

UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIA

DEPARTAMENTO DE FÍSICA

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PLASMA FOCO  
COMPACTO DE 2 JOULES**

JOSÉ A. PEDREROS MATUS

UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIA

DEPARTAMENTO DE FÍSICA

**“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PLASMA FOCO  
COMPACTO DE 2 JOULES”**

JOSÉ A. PEDREROS MATUS

Profesor Guía:	Dr. Leopoldo Soto N.
Profesor Patrocinante:	Dr. Raúl Labbé M.
Profesores Comisión:	Dr. Ernesto Gramsh L. Dr. Ignacio Olivares B. Dr. Heman Bhuyan

TESIS PARA OPTAR AL TÍTULO PROFESIONAL DE

INGENIERO FÍSICO

SANTIAGO DE CHILE

MAYO DE 2010

# **“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PLASMA FOCO COMPACTO DE 2 JOULES”**

Trabajo de Graduación presentado a la Facultad de Ciencia, en cumplimiento parcial de los requerimientos exigidos para optar al Título profesional de Ingeniero Físico.

UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE CHILE

SANTIAGO DE CHILE

MAYO 2010

**“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PLASMA FOCO COMPACTO DE 2 JOULES”**

JOSÉ A. PEDREROS MATUS

Este trabajo de Graduación fue preparado bajo la supervisión del profesor guía Dr. Leopoldo Soto N., Jefe del departamento de Plasmas Termonucleares de la Comisión Chilena de Energía Nuclear, patrocinado por el Dr. Raúl Labbé M. del Departamento de Física de la Universidad de Santiago de Chile y ha sido aprobado por los miembros de la comisión calificadora, del candidato

.....  
Dr. Ernesto Gramsh L.

.....  
Dr. Ignacio Olivares B.

.....  
Dr. Heman Bhuyan

.....  
Dr. Leopoldo Soto N

.....  
Dr. Raúl Labbé M.

.....  
Director

*A mis Padres...*

# Agradecimientos

Una parte importante a lo largo del proceso de mi educación fueron mis padres y mi hermana, los cuales siempre estuvieron a mi lado con su apoyo y preocupación. Lamentablemente mi padre no me pudo acompañar hasta el final pero aun así se que le habría gustado estar a mi lado al final de este camino.

Quisiera agradecer a María José quien ha estado a mi lado a lo largo de todo este proyecto de titulación brindando su apoyo en todo momento, incluso en los difíciles a lo largo de este trabajo. También quisiera agradecer a mi tío Carlos Esparza por su compañía, apoyo y sobre todo por ser el principal editor de este trabajo.

También fueron importantes en el desarrollo de este trabajo por su contribución directa o indirecta Dr. Leopoldo Soto, quien me recibió y me acogió bajo su tutela en CCHEN durante estos dos años de investigación; el Dr. Cristian Pavéz, por siempre estar dispuesto a ayudar en lo que fuera necesario; al futuro Dr. Ariel Tarifeño, quien me aconsejo repetidas veces sobre mi trabajo; al Sr. Patricio San Martin por ser un buen amigo y además por estar siempre presto a los requerimientos de mi trabajo; al Dr. Felipe Veloso, Dr. José Moreno y a la Srta. Karla Cubillos por toda la ayuda brindada a este trabajo y por último pero no menos importante al Dr. Raúl Labbé por haber aceptado patrocinar y revisar mi trabajo de tesis.

# Resumen

Este trabajo de tesis tiene como finalidad el diseño y las pruebas de construcción de un acelerador de partículas tipo *Plasma Focus (PF)*, que funcionará con una energía almacenada en su banco de condensadores de tan sólo 2 J. El aparato recibe el nombre de PF-2J y funcionara a una tasa de operación óptima de 10 Hz. En el caso el gas de operación es deuterio es posible obtener neutrones provenientes de procesos de fusión nuclear. Lo anterior convierte al aparato en una fuente eléctrica de neutrones —*no radiactiva*— para aplicaciones de campo.

