta tesis) se observa en la ecuación 4-4. Esta solución desacopla la forma de la lámina de su evolución temporal (el primer término de la ecuación 4-4 contiene toda la dependencia temporal a través de la corriente $I(t)$ y el segundo término representa la forma o perfil de la lámina de corriente) de modo que la lámina resulta ser un perfil $Z(r)$ (donde Z es la coordenada en la dirección del eje de simetría de los electrodos y r es su coordenada radial) que viaja sin deformarse a lo largo del cañón coaxial.

$$Z(r, t) = R_1 \cdot \left\{ \left[\sqrt{\frac{\mu_0}{8 \cdot \pi^2 \cdot \rho_0}} \cdot \int_0^t I(t) \cdot dt \right] + \frac{1}{2} \left[Arch\left(\frac{r}{R_1}\right) - \frac{r}{R_1} \cdot \sqrt{\left(\frac{r}{R_1}\right)^2 - 1} \right] \right\} \quad (4.4)$$

Donde R_1 es el radio externo del electrodo central del cañón coaxial. La densidad del gas en reposo ρ_0 se expresa en función de la presión como muestra la siguiente expresión (las unidades correspondientes pertenecen al sistema MKS):

$$\rho_0 = N_{Loschmidt} \cdot M_{molec} \cdot P \quad (4.5)$$

El número de Loschmidt, $N_{Loschmidt}$, expresa la cantidad de partículas por unidad de volumen que posee un gas en condiciones standard de presión y temperatura, M_{molec} es el peso molecular del gas (28 para nitrógeno, 18 para argón y 4 para deuterio) multiplicado por la masa del protón $M_{protón} = 1.67 \cdot 10^{-27}$ kg, y P denota la presión del gas medida en bar. Incluyendo estas constantes la ecuación 4-4 puede reescribirse como:

$$Z(t) \sim \frac{\sqrt{\frac{10^{-7}}{2\pi(1.2625)P}} \int_0^t I(u)du}{R_1} = \frac{\frac{1.123 \cdot 10^{-4}}{\sqrt{P}} \int_0^t I(u)du}{R_1} \quad (4.6)$$

De este modo, conociendo el radio externo del electrodo central, la presión de trabajo del gas empleado en la descarga, e integrando numéricamente la corriente eléctrica que circula entre los electrodos puede calcularse la curva $Z(t)$ que predice el modelo de Gratton-Vargas para el movimiento de la lámina de corriente a lo largo del cañón coaxial.

4.2.2 Cinemáticas

Las figuras siguientes muestran el ajuste de los puntos experimentales con las curvas teóricas que describen la cinemática de la lámina de corriente que predice el modelo de Gratton-Vargas. En ellas se observan con líneas punteadas las curvas teóricas (sin ninguna modificación) para las cuatro presiones de trabajo (0.5, 1, 5 y 10 mbar) y con líneas sólidas las curvas teóricas retrasadas temporalmente o modificadas por el factor que permite el mejor ajuste.

RLC1

La figura 4-1 muestra el ajuste de los puntos experimentales para la configuración que posee el circuito externo RLC1, el electrodo central de titanio, gas nitrógeno y presencia del electrodo barrado externo. El electrodo central es el ánodo de la descarga para 4-1 en tanto que es el cátodo de la descarga para 4-2. Se observa que es necesario en la figura 4-1 la introducción de un retraso temporal para permitir un ajuste razonable con los puntos experimentales. Este retraso, cuya interpretación física estaría en el tiempo de formación de la lámina de corriente (etapa de la descarga que el modelo teórico no describe) se incluye en la descripción de cada curva para cada presión de trabajo. En la figura 4-2, en cambio, puede verse que ningún retraso permite un ajuste razonable con los puntos experimentales. En esta figura se presenta el mejor intento de ajuste de los datos experimentales, para obtenerlo fue necesario introducir un factor multiplicando a

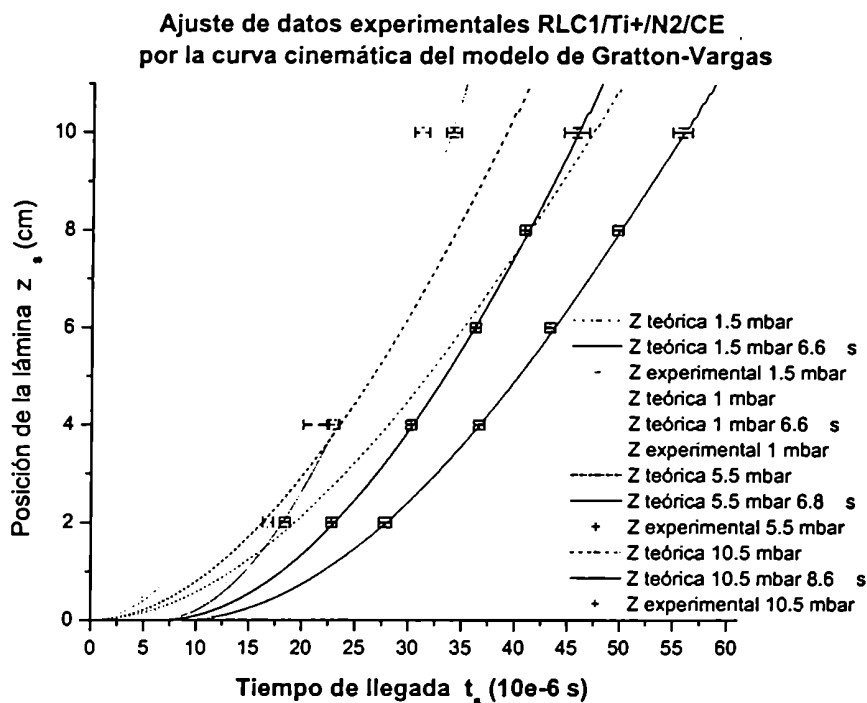


Figura 4-1: Ajuste de los puntos experimentales de la cinemática de la LC por el modelo de Gratton-Vargas para una configuración con electrodo central de titanio (ánodo) y electrodo externo barrado. Se emplea gas nitrógeno y el circuito RLC1.

la curva teórica (el factor utilizado para cada presión se incluye en la descripción de cada curva). No se pretende dar una interpretación física de este factor multiplicativo sino más bien enfatizar la imposibilidad de un ajuste razonable con el modelo teórico.

RLC2

En las figuras 4-3 y 4-4 encontramos el ajuste de los puntos experimentales para la configuración del circuito externo RLC2, el electrodo central de titanio, gas nitrógeno y presencia del electrodo barrado externo. El electrodo central es el ánodo de la descarga para 4-3 en tanto que es el cátodo de la descarga para 4-4.

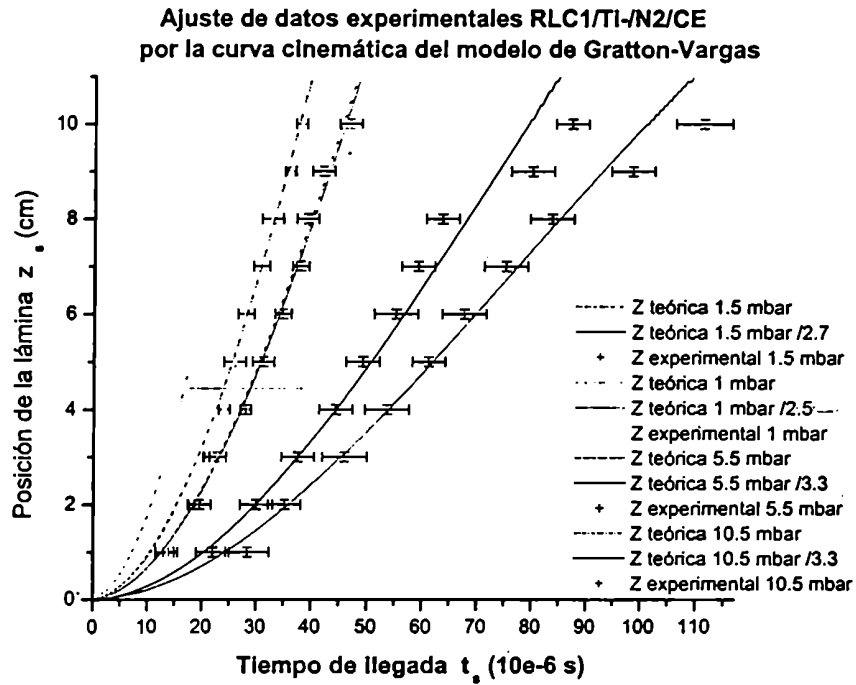


Figura 4-2: Ajuste de los puntos experimentales de la cinemática de la LC por el modelo de Gratton-Vargas para una configuración con electrodo central de titanio (cátodo) y electrodo externo barrado. Se emplea gas nitrógeno y el circuito RLC1.

Las figuras 4-5 y 4-6 presentan el ajuste de los puntos experimentales para la configuración que posee el circuito externo RLC2, el electrodo central de titanio, gas nitrógeno y ausencia del electrodo barrado externo. El electrodo central es el ánodo de la descarga para la figura 4-5 en tanto que es el cátodo de la descarga para la figura 4-6.

Puede apreciarse en la figura 4-7 el ajuste de los puntos experimentales para la configuración que posee el circuito externo RLC2, el electrodo central de titanio como ánodo de la descarga, gas argón y presencia del electrodo barrado externo.

En la figura 4-8 se encuentra el ajuste de los puntos experimentales para la configuración que posee el circuito externo RLC2, el electrodo central de cobre como cátodo de la descarga, gas nitrógeno y presencia del electrodo barrado externo.

Nuevamente es necesaria la introducción de un retraso temporal para lograr un ajuste razonable de los puntos experimentales con las curvas teóricas que corresponden a una configuración donde el electrodo central es el ánodo de la descarga (el valor de retraso empleado para cada presión se incluye en la descripción de las curvas). En el caso de los datos experimentales que se obtuvieron de configuraciones en las que el electrodo central es el cátodo de la descarga puede verse que ningún retraso permite un ajuste razonable de los puntos experimentales por la curva teórica y que es necesario introducir aquí también un factor multiplicativo adicional.

RLC3

Observando las figuras 4-9 y 4-10 se aprecian los ajustes de los puntos experimentales para la configuración energizada por el circuito externo RLC3, el electrodo central de titanio (aquí siempre como ánodo de la descarga) y gas hidrógeno. En la figura 4-9 el electrodo barrado externo está presente en tanto que en la figura 4-10 está ausente.