Para garantizar la portabilidad del PF-2J, se impuso sobre su diseño la condición que las dimensiones de la cámara de descarga no debían superar los 5 cm x 5 cm x 5 cm. Además, debía ser desmontable e independiente de los condensadores que almacenan la energía para su funcionamiento. Se requería además que el banco de condensadores fuera liviano y pequeño, con dimensiones que no superaran los 25 cm x 25 cm x 25 cm y una masa inferior a 1 kg.

Posteriormente al diseño del PF-2J, se investigó su funcionamiento con diferentes tamaños y relaciones de aspecto de sus electrodos, aislantes, etc. para determinar las condiciones a las que opera como *plasma focus*, para así finalmente en una etapa posterior optimizar su funcionamiento.

# Índice General

<b>CAPÍTULO 1 GENERACIÓN DE NEUTRONES.....</b>	<b>1</b>
1.1. <i>Fuentes de Berilio .....</i>	2
1.2. <i>Fuente de Fotoneutrones.....</i>	2
1.3. <i>Reacciones Nucleares .....</i>	3
<b>CAPÍTULO 2 REACCIONES NUCLEARES .....</b>	<b>5</b>
2.1. <i>Fisión Nuclear .....</i>	5
2.1.1. <i>Emisión de Neutrones .....</i>	6
2.2. <i>Fusión Nuclear .....</i>	7
2.2.1. <i>Procesos de Fusión.....</i>	9
<b>CAPÍTULO 3 ACELERADORES DE PARTÍCULAS TIPO PLASMA FOCO .....</b>	<b>12</b>
3.1. <i>Principios.....</i>	12
3.2. <i>Descripción Eléctrica.....</i>	14
3.3. <i>Ruptura, Fase Axial y Fase Radial.....</i>	15
3.3.1. <i>Ruptura .....</i>	15
3.3.2. <i>Fase Axial .....</i>	16
3.3.3. <i>Fase Radial.....</i>	17
3.4. <i>Modelo Físico del Pinch .....</i>	18
3.4.1. <i>Modelo de Caldera Estática .....</i>	18
3.4.2. <i>Modelo de Caldera Móvil.....</i>	18
3.4.3. <i>Modelo Haz-Blanco.....</i>	19
3.5. <i>Modelos de Escalamiento.....</i>	19
<b>CAPÍTULO 4 SISTEMAS DE ADQUISICIÓN DE DATOS .....</b>	<b>22</b>
4.1. <i>Medición de Corriente (Rogowski- Coil) .....</i>	22
4.2. <i>Divisor de Tensión.....</i>	24
<b>CAPÍTULO 5 EQUIPO Y MÉTODO .....</b>	<b>26</b>
5.1. <i>Fuente de Alto Voltaje (HV) .....</i>	26
5.2. <i>Resistencia de Carga.....</i>	26
5.3. <i>Punta Alto Voltaje.....</i>	27
5.4. <i>Banco de Condensadores.....</i>	27



5.5.	<i>Cámara de Descarga</i> .....	35
5.5.1.	<i>Base</i> .....	36
5.5.2.	<i>Conector Central</i> .....	37
5.5.3.	<i>Disco a Tierra</i> .....	37
5.5.4.	<i>Cubierta Superior</i> .....	38
5.6.	<i>Ánodo, Aislante y Cátodos</i> .....	38
5.6.1.	<i>Ánodo</i> .....	40
5.6.2.	<i>Cátodos o Barras de retorno</i> .....	41
5.6.3.	<i>Aislante</i> .....	41
5.7.	<i>Calibración y Adquisición de Datos</i> .....	42
5.7.1.	<i>Calibración del Divisor Resistivo</i> .....	43
5.7.2.	<i>Calibración de Rogowski Coil</i> .....	46
<b>CAPÍTULO 6 RESULTADOS Y ANÁLISIS</b> .....		<b>48</b>
<b>CAPÍTULO 7 CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS DE TRABAJOS FUTUROS</b> .....		<b>61</b>
7.1.	<i>Conclusiones</i> .....	61
7.2.	<i>Perspectivas de Trabajos Futuros</i> .....	62
<b>BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS</b> .....		<b>63</b>
	<i>Bibliografía</i> .....	63
	<i>Referencias</i> .....	64