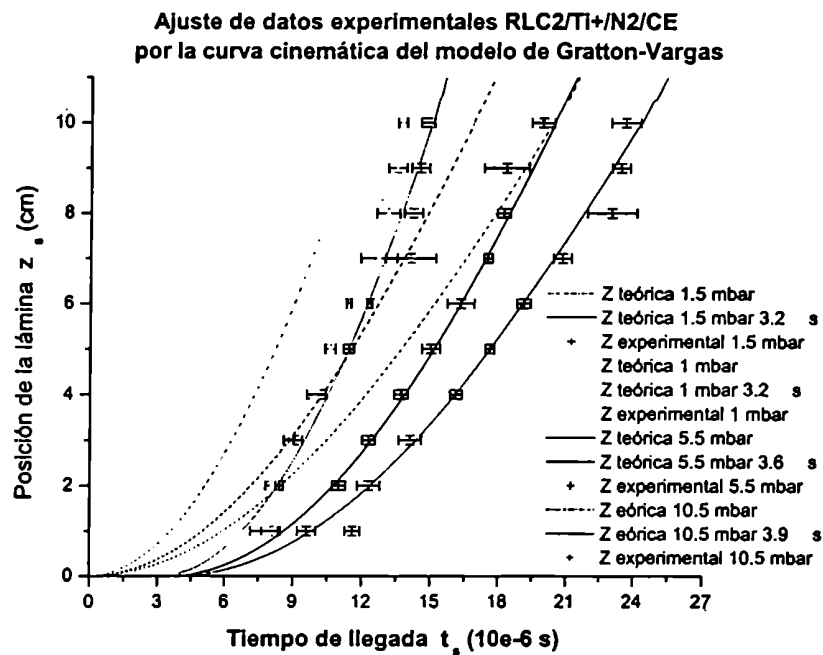
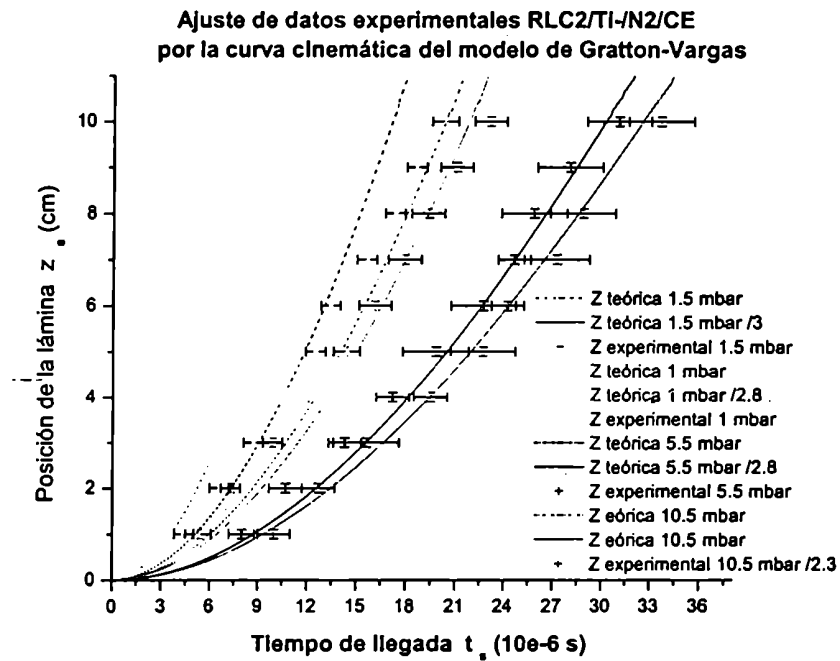
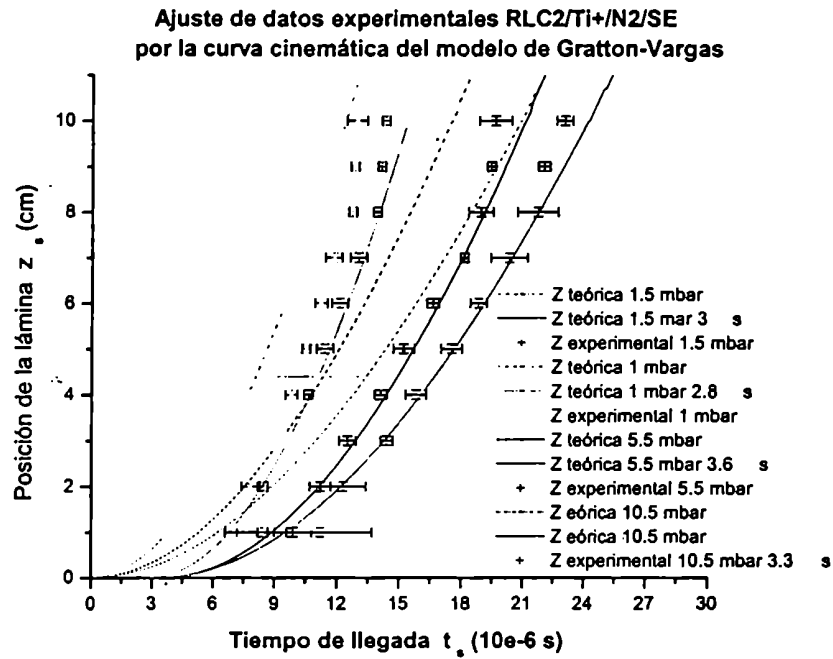


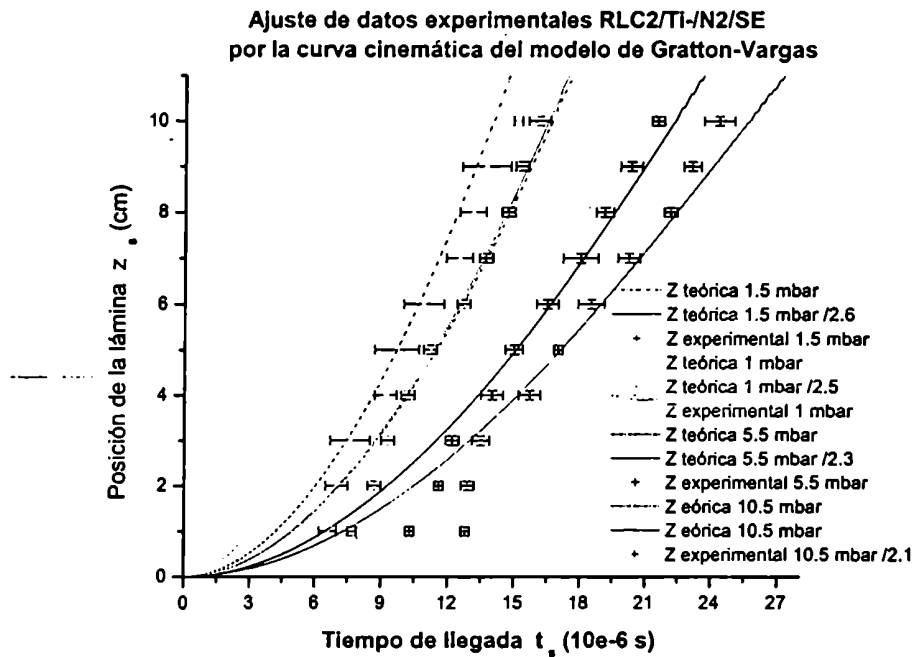
Figura 4-3: Ajuste de los puntos experimentales de la cinemática de la LC por el modelo de Gratton-Vargas para una configuración con electrodo central de titanio (ánodo) y electrodo externo barrado. Se emplea gas nitrógeno y el circuito RLC2.



Figura~4-4: Ajuste de los puntos experimentales de la cinemática de la LC por el modelo de Gratton-Vargas para una configuración con electrodo central de titanio (cátodo) y electrodo externo barrado. Se emplea gas nitrógeno y el circuito RLC2.



Figura~4-5: Ajuste de los puntos experimentales de la cinemática de la LC por el modelo de Gratton-Vargas para una configuración con electrodo central de titanio (ánodo) y sin electrodo externo barrado. Se emplea gas nitrógeno y el circuito RLC2.



Figura~4-6: Ajuste de los puntos experimentales de la cinemática de la LC por el modelo de Gratton-Vargas para una configuración con electrodo central de titanio (cátodo) y sin electrodo externo barrado. Se emplea gas nitrógeno y el circuito RLC2.

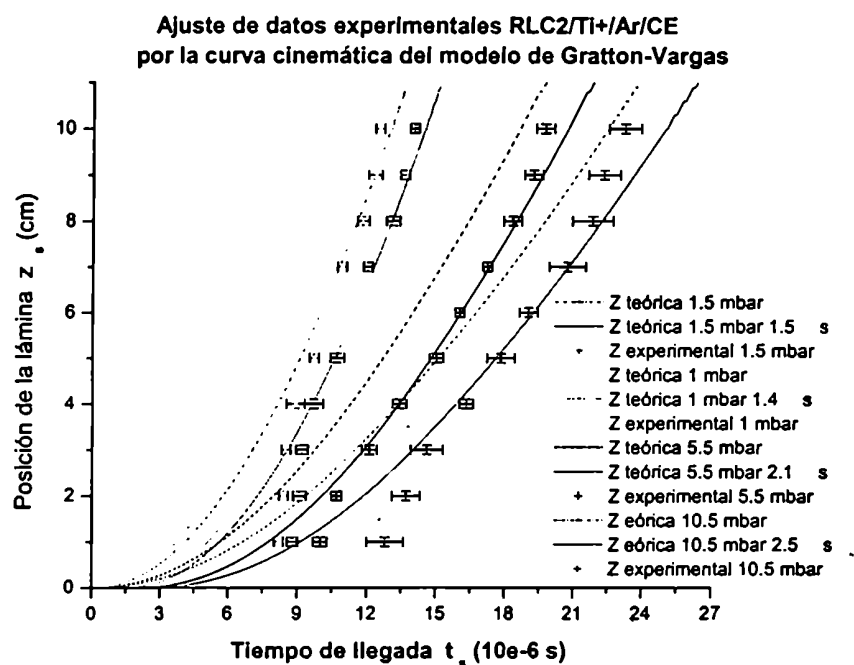
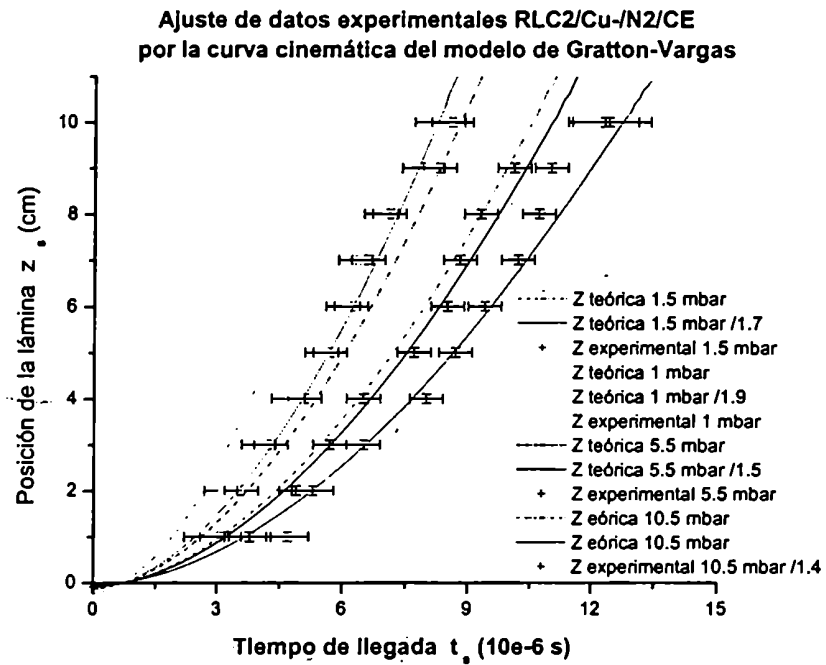
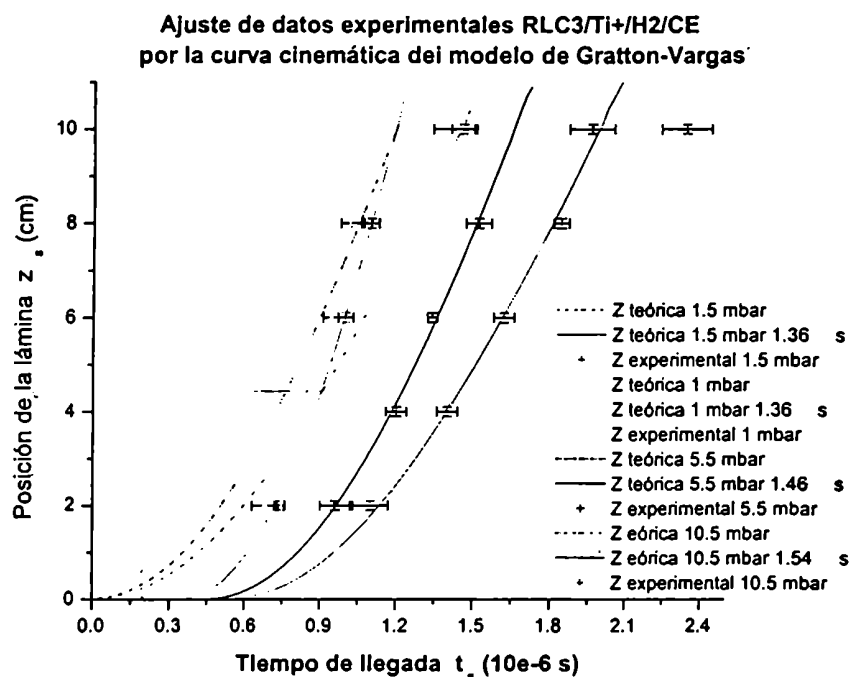


Figura 4-7: Ajuste de los puntos experimentales de la cinemática de la LC por el modelo de Gratton-Vargas para una configuración con electrodo central de titanio (ánodo) y electrodo externo barrado. Se emplea gas argón y el circuito RLC2.



Figura~4-8: Ajuste de los puntos experimentales de la cinemática de la LC por el modelo de Gratton-Vargas para una configuración con electrodo central de cobre (cátodo) y electrodo externo barrado. Se emplea gas nitrógeno y el circuito RLC2.



Figura~4-9: Ajuste de los puntos experimentales de la cinemática de la LC por el modelo de Gratton-Vargas para una configuración con electrodo central de titanio (ánodo) y electrodo externo barrado. Se emplea gas hidrógeno y el circuito RLC3.

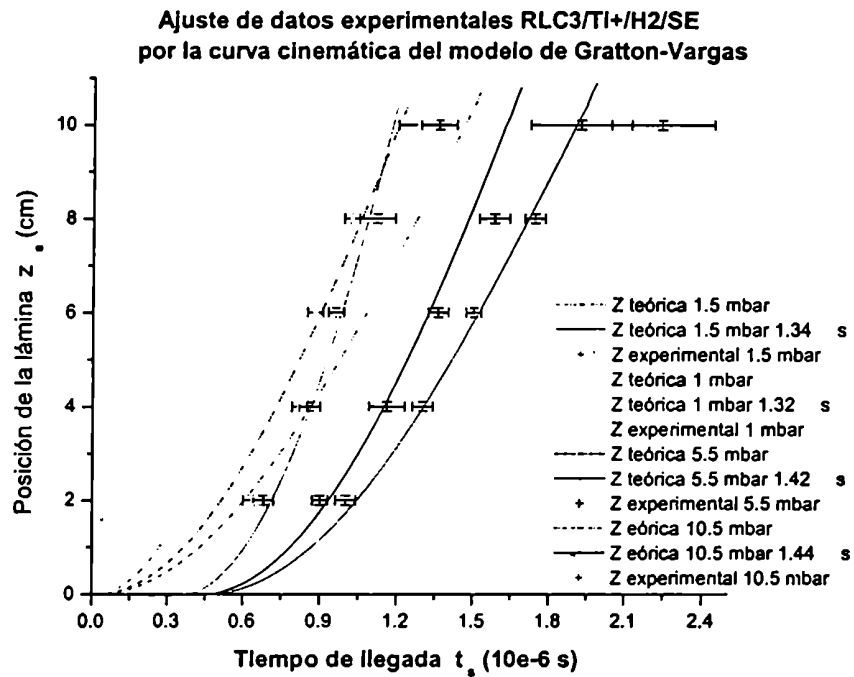


Figura 4-10: Ajuste de los puntos experimentales de la cinemática de la LC por el modelo de Gratton-Vargas para una configuración con electrodo central de titanio (ánodo) y sin electrodo externo barrado. Se emplea gas hidrógeno y el circuito RLC3.