# Índice de Figuras

FIGURA 3.1: ESQUEMA ELÉCTRICO Y GEOMÉTRICO DE UN PLASMA FOCO, TIPO MATHER.....	13
FIGURA 4.1: ESQUEMA DE UNA BOBINA DE ROGOWSKI HELICOIDAL.....	23
FIGURA 4.2: ESQUEMA ELÉCTRICO DE UN DIVISOR RESISTIVO (IZQUIERDA) Y CAPACITIVO (DERECHA).....	24
FIGURA 5.1: ESQUEMA DE UN CIRCUITO RC.....	27
FIGURA 5.2: CIRCUITO DE PRUEBA PARA BANCO DE CONDENSADORES. ....	29
FIGURA 5.3: SEÑAL DE DESCARGA BC-I, CON VOLTAJE MÁXIMO DE CARGA DE 7,1 kV; Y .....	30
FIGURA 5.4: TASA DE REPETICIÓN DEL BANCO DE CONDENSADORES EN MODO CONTINUO, 30 Hz.....	31
FIGURA 5.5: SEÑAL DE DESCARGA BC-II, CON VOLTAJE MÁXIMO DE CARGA DE 4,9 kV, Y .....	32
FIGURA 5.6: FOTOGRAFÍA DEL BC-III.....	33
FIGURA 5.7: DESCARGAS PARA LAS DOS CONFIGURACIONES DE <i>SPARK GAP</i> .....	34
FIGURA 5.8: A) PLANO DE <i>SPARK GAP</i> PARA CONFIGURACIÓN ESFÉRICA DE TERMINALES. B) PLANO DE <i>SPARK GAP</i> PARA CONFIGURACIÓN DE TERMINALES PLANOS. ....	34
FIGURA 5.9: FOTOGRAFÍA CÁMARA DE DESCARGA .....	36
FIGURA 5.10: FOTOGRAFÍA DEL INTERIOR DE LA CÁMARA DE DESCARGA.....	39
FIGURA 5.11: FOTOGRAFÍA DEL AISLANTE DE CUARZO. ....	42
FIGURA 5.12: CALIBRACIÓN DE DIVISOR RESISTIVO DR2.....	44
FIGURA 5.13: VARIACIÓN DE LA TENSIÓN EN EL TIEMPO, NORMALIZADA PARA CONFIGURACIÓN DR3.....	45
FIGURA 6.1: CONFIGURACIÓN INICIAL DEL PF-2J CON RETORNOS, AISLANTE DE CUARZO. ....	49
FIGURA 6.2: SEÑALES ELÉCTRICAS CORRESPONDIENTES AL <i>SHOOT 031</i> , CONFIGURACIÓN $r=1,2$ , $\theta_0=0,5$ , $\epsilon=9,5$ , CON RETORNOS.....	50
FIGURA 6.3: SEÑALES ELÉCTRICAS CORRESPONDIENTES AL <i>SHOOT 042</i> , CONFIGURACIÓN $r=1,2$ , $\theta_0=0,5$ , $\epsilon=10,0$ , CON RETORNOS. ....	51
FIGURA 6.4: DEPENDENCIA DEL TIEMPO DE APARICIÓN DEL <i>DIP</i> CON LA PRESIÓN.....	52
FIGURA 6.5 SEÑALES ELÉCTRICAS CORRESPONDIENTES AL <i>SHOOT 083</i> , CONFIGURACIÓN $r=1,2$ , $\theta_0=0,5$ , $\epsilon=11,0$ , CON RETORNOS.....	54
FIGURA 6.6: SEÑALES ELÉCTRICAS CORRESPONDIENTES AL <i>SHOOT 153</i> , CONFIGURACIÓN $r=1,2$ , $\theta_0=3,3$ , $\epsilon=12,0$ , SIN RETORNOS.....	55
FIGURA 6.7: LA IMAGEN MUESTRA EL DESGASTE PRODUCIDO POR LA LÁMINA DE CORRIENTE SOBRE EL DISCO A TIERRA. ....	56
FIGURA 6.8: IMAGEN DEL ÁNODO, MUESTRA DESGASTE DEL MATERIAL POR ACCIÓN DE LA LÁMINA DE CORRIENTE. ....	56