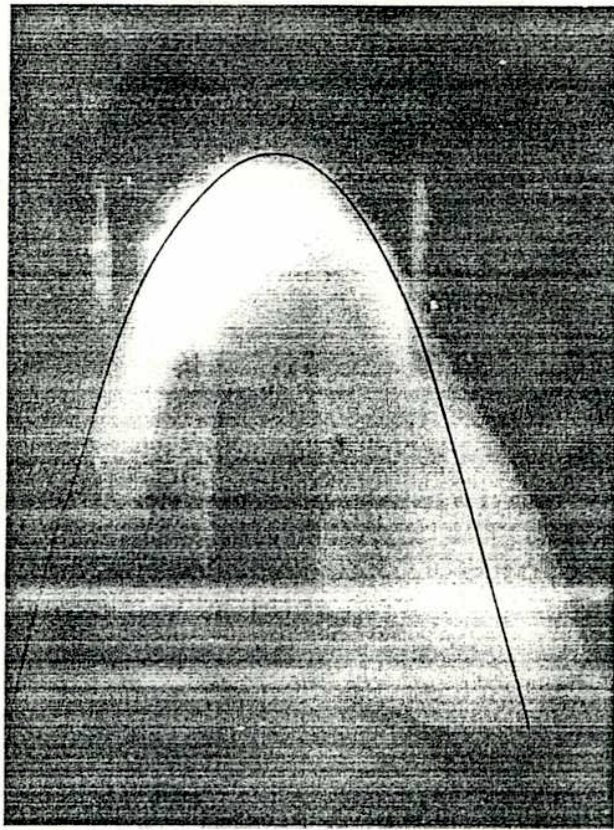


Figura 4-11: Comparación de la fotografía de la lámina de corriente con el perfil de la LC que predice el modelo de Gratton-Vargas para una configuración que posee circuito externo RLC1, electrodo central de titanio (ánodo), gas nitrógeno y ausencia del electrodo barrado externo.

4.2.3 Perfiles

RLC1

En la figura 4-11 se superponen en una misma escala la fotografía de la lámina de corriente y el perfil que predice el modelo teórico para la configuración que posee el circuito externo RLC1, el electrodo central de titanio (ánodo de la descarga), gas nitrógeno y ausencia del electrodo barrado externo.

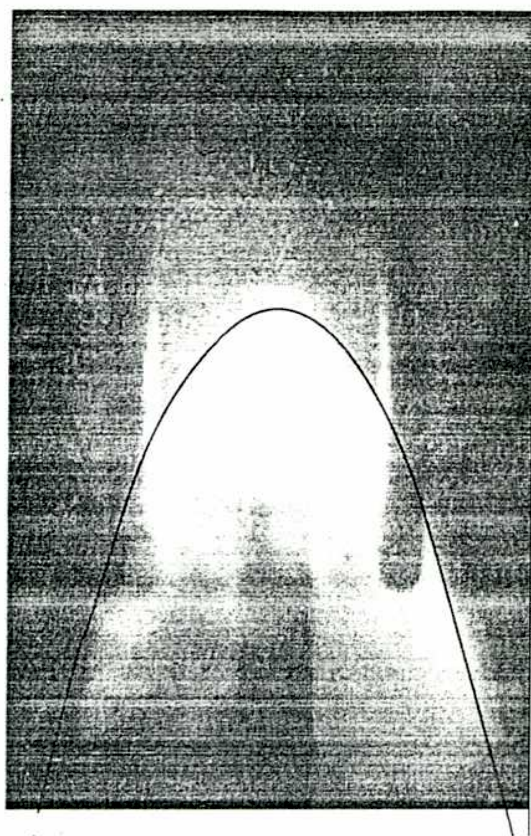


Figura 4-12: Comparación de la fotografía de la lámina de corriente con el perfil de la LC que predice el modelo de Gratton-Vargas para una configuración que posee circuito externo RLC2, electrodo central de titanio (ánodo), gas nitrógeno y ausencia del electrodo barrado externo.

RLC2

En la figura 4-12 se superponen en una misma escala la fotografía de la lámina de corriente y el perfil que predice el modelo teórico para la configuración que posee el circuito externo RLC2, el electrodo central de titanio (ánodo de la descarga), gas nitrógeno y ausencia del electrodo barrado externo.

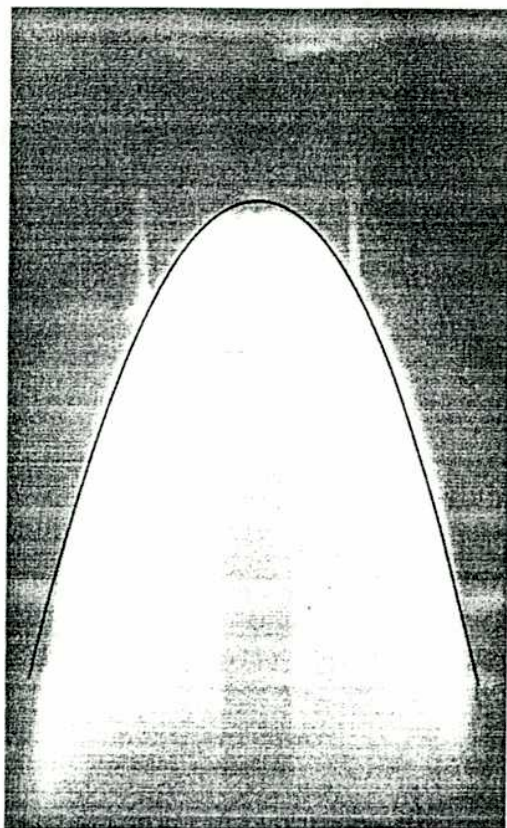


Figura 4-13: Comparación de la fotografía de la lámina de corriente con el perfil de la LC que predice el modelo de Gratton-Vargas para una configuración que posee circuito externo RLC3, electrodo central de titanio (ánodo), gas hidrógeno y ausencia del electrodo barrado externo.

RLC3

En las figuras 4-13 y 4-14 se superponen en una misma escala la fotografía de la lámina de corriente y el perfil que predice el modelo teórico para la configuración que posee el circuito externo RLC3, el electrodo central de titanio (ánodo de la descarga) y gas hidrógeno. En la figura 4-13 el electrodo barrado externo está ausente en tanto que está presente en la figura 4-14.

La forma algodonosa y poco definida que se observa en todas las fotografías de las láminas de corriente de configuraciones donde el electrodo central es el cátodo de la des-

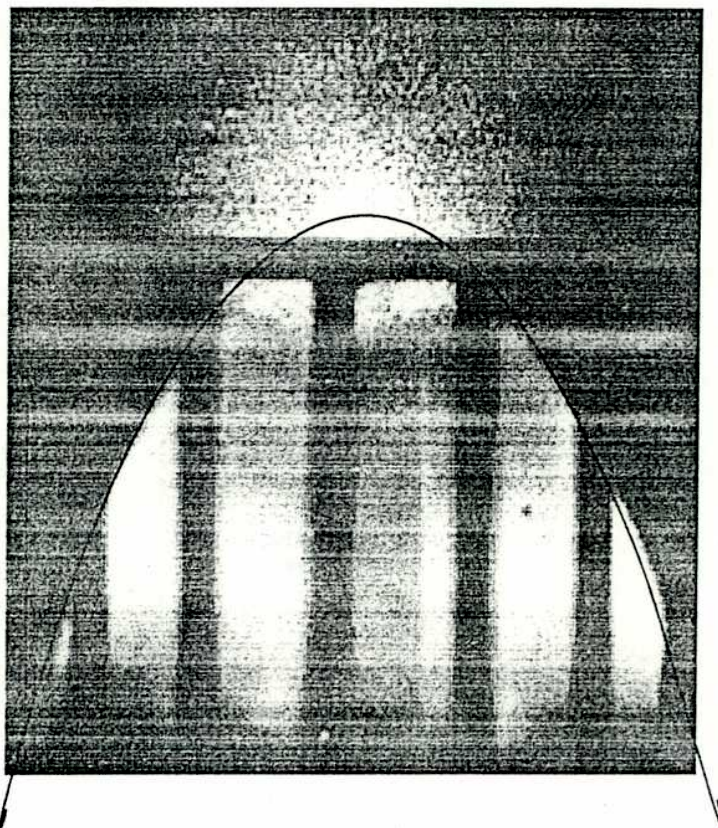


Figura ~4-14: Comparación de la fotografía de la lámina de corriente con el perfil de la LC que predice el modelo de Gratton-Vargas para una configuración que posee circuito externo RLC3, electrodo central de titanio (ánodo), gas nitrógeno y presencia del electrodo barrado externo.

carga hacen que para estos casos pierda sentido una superposición análoga de fotografía y curva teórica.

4.2.4 Revisión crítica del modelo y su ajuste

Tanto las figuras que muestran los ajustes de los puntos experimentales por las curvas cinemáticas del modelo teórico como las que presentan la superposición de los perfiles experimental y teórico conducen a la idea de que el modelo de Gratton-Vargas explica notablemente bien la dinámica de la lámina de corriente para los casos en los que el electrodo central es el ánodo de la descarga, pero también que el mismo modelo teórico falla al intentar explicar los casos en los que el electrodo central es el cátodo de la descarga.

La introducción de un retraso temporal del orden de algunos μs en las curvas teóricas para ajustar los puntos experimentales de los casos con ánodo central se entiende al reconocer que el modelo teórico no toma en cuenta la etapa de formación de la lámina de corriente (ni el tiempo en el que esta ocurre) y que entonces este tiempo corresponde a la gestación misma de la lámina de corriente. Es importante destacar que el modelo ajusta notablemente puntos experimentales que además de provenir de tres curvas distintas de corriente eléctrica corresponden a tres gases distintos (N_2 , Ar y H_2) y a dos materiales empleados como electrodo central (Ti y Cu)

En cambio, la necesidad de introducir un factor espúreo en la curva que predice el modelo teórico para ajustar los puntos experimentales de los casos con cátodo central implica una falla del modelo. Los puntos experimentales denotan una estructura mucho más lenta que la que predice el modelo teórico. Una interpretación simplificada (que asumiese que el análisis dinámico de la lámina de corriente que hace el modelo de Gratton-Vargas sigue valiendo en esencia) llevaría a concluir que en los casos con cátodo central estarían presentes otros mecanismos de aporte significativo de masa a la lámina de corriente además del gas que la lámina barre e incorpora a su estructura a lo largo de la etapa coaxial. La evidencia de puntos calientes catódicos o “hot-spots” que se observa en las fotografías de la figura 3-16 y la misma forma “algodonosa” de la lámina en la proximidad

del electrodo central sugieren fuertemente que el aporte de masa estaría estrechamente relacionado a la eyección de masa que se produce en la superficie del cátodo.

Se observa también que en todos los casos estudiados la diferencia entre tener presente o ausente el electrodo barrado externo es mínima. Esto es consistente con la interpretación fluidodinámica de la lámina de corriente como una onda de choque fuerte que, como tal, no reconoce la presencia de un obstáculo en su recorrido hasta alcanzarlo.

4.3 Discusión sobre los anchos de la lámina de corriente

La figura 4-15 presenta la evolución en el tiempo de los anchos temporales de la lámina de corriente para la configuración en la cual el electrodo central es el cilindro de titanio (ánodo de la descarga), el circuito eléctrico empleado es RLC3, el gas es hidrógeno, y está ausente el electrodo barrado externo. Dado que la cinemática de la lámina de corriente en esta configuración, y para los rangos de presiones de hidrógeno que se utilizan en ella (1 – 10.5 mbar), es indistinguible experimentalmente de una lámina que se mueve a velocidad constante, los anchos temporales son proporcionales a los anchos espaciales de la lámina de corriente.

La evidencia experimental sugiere fuertemente que la lámina se comprime durante la etapa coaxial. Éste es un resultado que no resulta sencillo conciliar con los modelos teóricos presentes en la literatura.

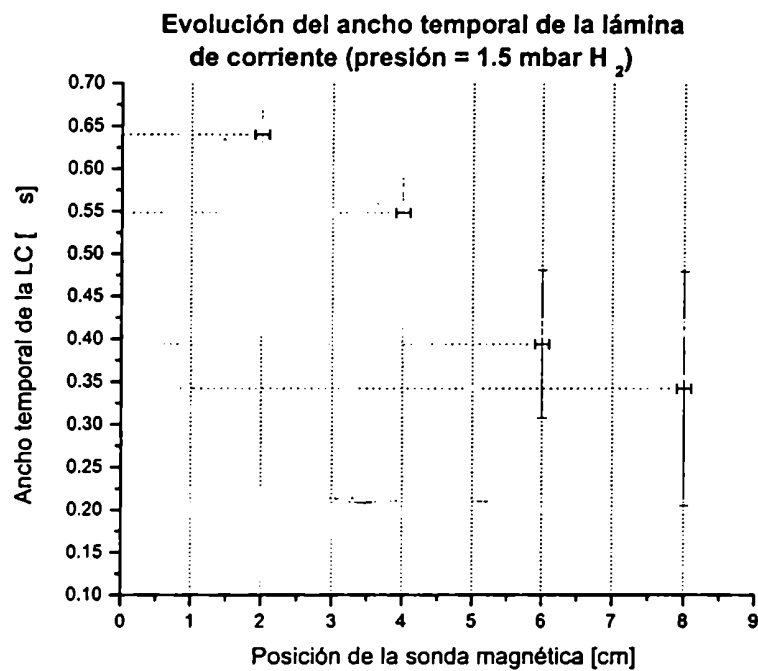


Figura 4-15: Evolución en el tiempo de los anchos temporales de la lámina de corriente para una configuración con electrodo central de titanio, gas hidrógeno, circuito eléctrico RLC3 y ausencia del electrodo barrado externo.

4.4 Discusión sobre la estructura de la lámina de corriente

4.4.1 La lámina de corriente como onda de choque

La tabla 4-1 muestra velocidades representativas de la lámina de corriente y los correspondientes números de Mach (velocidad representativa / velocidad local del sonido) para las distintas configuraciones estudiadas en esta tesis (en el caso de los circuitos RLC1 y RLC2 el gas empleado es nitrógeno, mientras que es hidrógeno para el caso del circuito RLC3). Debe recordarse aquí que la velocidad del sonido es en esencia una función de la temperatura del gas y que el gas en reposo se encontraba a temperatura ambiente ~ 300 K[1]. En la tabla citada puede apreciarse que en todos los casos estamos en presencia de estructuras que se desplazan a velocidades varias veces superiores a la velocidad local del sonido, es decir ondas de choque fuertes.

	1 mbar	1.5 mbar	5.5 mbar	10.5 mbar
RLC1 velocidad lámina (cm/ μ s)	$0.55 \pm .05$	$0.51 \pm .05$	$0.35 \pm .05$	$0.29 \pm .05$
RLC1 número de Mach	15.6 ± 1.4	14.4 ± 1.4	10 ± 1.4	8.2 ± 1.4
RLC2 velocidad lámina (cm/ μ s)	$1.33 \pm .05$	$1.25 \pm .05$	$0.88 \pm .05$	$0.72 \pm .05$
RLC2 número de Mach	37.7 ± 1.4	35.4 ± 1.4	24.9 ± 1.4	20.4 ± 1.4
RLC3 velocidad lámina (cm/ μ s)	$12.8 \pm .2$	$12.1 \pm .2$	$7.9 \pm .3$	$6.7 \pm .2$
RLC3 número de Mach	97 ± 2	92 ± 2	60 ± 2	51 ± 2

Tabla 4-1 Velocidades y números de Mach de las láminas de corriente

4.4.2 Emisión de luz y campo magnético en la lámina de corriente

La posibilidad de obtener simultáneamente fotografías de la lámina de corriente y señales de las sondas magnéticas permite intentar una exploración de la estructura espacial de la lámina. Dado que se conoce el tiempo al que se obtiene cada fotografía mediante un pulso de tensión que el convertidor de imágenes entrega al experimentador en simultáneo con la apertura de su obturador óptico de alta tensión (este pulso es denominado pulso de monitor y su ancho temporal es típicamente ~ 100 ns), y que esta señal junto con las que entregan las sondas magnéticas son registradas con el osciloscopio digitalizador, resulta que si se logra obtener fotografías en las cuales la lámina de corriente se halle en el umbral de ser perforada por las sondas magnéticas existe la posibilidad de determinar (dentro de las incertezas experimentales) qué evento se produce primero: la detección de campo magnético por parte de la bobina sensora de la sonda (el borde externo de sus espiras se halla ~ 1.5 mm dentro del cuerpo de la sonda magnética) o el arribo de la zona luminosa de la lámina de corriente a la posición de la sonda magnética. Siguiendo estas ideas se presentan a continuación pares de fotografías y señales de sonda magnética simultáneas para los tres circuitos eléctricos utilizados (RLC1, RLC2 y RLC3).

Dado que el pulso de monitor es extremadamente breve para las escalas temporales de los circuitos RLC1 y RLC2 se construyó un circuito electrónico que genera una señal escalón TTL en respuesta al pulso de monitor. Es esta señal escalón (el cual presenta un retraso de ~ 200 ns respecto del pulso de monitor) la que permitirá identificar el tiempo al que se produjo la fotografía cuando se utilicen los circuitos RLC1 y RLC2.

Las figuras 4-16 y 4-17 muestran la fotografía y las señal de sonda magnética y el pulso de monitor correspondientes a una configuración en la que se empleó el circuito RLC1, electrodo central de titanio (cátodo), gas nitrógeno y ausencia de electrodo barrado externo. Las figuras 4-18 y 4-19 presentan la fotografía la señal de sonda magnética y el pulso de monitor para una configuración análoga excepto en que el electrodo central es aquí el ánodo de la descarga.



Figura 4-16: Fotografía de la lámina de corriente al ser perforada por las sondas magnéticas S1 (derecha) y S2 (izquierda) para una configuración que utiliza el circuito RLC1, electrodo central de titanio (cátodo), gas nitrógeno y ausencia del electrodo barrado externo.

En las figuras 4-20 y 4-21 pueden apreciarse la fotografía, la señal de sonda magnética y el pulso de monitor correspondientes para una configuración en la que se utilizó el circuito RLC2, electrodo central de titanio (cátodo), gas nitrógeno y ausencia del electrodo barrado externo. En las figuras 4-22 y 4-23 se encuentran la fotografía, la señal de sonda y el pulso de monitor correspondientes para una configuración análoga excepto en que el electrodo central es aquí el ánodo de la descarga.

Las figuras 4-24 y 4-25 ilustran también fotografías, señales de sonda magnética y pulsos de monitor correspondientes para una configuración en la que se empleó el circuito RLC3, electrodo central de titanio (ánodo), gas hidrógeno y ausencia del electrodo barrado externo.

Las fotografías y señales de tensión presentadas permiten concluir que para el caso en el que el electrodo central es el ánodo de la descarga la sonda magnética detecta campo magnético delante de la región luminosa (y esto ocurre para los tres circuitos eléctricos externos estudiados). Las fotografías y señales de tensión que corresponden al caso en el que el electrodo central es el cátodo de la descarga muestran en cambio que

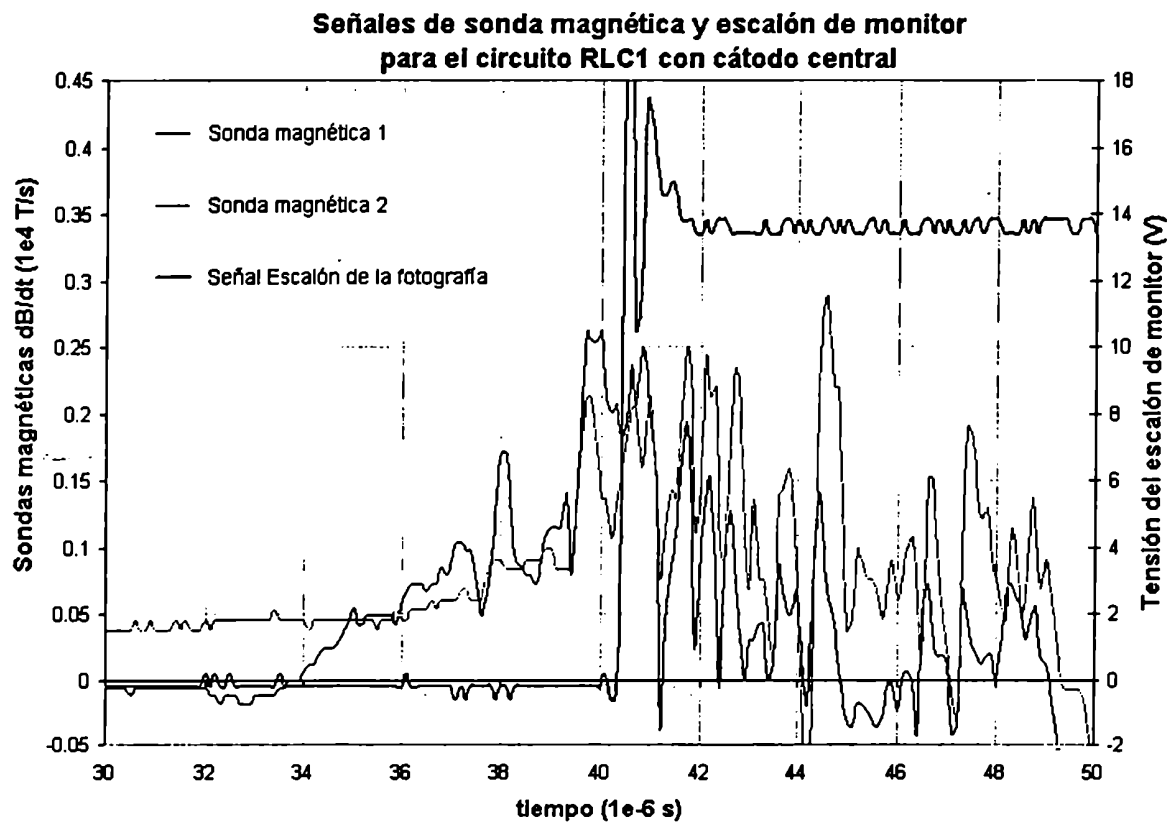


Figura ~4-17: Señales de sondas magnéticas y señal escalón de monitor que corresponden a la fotografía de la figura 4-16



Figura 4-18: Fotografía de la lámina de corriente al ser perforada por las sondas magnéticas S1 (derecha) y S2 (izquierda) para una configuración que utiliza el circuito RLC1. electrodo central de titanio (ánodo), gas nitrógeno y ausencia del electrodo barrado externo.

el campo magnético y la zona luminosa ocurren simultáneamente (dentro de la incerteza experimental).

En el primer caso (ánodo central) los resultados apoyan la idea, que no esta presente en la literatura, de una lámina de corriente que posee en su estructura una región oscura en la cual habría una fuerte presencia del campo magnético.

En el segundo caso la dificultad para determinar el mismo contorno de la lámina de corriente (dada su forma irregular) es determinante e impide sacar más conclusiones.