FIGURA 6.9: DEPENDENCIA DEL TIEMPO AL <i>DIP (PINCH)</i> CON LA PRESIÓN. ....	57
FIGURA 6.10: SEÑALES ELÉCTRICAS CORRESPONDIENTES AL <i>SHOOT 170</i> , CONFIGURACIÓN $r=1,2$ , $\theta=3,2$ , $\epsilon=11,9$ , SIN RETORNOS.....	59

---

# Capítulo 1

## Generación de Neutrones

La emisión de neutrones puede producirse mediante una variedad de reacciones nucleares, aunque no es posible aumentar la energía cinética de los neutrones del modo en que se aumenta la energía de una partícula cargada. En contraposición a este hecho, se puede controlar la energía partiendo con neutrones de alta energía, para disminuirla luego a través de colisiones con átomos de distintos materiales. Este proceso de ralentización o de disminución de energía se denomina "*Moderación (Moderating)*" de neutrones. El proceso de moderación puede dar como resultado neutrones de muy baja energía. Los haces de neutrones se clasifican de acuerdo a su energía con la siguiente denominación:

Térmico (Thermal)

Epitérmicos (Epithermal)

Lentos (Slow)

Rápidos (Fast)

Dentro de las reacciones nucleares que generan neutrones se encuentran las siguientes:

### 1.1. Fuentes de Berilio

El isótopo estable de berilio,  ${}^9\text{Be}$ , tiene neutrones con una energía de ligazón relativamente baja, del orden de 1,7 MeV. Una partícula con energía entre los 5 MeV y los 6 MeV, que incide sobre un núcleo de  ${}^9\text{Be}$ , puede liberar un neutrón al generarse la siguiente reacción:

Se define el valor de la variación de energía para las reacciones nucleares como  $Q$ . Para esta reacción  $Q = 5,7$  MeV. Al mezclar  ${}^9\text{Be}$  con algún material emisor de partículas de larga vida como el  ${}^{252}\text{Cf}$ , se puede generar una emisión continua de neutrones. Si se considera que la energía de las partículas emitidas por  ${}^{252}\text{Cf}$  están en el rango de los 5 MeV a los 8 MeV, es posible encontrar neutrones con un espectro de energía por sobre los 13 MeV. Naturalmente, los neutrones emitidos no son monoenergéticos ya que algunas de las partículas pueden perder energía por colisiones con materiales sólidos.

### 1.2. Fuente de Fotoneutrones

Las fuentes de fotoneutrones utilizan un proceso similar a las fuentes de berilio, con la diferencia de que la reacción generada utiliza radiación  $\gamma$  para la generación de un neutrón de acuerdo a la siguiente relación

Si la fuente de radiación es monoenergética, los neutrones emitidos también son monoenergéticos o poseen un intervalo estrecho de dispersión en su energía. Sin embargo, la energía de los neutrones emitidos es menor que la de los emitidos por otro tipo de fuentes. Por ejemplo, para  $^{241}\text{Am}$ , que emite radiación  $\alpha$  con energía de 2,76 MeV, el neutrón liberado posee una energía de 0,8 MeV. Para otras fuentes de radiación con mayor vida media, como  $^{252}\text{Cf}$ , que emite rayos  $\gamma$  con energía apenas superior a la energía de ligazón del núcleo de  $^{252}\text{Cf}$ , el neutrón liberado es de sólo 24 keV.

### 1.3. Reacciones Nucleares

Existen muchas reacciones nucleares que producen neutrones. Todas ellas requieren un acelerador para producir haces de partículas para iniciar la reacción. Una de las ventajas que presenta este tipo de fuentes de neutrones, debido a la cuidadosa elección de la energía del haz incidente, es la obtención de haces de neutrones generalmente monoenergéticos y de energía prefijada. Algunas de las reacciones posibles son :

donde  $A_1$  y  $A_2$  son núcleos de  $Z_1$  y  $Z_2$  respectivamente.

---

# Capítulo 2

## Reacciones Nucleares

En la actualidad, los métodos más usados para la generación de reacciones nucleares son la **fisión** y la **fusión** nuclear.

### 2.1. Fisión Nuclear

Es un proceso de reacción nuclear bajo el cual un núcleo atómico se divide en núcleos atómicos más pequeños o livianos que el núcleo original. En este tipo de reacción se pueden producir neutrones, fotones (en forma de rayos  $\gamma$ ), y otros productos de fisión.

Los procesos de fisión son principalmente el resultado de la competencia entre las fuerzas nucleares y coulombianas en los átomos pesados. Los procesos de fisión nuclear pueden ocurrir de manera espontánea o inducida mediante la absorción de una partícula de energía relativamente baja tal como un neutrón o un fotón.

Todos los núcleos atómicos pueden ser fisionados si se les entrega la suficiente energía, pero sólo los núcleos pesados (con un peso atómico superior al torio) proporcionan procesos importantes en términos energéticos. Los procesos de fisión pueden ocurrir de formas muy distintas, ya sean procesos rápidos y sin control o lentos y controlables.



Para comprender las cantidades de energía liberadas en los diferentes procesos de fisión nuclear consideremos un núcleo atómico como el del  $^{238}\text{U}$  con energía de ligazón por sobre los 7,6 MeV/nucleón. Éste se divide en dos núcleos o fragmentos similares con  $^{119}\text{Zr}$  y  $^{119}\text{Zr}$ , donde la energía de ligazón de cada núcleo es de 8,5 MeV/nucleón. El cambio de energía de ligazón entre  $^{238}\text{U}$  con energía de -1809 MeV ( $-238 \times 7,6$  MeV) y los núcleos resultantes de  $^{119}\text{Zr}$  con energía de ligazón de -2033 MeV ( $-2 \times 119 \times 8,5$  MeV) es de 224 MeV, el cual puede aparecer en una variedad de formas: ya sea como neutrones, emisión  $\alpha$  o  $\beta$  proveniente de los núcleos resultantes, pero principalmente como energía cinética de los núcleos (cerca a un 80% de  $^{238}\text{U}$ ).

### 2.1.1. Emisión de Neutrones

Los fragmentos de fisión en la región de  $A = 95$  y  $A = 140$  deben compartir 92 protones. Si lo hacen en una relación aproximada entre sus masas, los núcleos formados podrán ser  $^{95}\text{Zr}$  y  $^{140}\text{Xe}$ . Estos núcleos son abundantes en neutrones. Para esta región de masas se considera que un núcleo es estable si  $Z/A \cong 0,41$ ; mientras que los subproductos de fisión poseen  $Z/A < 0,41$ , siendo inestables. Estos fragmentos de fisión se despojan del exceso de neutrones emitiendo uno o más neutrones en lo que se considera un "instante de fisión" ( $\sim 10^{-16}$  s). Estos neutrones son denominados *prompt neutrons*. El número de prompt neutrons puede variar dependiendo de la

naturaleza de los fragmentos y según la energía de la partícula incidente que haya producido la reacción de fisión. La cantidad promedio de *prompt neutrons* emitidos es de 2,48 para  $^{235}\text{U}$ ; 2,42 para  $^{239}\text{Pu}$  y 2,86 para  $^{241}\text{Am}$ .

Además de los denominados prompt neutrons, existe también una emisión de neutrones denominada *delayed neutrons*, la cual representa una emisión cercana a un neutrón cada cien reacciones de fisión.