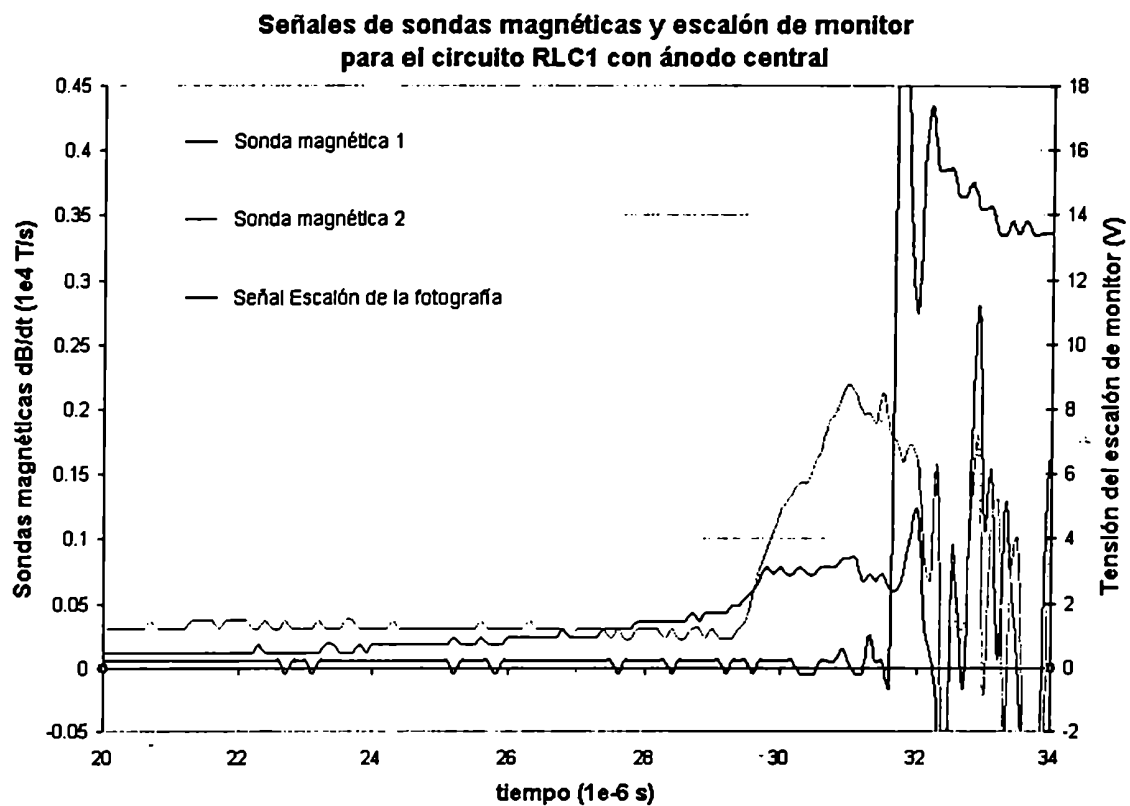


Figura 4-19: Señales de sondas magnéticas y señal escalón de monitor que corresponden a la fotografía de la figura 4-18

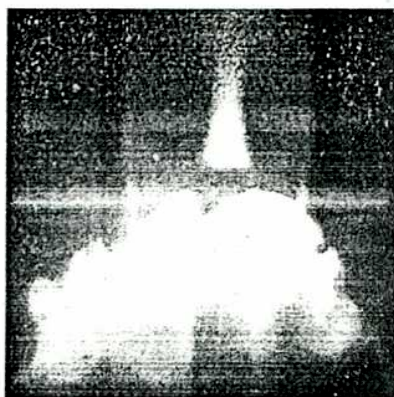


Figura 4-20: Fotografía de la lámina de corriente al ser perforada por las sondas magnéticas S1 (derecha) y S2 (izquierda) para una configuración que utiliza el circuito RLC2. electrodo central de titanio (cátodo), gas nitrógeno y ausencia del electrodo barrado externo.

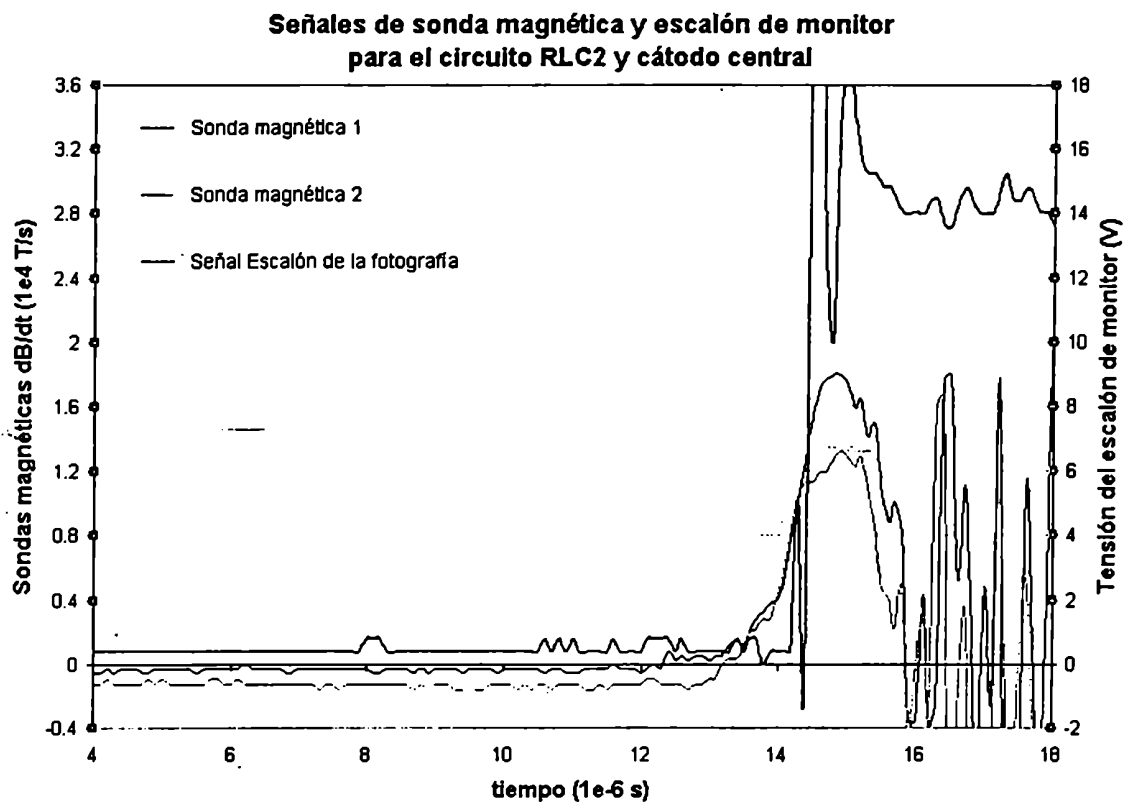


Figura 4-21: Señales de sondas magnéticas y señal escalón de monitor que corresponden a la fotografía de la figura 4-20



Figura 4-22: Fotografía de la lámina de corriente al ser perforada por las sondas magnéticas S1 (derecha) y S2 (izquierda) para una configuración que utiliza el circuito RLC2. electrodo central de titanio (ánodo), gas nitrógeno y ausencia del electrodo barrado externo.

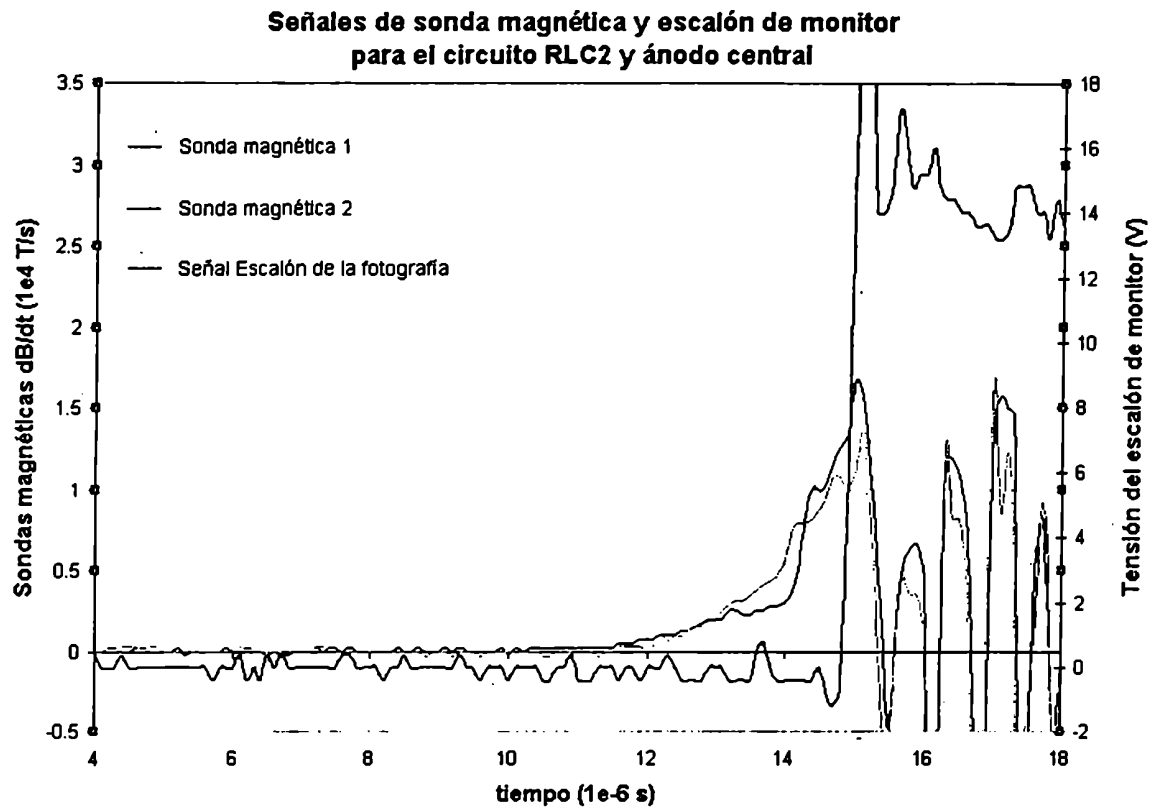


Figura 4-23: Señales de sondas magnéticas y señal escalón de monitor que corresponden a la fotografía de la figura 4-22

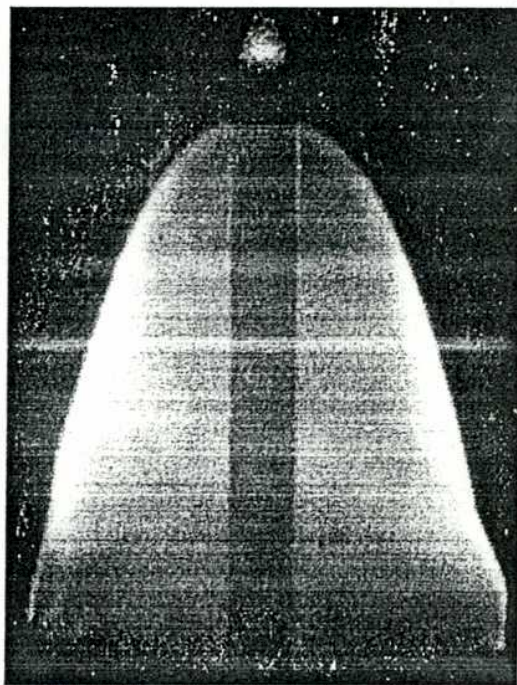


Figura 4-24: Fotografía de la lámina de corriente al ser perforada por las sondas magnéticas S1 (derecha) y S2 (izquierda) para una configuración que utiliza el circuito RLC3. electrodo central de titanio (ánodo), gas hidrógeno y ausencia del electrodo barrado externo.

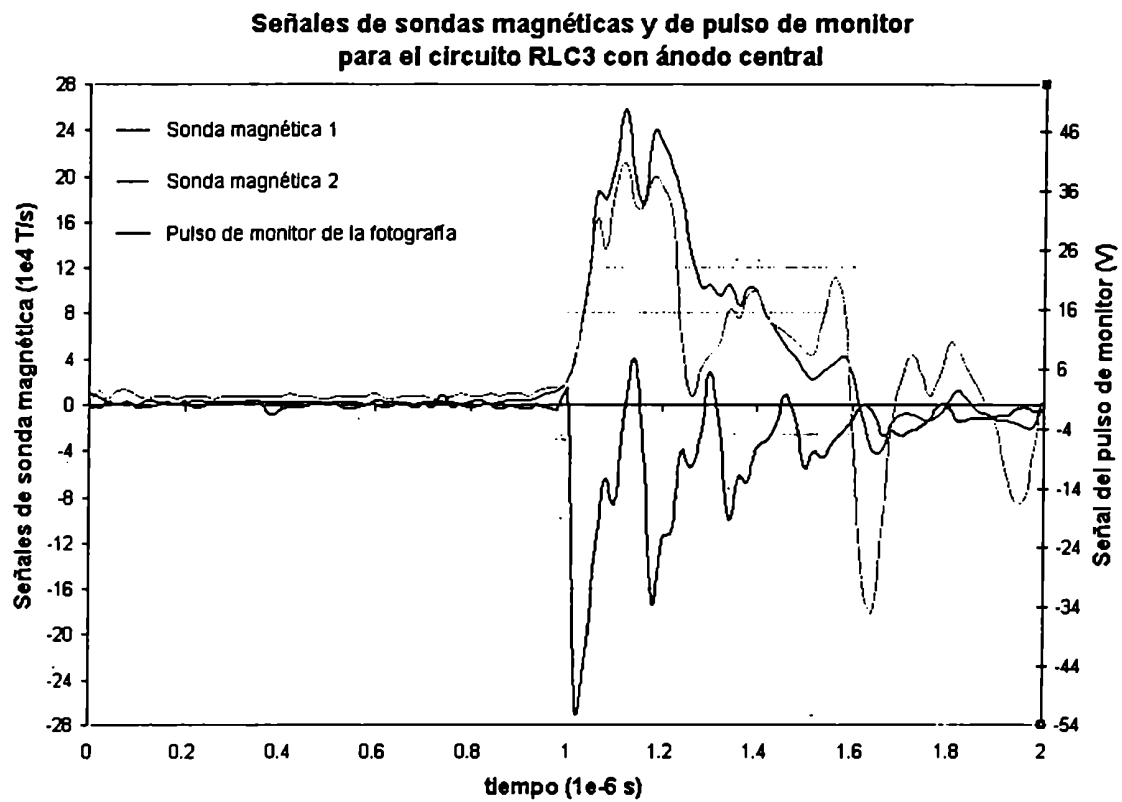


Figura 4-25: Señales de sondas magnéticas y pulso de monitor que corresponden a la fotografía de la figura 4-24

Capítulo 5

Aplicaciones tecnológicas de las descargas coaxiales pulsadas

Es en las posibles aplicaciones tecnológicas que se vislumbran para las descargas coaxiales pulsadas donde éstas despiertan el máximo interés en la comunidad científica y en la industria.