## 2.2. Fusión Nuclear

Se define como fusión nuclear el proceso en el cual dos núcleos atómicos *livianos* se juntan o fusionan para formar un núcleo atómico más pesado. Es importante señalar que sólo se libera energía si se fusionan dos núcleos en un núcleo atómico con número másico menor. En esta reacción se pueden liberar neutrones, protones y radiación  $\gamma$ .

Las reacciones de fusión usadas como fuente de neutrones presentan varias ventajas por sobre los procesos de fisión, dentro de las cuales se encuentra el hecho de que los núcleos denominados *livianos* son más abundantes y fáciles de obtener que los núcleos *pesados* requeridos para fisión. Adicionalmente, los residuos de los procesos de fusión son núcleos livianos y estables en comparación a los núcleos radiactivos y pesados que resultan de los procesos de fisión.

---

Sin embargo, la fisión nuclear posee una ventaja considerable sobre la fusión nuclear; que radica en el hecho que para producir una reacción de fusión es necesario vencer la repulsión coulombiana de ambos núcleos. Por otra parte, una reacción de fisión puede ser iniciada por un neutrón, el cual no interactúa con la barrera de Coulomb. Por este motivo dicho neutrón puede ser de muy baja energía y aún así, generar una reacción de fisión.

Consideremos por ejemplo la fusión de dos núcleos de  ${}^2\text{H}$ , los cuales fusionados forman  ${}^3\text{He}$ . El valor de  $Q$  de esta reacción es de 20,7 MeV equivalente a 0,5 MeV/nucleón. Para que ocurra la fusión los núcleos de  ${}^2\text{H}$  deben estar suficientemente cerca para que sus distribuciones espaciales nucleares se superpongan. Si consideramos que la energía para vencer la repulsión coulombiana en el instante donde los núcleos de  ${}^2\text{H}$  están en contacto es de 21,2 MeV, se necesitan 21,2 MeV de energía para iniciar la fusión, generando en la etapa final de la reacción una energía de 41,9 MeV. Esto corresponde a un factor 2 de rendimiento.

Una alternativa a la reacción de fusión anterior es calentar el contenedor del gas neón hasta que su energía térmica sea suficiente para que exista una gran probabilidad que dos núcleos se aproximen y colisionen con una energía de 21,2 MeV, suficiente para iniciar una reacción de fusión. Este proceso se conoce con el nombre de *Fusión Termonuclear*, para el cual se requiere que la energía cinética

media – por molécula de gas debe sea la mitad de 21,2 MeV. Así, la temperatura del contenedor debe ser tal que .

### 2.2.1. Procesos de Fusión

Una vez superada la barrera de Coulomb, existe una gran probabilidad de generar un proceso de fusión, siendo la reacción más elemental:

donde la emisión es esencial para el balance energético, ya que no posee un estado excitado. La energía liberada en esta reacción de fusión es

. Otras reacciones probables son:

Estas son denominadas reacciones *Deuterio – Deuterio* o *D-D*.

La energía liberada se relaciona directamente con la estabilidad del núcleo liberado en el proceso de fusión, mientras más estable es el núcleo formado, mayor será la cantidad de energía generada como se observa en las reacciones *D-D* donde es más estable que . Otro ejemplo de esto es la siguiente reacción que genera un núcleo de helio.

Esta reacción se denomina *Deuterio – Tritio* o *D-T*. Si consideramos que las partículas inicialmente poseían una baja energía cinética, se puede decir que el núcleo de  ${}^2\text{H}$  y el neutrón comparten los 17,6 MeV.

Debido a la conservación del momento lineal, el neutrón tendrá una energía de 14,1 MeV mientras que el  ${}^3\text{He}$  se lleva los 3,5 MeV restantes, siendo esta reacción una fuente para neutrones rápidos o de alta energía. En las reacciones de fusión, la energía cinética inicial de los núcleos es pequeña comparada con los valores de  $E_f$ . La energía total final de la reacción se puede escribir de la siguiente manera:

$$E_f = E_1 + E_2 \tag{2.1}$$

donde  $E_1$  y  $E_2$  son los productos de la reacción de fusión. Ahora, si consideramos que la cantidad de movimiento inicial es despreciable, tendremos por conservación del momento lineal que:

$$m_1 v_1 = m_2 v_2 \tag{2.2}$$

De las ecuaciones 2.1 y 2.2 se obtiene:

$$E_f = E_1 \left( 1 + \frac{m_1}{m_2} \right) \tag{2.3}$$

---

**2.4**

De esta expresión para la energía es fácil observar que el producto más liviano posee una mayor energía cinética que el más pesado. Una consecuencia de este hecho es que los neutrones resultantes de una reacción D-T poseen el 80% de la energía liberada, mientras que en una reacción D-D estos poseen el 75% de la energía.

---

## Capítulo 3

# Aceleradores de Partículas tipo Plasma Foco

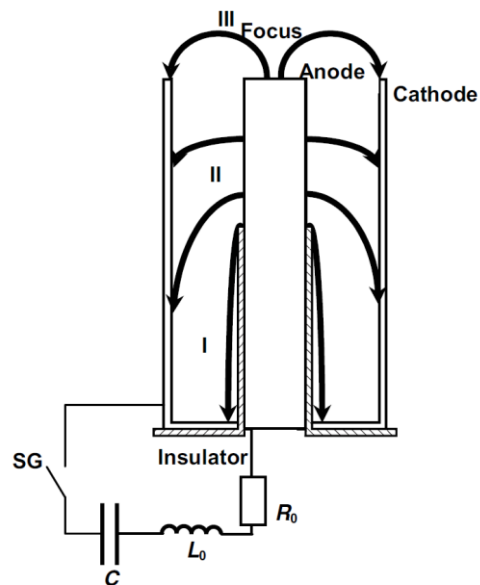
Los procesos de fusión termonuclear requieren de muy altas temperaturas ( ), a las cuales los gases como el hidrógeno se encuentran totalmente ionizados, es decir, los electrones y los núcleos se encuentran separados, formando lo que se conoce como un plasma. En la actualidad, para lograr mantener el plasma confinado el tiempo suficiente para lograr una reacción de fusión se utilizan dos métodos: El confinamiento inercial y el confinamiento magnético. Dentro de este último se encuentran los dispositivos del tipo - Pinch y Z-Pinch.

Uno de los dispositivos de confinamiento magnético utilizados para realizar reacciones de fusión desde los años 60 son los Plasma Focus o Plasma Foco (PF), que se explican a continuación.

### 3.1. Principios

Los dispositivos PF generan descargas eléctricas pulsadas en gases a bajas presiones dentro de un arreglo coaxial de electrodos. Las microinestabilidades eléctricas y la turbulencia del gas generan un plasma altamente denso y de corta duración, donde se producen haces de iones de altas energías y electrones; además de la emisión de una gran cantidad de rayos X [1].

Cuando el gas de llenado de la cámara del dispositivo PF es deuterio, se generan neutrones y protones de fusión. Dos diseños de plasma foco fueron desarrollados en forma independiente por N. Filippov [1] en la Ex Unión Soviética y por J. Mather [1] en los EE.UU. Ambos diseños difieren en la relación de aspecto de sus electrodos (longitud del electrodo exterior sobre diámetro del electrodo interior). La configuración tipo Filippov tiene una relación de aspecto  $< 1$  (valores típicos de 0,2), y la configuración tipo Mather una relación de aspecto  $> 1$  (típicamente de 5 a 10).