Originalmente utilizadas como gatillos de bombas de hidrógeno por la anterior Unión Soviética y por los Estados Unidos durante la década del 60', estas descargas sorprenden por su capacidad para producir intensos pulsos de radiación no contaminante en tiempos muy cortos (~ 100 ns), por su potencial versatilidad, compacidad y portabilidad. Estas características las transforman en una seria promesa para realizar actividades de exploración por radiación (radiografías, tomografías, detección de sustancias, etc.) en los más diversos ambientes (comerciales, industriales, etc., enfatizando : “fuera del laboratorio”).

No pueden obviarse sin embargo las dificultades de diseño intrínsecas que deben enfrentarse y resolverse para adaptar estos equipos a aplicaciones concretas. Entre ellas vale citar:

- se debe emplear alta tensión (20 kV - 40 kV) tanto para energizar la descarga como para dispararla, con todas las restricciones que esto implica para la seguridad de los usuarios,

- la necesidad de contar con una atmósfera de baja presión del gas o gases de trabajo y de renovar el gas tras varias descargas (esto típicamente implica el uso de un sistema de vacío y de gases comprimidos),
- el gas sobre el que gira la tecnología actual es D_2 , un gas costoso que no se envasa comprimido en el país,
- es necesario extremar las características de diseño para minimizar la inductancia del conexionado eléctrico,
- la necesidad de compactar las dimensiones del equipo para hacerlo portable pero sin permitir que la consecuentemente aumentada interacción del plasma producido con el recinto que contiene a los electrodos degrade las características y la regularidad de la radiación producida (por ejemplo a través de la contaminación del plasma con impurezas abladas en las paredes de la cámara de descargas).

Como puede apreciarse en esta tesis (y en este capítulo en particular) todas estas dificultades fueron superadas en un entorno de laboratorio con la construcción del prototipo GN1.

Frente a las dificultades mencionadas, y para balancear la discusión, es también innegable que no existe hoy en día en la comunidad científica internacional ninguna otra tecnología que rivalice con las aptitudes de las descargas coaxiales pulsadas para la construcción de una fuente de radiación portátil.

En este capítulo, a modo de corolario de la investigación realizada, se exponen las aplicaciones tecnológicas exploradas en esta tesis. Ellas son:

- radiografías no convencionales de piezas metálicas,
- tomografías X de piezas metálicas,
- detección de agua.

Finalmente se concluye el capítulo con una breve reseña acerca de las futuras ramas de investigación que se consideran actualmente más promisorias.

5.1 Radiografías

El gran poder de penetración (energía media por fotón estimada $\gtrsim 50$ keV para cada descarga) y la extremadamente corta duración del pulso de radiación X (los pulsos de radiación X producidos por el equipo GN1 al ser observados con el sistema centellador-fotomultiplicador presentan un ancho a mitad de altura de ~ 50 ns[11]) hacen de las descargas coaxiales pulsadas obtenidas con el equipo GN1 candidatos únicos para la obtención de radiografías no convencionales (radiografías de piezas metálicas, de piezas en movimiento, etc.).

La calidad y el nivel de detalle que se han logrado obtener en estas radiografías con simples configuraciones de laboratorio pueden apreciarse en las figuras siguientes. La configuración experimental es la discutida en el capítulo 2. Con objeto de aumentar la definición de las radiografías se colocó el objeto a radiografiar a la mínima distancia de la película sensible a la radiación X.

La figura 4-1 muestra la radiografía de un bloque sólido de aluminio ($1.56 \times 1.56 \times 4.93$ cm³) con un tornillo de bronce 1/4-20 (con 6.35 mm de diámetro y 20 hilos por pulgada en la rosca) introducido en su interior. También se observan con notable claridad los hilos del agujero roscado lateral. Esta radiografía se obtuvo con la exposición de las piezas a la radiación X de una sola descarga.

La figura 4-2 contiene uno de las mejores radiografías logradas con el equipo GN1. En ella se observa un conector BNC tipo 'T' de acero inoxidable. Nuevamente la radiografía se obtuvo empleando una sola descarga. Es notable el nivel de detalle con el que pueden verse los contactos internos del conector.

La figura 4-3 presenta la radiografía (obtenida con una sola descarga) de un conector BNC tipo 'codo' de acero inoxidable.

La figura 4-4 ilustra la radiografía (obtenida con una sola descarga) de un transistor de potencia. Los contactos que se observan están encapsulados en bronce.

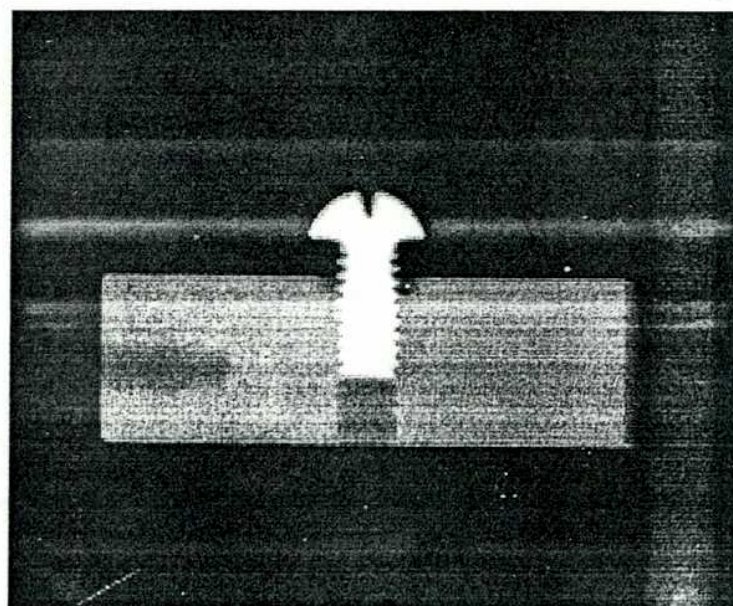


Figura 5-1: Radiografía de un bloque sólido de aluminio ($1.56 \times 1.56 \times 4.93 \text{ cm}^3$) con un tornillo de bronce 1/4-20 (con 6.35 mm de diámetro y 20 hilos por pulgada en la rosca) introducido en su interior. También se observan con notable claridad los hilos del agujero roscado lateral.

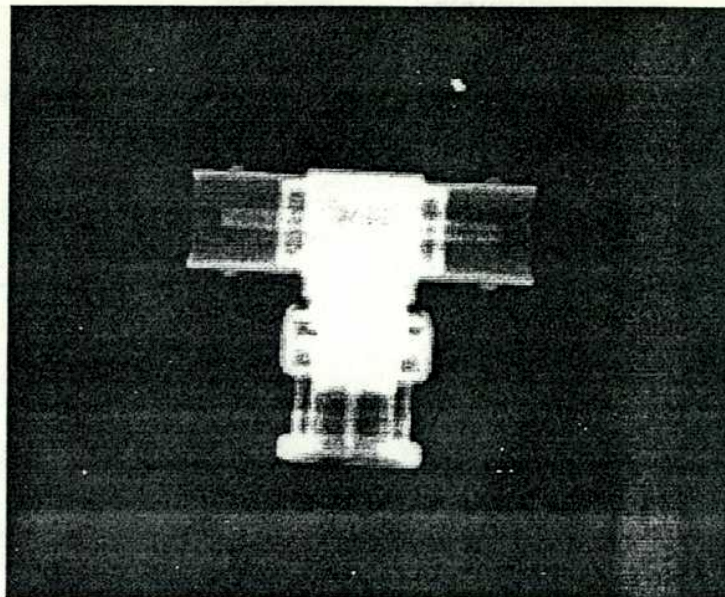


Figura 5-2: Radiografía de un conector BNC tipo 'T'. Notar la estructura interna y su definición.

5.2 Tomografías

El paso siguiente consistió en radiografiar un mismo objeto (el objeto elegido fue un conector BNC tipo 'codo') en diferentes posiciones angulares respecto a un mismo eje de rotación que atraviesa el objeto. Para esto se ubicó al objeto a ~ 5 cm de la película sensible a la radiación X, permitiendo de esta forma su rotación. Se tomaron un mínimo de 2 a 3 radiografías (de una descarga cada una) para cada posición angular de la pieza. La figura 4-5 contiene las radiografías correspondientes a las 8 posiciones angulares elegidas en las que se colocó el conector BNC tipo 'codo'. Procesando estas imágenes mediante un código desarrollado en el Instituto de sistemas de la Universidad del Centro de la provincia de Buenos Aires (ISISTAN, Tandil) se obtuvo la reconstrucción del objeto. La figura 4-6 ilustra 4 posibles vistas del objeto reconstruido.

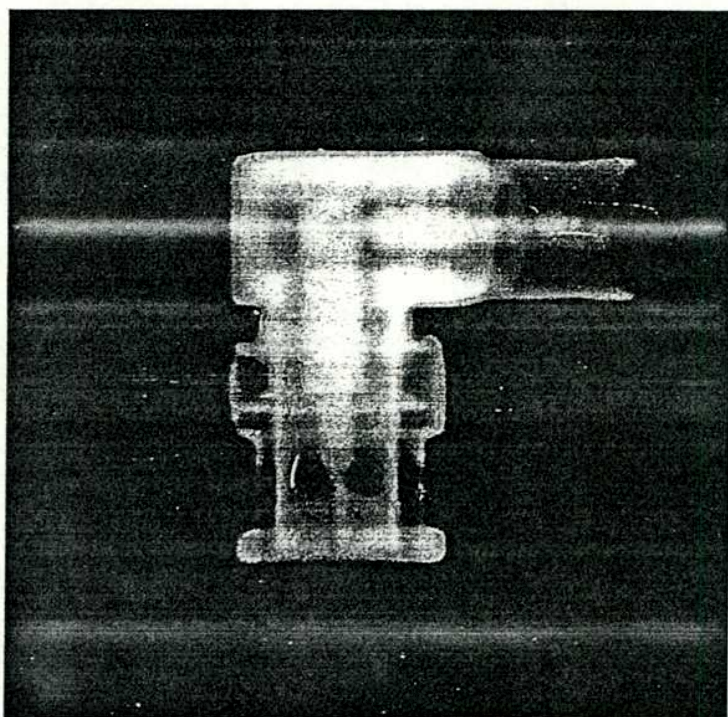


Figura 5-3: Radiografía de un conector BNC tipo 'codo'. Notar su estructura interna.

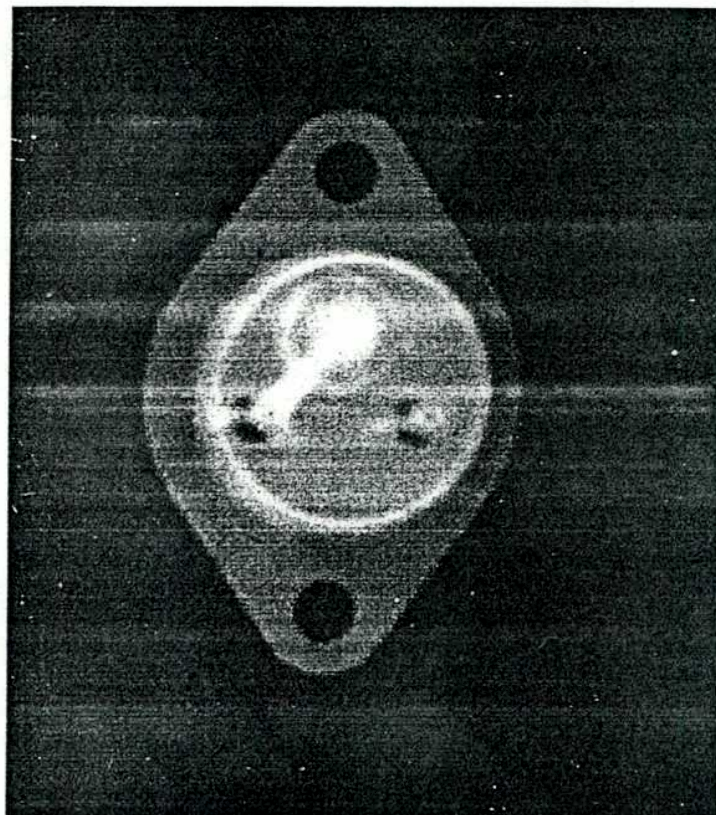


Figura 5-4: Radiografía de un transistor de potencia obtenida con el equipo GN1 (empleando una sola descarga). Los contactos internos que se observan están encapsulados en aluminio.

Radiografías de la pieza para distintas posiciones angulares

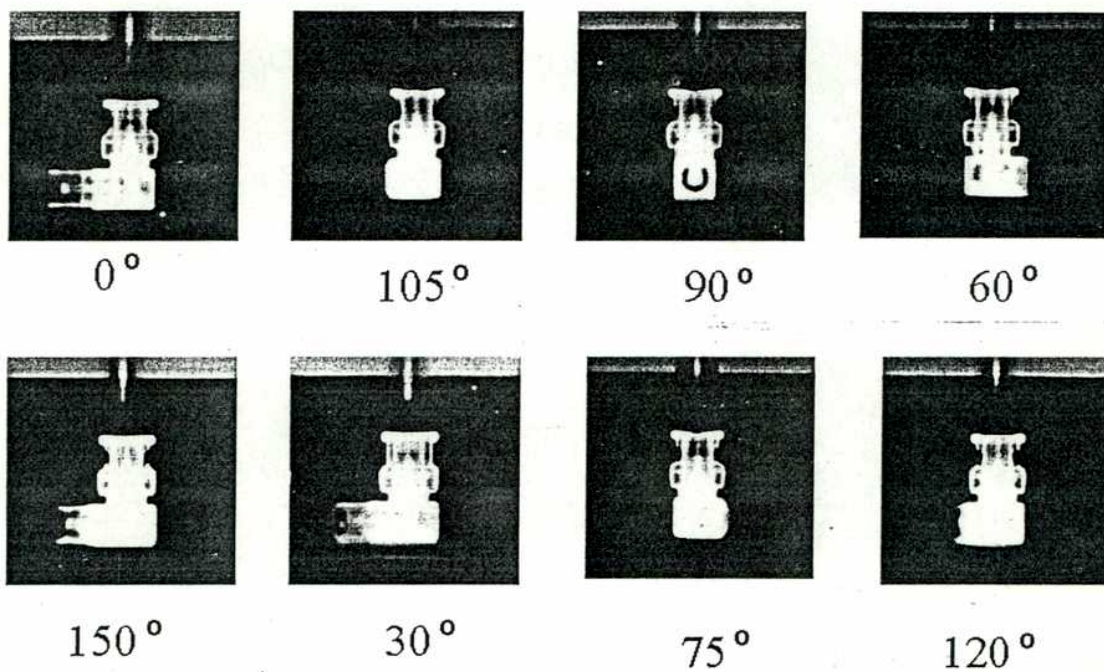


Figura 5-5: Detalle de las radiografías de las 8 posiciones angulares del conector BNC tipo 'codo' con el cual se realizó la tomografía.

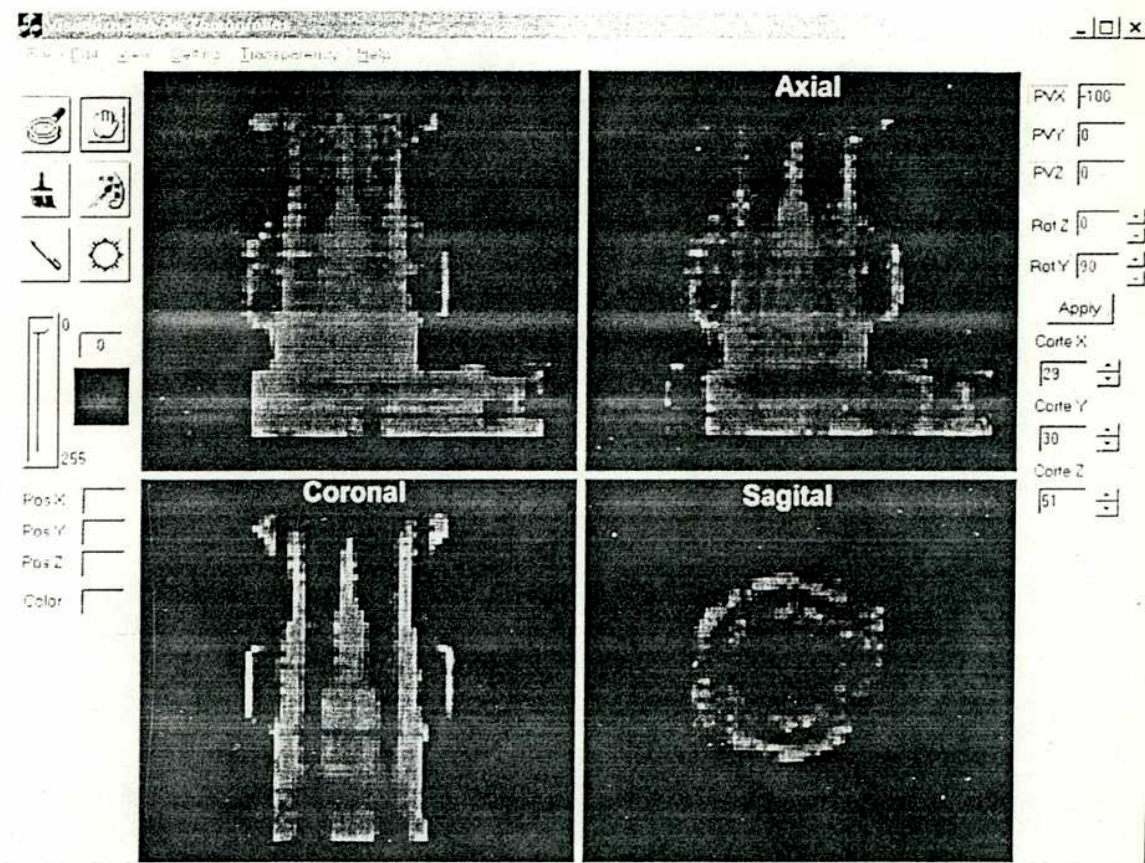


Figura 5-6: Vistas de la reconstrucción virtual tomográfica del conector BNC tipo 'codo' tal como son presentadas por el software desarrollado en el ISISAN.

5.3 Detección de agua

La detección de agua se derivó de las experiencias realizadas para determinar la anisotropía del flujo neutrónico que produce el equipo GN1, en ellas se determinó que en el rango de presiones 3 mbar - 6 mbar el flujo neutrónico emitido frontalmente es $\sim 40\%$ mayor que el flujo neutrónico emitido hacia los lados[13].

Para realizar la detección de agua se ubicaron el detector de referencia y el detector cilíndrico (sensible a los neutrones termalizados) como se describe en la figura 2-30, se realizó una serie de disparos y se midieron los conteos de cada detector simultáneamente en ausencia de los bidones de agua. Luego se ubicaron los bidones de agua a ambos lados del detector cilíndrico y se repitió la misma rutina de disparos.

Con los resultados obtenidos se graficaron los conteos del detector cilíndrico en función de las cuentas del detector de referencia, para cada disparo de la serie. El resultado se puede ver en la figura 4-7. Dado que la incerteza por lectura de los conteos en esta figura es despreciable respecto a la separación entre los grupos de puntos experimentales que pertenecen a una y otra experiencia, es claro que la diferencia de las pendientes de las rectas halladas es una medida de la presencia de agua en la proximidad del detector cilíndrico.

5.4 Futuras aplicaciones

Si bien las aplicaciones tecnológicas que se muestran en esta tesis representan en si mismas un interesante avance y alientan a continuar el estudio de estos equipos, es evidente que aun queda mucho por hacer para aprovechar en forma apreciable su potencial.

Cuando se plantean los posibles rumbos que el desarrollo de estos equipos podría tomar en un futuro próximo aparece la dicotomía e insalvable complementariedad de avanzar en la investigación básica de los fenómenos que dan origen a la radiación en estas descargas, o dedicarse a optimizar y adaptar sus productos para finalmente poder brindar aplicaciones (servicios) eficientes. Es en el marco de la interrelación entre estas dos

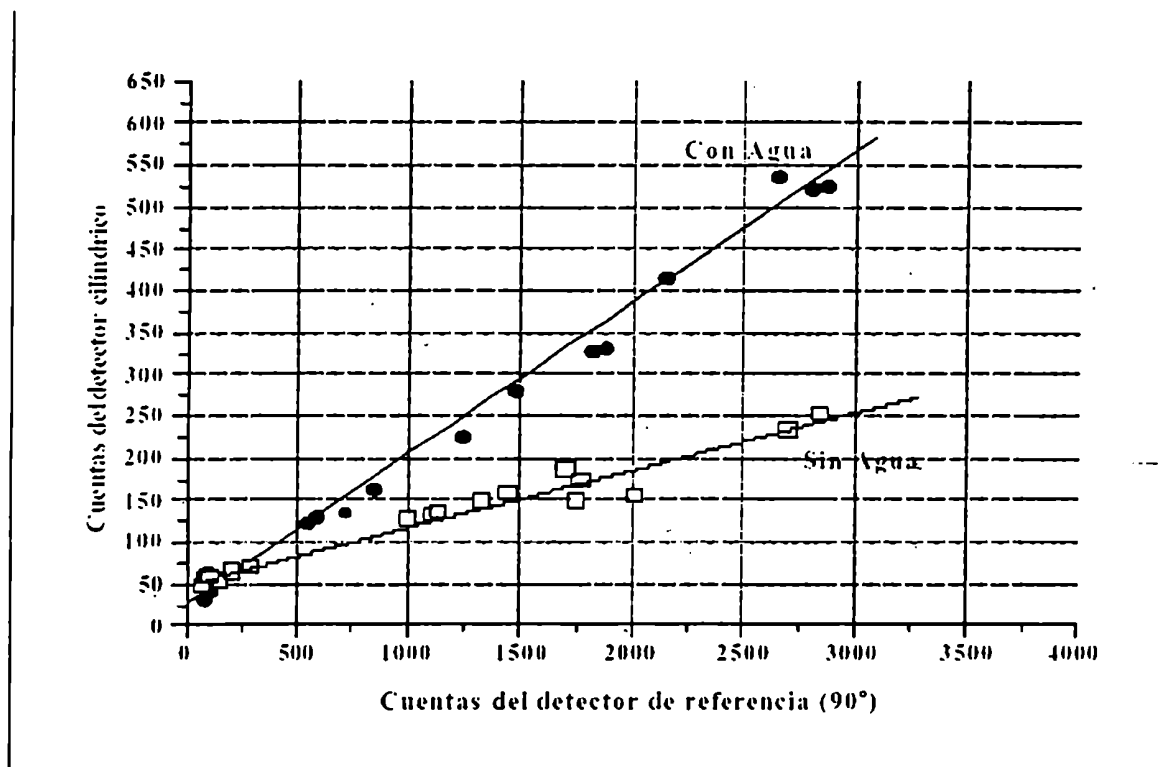


Figura 5-7: Gráfico de las cuentas obtenidas por el detector cilíndrico en función de las cuentas obtenidas por el detector de referencia cuando alrededor del primero se ubicaba una masa importante de agua (~ 80 l) y cuando esta masa era retirada. Debe recordarse que 1000 cuentas en el escalímetro equivalen aproximadamente a $1e8$ neutrones.

tendencias que se comentan a continuación las tareas que hoy resultan más promisorias para desarrollar futuras aplicaciones tecnológicas de las descargas coaxiales pulsadas:

- Desarrollar un equipo compacto y portable: cuan importante es el compromiso entre la intensidad de neutrones y radiación X de la que se desea disponer y la compacidad / portabilidad / seguridad del usuario.
- Realizar la caracterización del espectro de rayos X que produce el GN1: estimaciones sugieren que la radiación que se produce en este equipo excede los 300 keV.
- Estudiar los resultados al emplear mezclas de gases: es conocido en la literatura que la introducción de gases nobles, argón en particular, aumenta la capacidad de los cañones coaxiales pulsados de plasma para producir radiación X.
- Obtener radiografías de piezas en movimiento: sabemos que la escala de los μs está al menos tres órdenes por debajo de lo que llamaríamos escala de los movimientos mecánicos (0.1 - 1 ms) y que por lo tanto cualquier pieza mecánica en movimiento debería ser virtualmente congelada en el tiempo al ser radiografiada por el flash de radiación que producen estos equipos.
- Detección de otras sustancias hidrogenadas con pulsos de neutrones: es claro que en virtud del scattering privilegiado que ofrecen al pulso de neutrones rápidos del GN1, la presencia de sustancias hidrogenadas como el agua en la proximidad de los detectores pueden ser puesta en evidencia.

Capítulo 6

Resumen General y Conclusiones

Discutamos primero las conclusiones relacionadas con el aspecto más académico de los fenómenos que ocurren en las descargas coaxiales pulsadas de plasma, en primer lugar llaman la atención las diferencias que introduce el hecho de cambiar la polaridad del electrodo central en el equipo CCII para las tres configuraciones estudiadas (circuitos externos RLC1, RLC2 y RLC3).

Estas diferencias que se expresan contundentemente en los puntos experimentales de la cinemática de la lámina de corriente, se observan también con claridad en las fotografías del plasma generado. La lámina de corriente que se crea en presencia de un cátodo central resulta notablemente más lenta que la lámina creada en presencia de un ánodo central, y presenta una forma poco definida en la interfaz lámina-gas en reposo. Su forma, que es difícilmente reproducible de descarga a descarga, su textura e irregularidad nos han motivado a calificarla como ‘algodonosa’. La lámina de corriente que se crea en presencia de un ánodo central posee una interfaz lámina-gas en reposo muy bien definida y obedece notablemente bien las ecuaciones de movimiento que predice el modelo de Gratton-Vargas (debe notarse aquí que los ajustes entre el modelo teórico mencionado y los datos experimentales incluyen a 3 gases distintos: N_2 , H_2 y Ar, y a los tres pulsos de corriente estudiados).

Una distinción adicional entre ambas láminas se encuentra en el ángulo de contacto

que se produce entre la lámina de corriente y el electrodo central. Asumiendo que el ángulo al que nos referimos es aquél que mediríamos en la región que ya ha sido atravesada por la lámina de corriente, se encuentra que en el caso de una lámina creada con cátodo central este ángulo es mayor a 90° en tanto que para una lámina creada con ánodo central, es menor a 90° .

Se hace evidente la necesidad de incluir otros factores en la descripción de la dinámica de la lámina de corriente que se origina en presencia de un cátodo central. De los resultados experimentales obtenidos y de la observación concreta de puntos calientes catódicos en la superficie del electrodo central se desprende la posibilidad de que estos nuevos factores puedan simplemente modelarse como una nueva fuente de masa para la lámina de corriente (adicional al gas que la lámina embiste, ioniza e incorpora a su estructura, la única fuente de masa que considera el modelo original de Gratton-Vargas) cuyo origen estaría en la incorporación a la lámina del material eyectado desde la superficie del cátodo. Surge naturalmente ante esta propuesta la pregunta de por qué este fenómeno resultaría relevante en el caso de un cátodo central e irrelevante en el caso de un ánodo central si para ambos la corriente que circula es esencialmente la misma. Esta tesis sostiene que al menos una parte de la explicación estaría basada en las características de los diferentes flujos de portadores de corriente que recibe el electrodo central en cada caso. En el caso de un cátodo central se recibe un flujo iónico cuya capacidad para arrancar material de la superficie del electrodo central por efecto termoelectrónico o sputtering resulta mucho mayor que la del flujo electrónico análogo.

En segundo lugar, y al margen de las diferencias ya citadas que introduce el cambio de la polaridad de los electrodos, se confirma el hecho de que la lámina de corriente que tiene la mayor fuerza impulsora desarrolla una forma más definida y una cinemática experimental con menor dispersión.

En tercer lugar se destacan dos resultados obtenidos, la disminución del ancho de la lámina de corriente a medida que se desplaza en su etapa coaxial y la evidencia de que la lámina de corriente posee inmediatamente después del frente de choque una región oscura

con presencia de campo magnético (detrás de la cual se ubicaría la zona luminosa).

En cuarto lugar se señala la presencia de la pluma de plasma en el extremo libre del electrodo central (independientemente de su polaridad) como uno de las características de construir electrodos centrales de pequeño diámetro (~ 1 cm) en cañones coaxiales de plasma.

En relación con las aplicaciones tecnológicas realizadas y sus características debemos destacar que se obtuvieron radiografías de piezas metálicas de alta calidad y un gran nivel de detalle, que se desarrolló un método para realizar tomografías con las que se obtienen imágenes digitales de los objetos radiografiados y que se demostró la factibilidad de emplear cañones coaxiales pulsados de plasma para detectar agua. Estas aplicaciones concretas se presentan con la intención de convencer al lector del impacto tecnológico latente en las descargas coaxiales pulsadas de plasma.

Bibliografía

- [1] L.Landau, E. Lifchitz, *Mécanique des fluides* (Editorial MIR, segunda edición, 1989)
- [2] 'Instrumentos para medir magnitudes eléctricas durante una descarga rápida en un plasma'. Bruzzone H., Fantino A., Kelly H., Medwid A., Molina J., Pais V. y Pouzo J.. Informe interno, Laboratorio de Física del Plasma UBA-CONICET, 1973. Ti: 4/73.
- [3] "Detección de corrientes de pérdida en un equipo Plasma Focus mediante sondas magnéticas de tamaño finito". Moreno C.. Tesis Doctoral. Departamento de Física, Facultad de Ciencias, Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires (1995).
- [4] 'Diseño, construcción y análisis de divisores resistivos para medir pulsos rápidos de alta tensión'. Bruzzone H., Jaroszewicz S., Martínez J. F. y Sardón M.. 83° Reunión Nacional de Física, La Plata (1998).
- [5] 'Detección de neutrones en un equipo Plasma Focus por el método de plata activada'. Dellelis R.. Tesis de licenciatura. Departamento de Física, Facultad de Ciencias, Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires (1976).
- [6] 'Magnetic probe resolution'. Malmberg J. H.. Rev. Sci. Instrum., 35, pp. 1622-3, 1964.
- [7] 'Un modelo bidimensional analítico para el Plasma Focus'. Vargas J. M.. Tesis de Licenciatura, Departamento de Física, Facultad de Ciencias, Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires (1976).

- [8] 'On the boil-off time of probe surfaces in plasmas'. Fuentes N. and Gratton F. T. L.. IEEE Trans. on Plasma Sci., PS-14, (5), pp. 575-8, 1986.
- [9] 'Magnetic field propagation across a weakly conducting layer'. Gratton F. T. L. and Fuentes N.. IEEE Trans. on Plasma Sci., PS-14,(3), pp. 240-5, 1988.
- [10] Cinemática y dinámica de ondas de choque curvadas ionizantes, Lazarte A., Di Lorenzo F., Martínez J. F., Clausse A., Moreno C., Anales de la 87° Reunión Nacional de Física, AFA2002, Córdoba (2002).
- [11] "Obtención de imágenes introspectivas de objetos metálicos ". Moreno C., Clausse A., Vénere M., Martínez J. F., Barbuzza R., Del Fresno M., Llovera R., Tartaglione A. y Jaroszewicz S.. Anales de la 87° Reunión Nacional de Física, AFA, Córdoba (2002).
- [12] "Métodos no intrusivos para detectar sustancias mediante pulsos de neutrones". Llovera R., Tartaglione A., Di Fiori N., Clausse A., Moreno C.. Anales de la 87° Reunión Nacional de Física, AFA, Córdoba (2002).
- [13] "Propiedades y aplicaciones de la radiación de neutrones y rayos X emitida por un plasma denso magnetizado". Tartaglione A. y Llovera R.. Informe final de Laboratorio 6 y 7. Departamento de Física, Facultad de Ciencias, Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires (Agosto de 2000).
- [14] Filippov N. V., Filippova T. I., and Vinogradov V. P.. Nuclear Fusion Supp, Part 2, p. 577, 1962.
- [15] Mather J. W., Phys. Fluids, Suppl. 7, pp. 5-28, 1964.
- [16] 'Fundamentals of plasma physics', Bittencourt J. A., 'Fundamentals of plasma physics', FAPESP, second edition (1995).

- [17] 'Estructura de la lámina de corriente en equipos Plasma Focus'. Grondona D. E.. Tesis de Doctorado en Física, Departamento de Física, Facultad de Ciencias, Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires (1994).
- [18] Rosenbluth M. and Garwin R.. Technical Report, Los Alamos Scientific Laboratory, 1954. LA-1850.
- [19] 'Estudio de descargas Plasma Focus por medio de diagnósticos ópticos'. Bilbao L.. Tesis de Doctorado en Física, Departamento de Física, Facultad de Ciencias, Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires (1983).
- [20] 'Haces de iones en un Plasma Focus. Caracterización experimental y mecanismos de emisión'. Márquez A. B.. Tesis de Doctorado en Física, Departamento de Física, Facultad de Ciencias, Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires (1994).
- [21] 'Modelo de una descarga eléctrica en un equipo Plasma Focus incluyendo efectos de tiempo de tránsito finito'. Moreno C.. Tesis de Licenciatura en Física, Departamento de Física, Facultad de Ciencias, Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires (1989).
- [22] 'Conceptual engineering of Plasma Focus thermonuclear pulsors'. Moreno C., Bruzzone H., Martínez J. F., Clausse A.. IEEE Trans. on Plasma Sci., 28 (5) 1735-1741. October (2000).
- [23] 'Descargas z-pinch en distintas configuraciones'. Acuña N. H.. Tesis de Doctorado en Física. Departamento de Física, Facultad de Ciencias Exactas de la Universidad de Mar del Plata, Prov. de Bs. As. (2001).
- [24] 'Research on dense Plasma Focus hard X-ray emission with scintillator-photomultiplier and TLD measurements'. Castillo-Mejía F., Milanese M., Moroso M., Pouzo J. O. and Santiago M., 1998 ICPP and 25 EPS Conf. on Contr. Fusion and Plasma Physics. 22 C, 2686 (1998).

- [25] 'Plasma Focus Device'. Decker G. and Wienecke R., *Physica* 82 C, 155-164 (1976).
- [26] 'SXR lithography using a high performance Plasma Focus source'. Lee S., Kudryashov V.m Lee P., Zhang G., Serban A. Liu M., Feng X., Springham S., Wong T. and Selvam C.. 1998 ICPP and 25 EPS Conf. on Contr. Fusion and Plasma Physics, 22 C, 2591 (1998).
- [27] 'High Rep Rate high performance Plasma Focus as a powerful radiation source'. Lee S., Lee P., Zhang G., Feng X., Gribkov V., Liu M., Serban A. and Wong T.. *IEEE Trans. on Plasma Sci.*, 26, 1119 (1998).
- [28] 'Review of one-side approaches to radiographic imaging for detection of explosives and narcotics'. Hussein E. and Waller E.. *Radiation Measurements* 29 (6), 581 (1998).
- [29] 'Sondas neutrónicas para la prospección uranífera: I determinación del grado de mineralización. II determinación de la humedad - factibilidad de la lixiviación in situ'. Bennun L., Korochinski S. A., and Mayer R. E.. 80° Reunión Nacional de Física, San Carlos de Bariloche, 2-6 de Octubre 1995 (Presentación mural).
- [30] 'Applications of fusion and plasma device technology'. Dean S. O. and Poltoratskaya N.. *Plasma Devices and Operators* 4(1), 11-19 (1995).
- [31] 'Dinamics of the Z pinch'. Vikhrev V. V. and Braginskii S. I.. *Reviews of Plasma Physics* 10, 425-517. Ed. Leontovich M. A., Consultants Bureau, New York (1986).
- [32] 'Non-conventional radiographic and tomographic applications of a compact Plasma Focus'. Moreno C., Martínez J. F., Vénere M., Clausse A., Barbuzza R., Del Fresno M.. *Proc. of the Regional Conference on Plasma Research in the 21st Century*, Paosawatyanong B. Editor, Bangkok, Thailand, 61-63, May (2000).
- [33] 'Neutronic detection of water using a compact Plasma Focus'. Moreno C., Llovera R., Tartaglione A., Clausse A.. *Proc. of the Regional Conference on Plasma Research*

in the 21st Century, Paosawatyanong B. Editor, Bangkok, Thailand, 58-60, May (2000).

- [34] 'Using a 4.7 kJ Plasma Focus for introspective imaging of metallic objects and for neutronic detection of water'. Moreno C., Clausse A., Martínez J. F., Llovera R., Tartaglione A., Vénere M., Barbuzza R. and Del Fresno M.. IX Latin American Workshop, La Serena, Chile. H. Chuaqui and M. Favre Editors, AIP Conference Proceedings, 563, 300-305 (2000).
- [35] 'Current distribution during the breakdown in a coaxial electrode system'. Feugeas J. and Von Pamel O.. J. Appl. Phys, 66(3)1080-1083, (1983).
- [36] 'Formation of the plasma layer in a plasma focus device'. Krompholz H., Neff W., Rühl F., Schönbach K., and Herziger G.. Phys. Lett. 77A(4)246-248, (1980).
- [37] 'Coaxial snowplow discharge'. Butler T. D., Jahoda F. C., Marshall J., and Morse R. L.. Phys. Fluids, 12(9)1904, (1969).
- [38] 'Measurements of current sheets in plasmas with a finite-sized magnetic probe'. Bruzzone H., Kelly H. y Moreno C.. Meas. Sci. Technol., 2(12) 1195-1200 (1991).
- [39] 'Magnetic probes of high frequency response'. Segre S. E. and Allen J. E.. Journal of Sci. Instruments, Vol. 37, 369-371, (1960).
- [40] 'High-frequency magnetic measurements using small inductive probes'. Beiersdorfer P. and Clothiaux E. J.. Am. J. Phys., 51(11) 1031-1036, (1983).
- [41] 'Tratamiento de superficies mediante un cañón coaxial de plasma'. Lepone A. F. Tesis de Licenciatura en Física, Departamento de Física, Facultad de Ciencias, Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires (1995).
- [42] 'Plasma Formulary'. Huba J. D.. Supported by the office of the Naval Research Laboratory (2000).

- [43] 'Kinematics and structure of a Plasma Focus current sheath during its radial implosion stage'. Kelly H. and Giudice G.. IEEE Trans. on Plasma Sci. 18(3) 1990.
- [44] 'Structure of a plane and stationary ionizing current sheath'. Bilbao L., Bruzzone H. and Kelly H.. Plasma Phys. and Cont. Fusion, 26(12B) 1984.
- [45] 'Current sheath structures of the Plasma Focus in the rundown phase'. Kuvech K. H., Tou T. Y. and Lee S.. IEEE Trans. on Plasma Sci. 18(5) 1990.