**Figura 3.1: Esquema eléctrico y geométrico de un Plasma Foco, tipo Mather.**

Pese a ser desarrollados de forma independiente y poseer geometrías muy distintas, ambos diseños poseen un comportamiento similar después de ocurrida la primera fase de la descarga. Esta primera fase (I) (*breakdown o ruptura*) ocurre



cuando la potencia pulsada es aplicada y el gas colindante al aislante empieza a ionizarse en presencia de un flujo de corriente al interior del gas. En la segunda fase (II) (*run-down o fase axial*) bajo la acción de la fuerza de Lorentz la lámina de corriente se desplaza desde la posición I a la posición II (ver Figura 3.1). En la fase III (*pinch o fase radial*) la lámina alcanza el eje de simetría de la cámara produciéndose la compresión de la lámina de corriente.

### 3.2. Descripción Eléctrica

Desde el punto de vista eléctrico los dispositivos plasma foco son descritos por circuitos eléctricos simples compuestos por un capacitor con capacitancia  $C$ , una inductancia en serie  $L$  (incluye los valores de inductancia para los condensadores, líneas de transmisión, conexiones e interruptores) y una resistencia equivalente  $R$ . La ecuación que describe el circuito equivalente de la Figura 3.1 es:

$$L \frac{d^2 i}{dt^2} + R \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} i = V_0 \quad (3.1)$$

Donde  $V_0$  es la caída de tensión asociada al plasma, la cual esta descrita por [2]:

$$V_0 = L \frac{di}{dt} + R i \quad (3.2)$$

donde  $L$  y  $R$  son la inductancia y resistencia asociada al plasma en su fase radial, respectivamente y descritas por [2]:

---

— — **3.3**

— **3.4**

donde  $l$  y  $r$  son la longitud y radio de la columna de plasma en la fase radial, respectivamente;  $r_c$  el radio de los cátodos y  $\sigma$  la conductividad eléctrica del plasma,  $\sigma$  posee un comportamiento anómalo.

### **3.3. Ruptura, Fase Axial y Fase Radial**

La descripción física de los principales fenómenos que ocurren al interior de un plasma foco puede realizarse considerando tres etapas básicas en la dinámica de este tipo de dispositivos.

#### **3.3.1. Ruptura**

Se ha observado que una descarga eléctrica puede desarrollarse en una geometría azimutal cuando un pulso de alto voltaje se aplica entre los electrodos coaxiales de un plasma foco llenado con gas a una presión adecuada. El inicio de la descarga eléctrica está precedida por rupturas eléctricas que posibilitan la formación de plasma a través del cual la corriente puede fluir. La generación y el desarrollo de la descarga de corriente en los dispositivos plasma foco depende de varios factores como la configuración de

---

los electrodos, los materiales y geometría del aislante, y de la presión del gas al interior de la cámara.

Si la presión inicial del gas es demasiado baja, la descarga de corriente se desarrollará en toda la zona interelectrónica. Por otra parte, si la presión inicial es demasiado alta la descarga puede ser acompañada por descargas radiales filamentosas entre los electrodos. Por último, si la presión inicial es óptima una descarga movediza puede desarrollarse a lo largo del aislante. Generalmente un campo eléctrico de gran intensidad aparece en el borde de los electrodos exteriores (usualmente cátodos) y es ahí donde comienza a desarrollarse la descarga. Tal campo eléctrico favorece la ionización a lo largo de aislante; cuando la descarga movediza alcanza el borde del aislante ella conecta los electrodos (cátodo con el ánodo) y la conductancia de la descarga movediza se hace lo suficientemente alta para convertir a la descarga movediza en una lámina de plasma, hecho que marca el fin de la fase de ruptura y el comienzo de la fase axial.

### 3.3.2. Fase Axial

Esta consiste en la propagación de la lámina de plasma magnéticamente impulsada desde la zona de formación hasta el final de los electrodos. Debido a los grandes valores de la corriente durante la descarga, la fuerza de Lorentz asociada al campo magnético debido a la corriente actúa como un pistón

---

magnético que se mueve impulsando la lámina de plasma en contra del gas neutro a velocidades supersónicas desde el inicio. Dado que el campo magnético al interior de los electrodos es inversamente proporcional a la distancia radial desde el centro de este, el perfil de la lámina de corriente es una curva en los ejes  $r$ - $z$ . Por lo tanto, la evolución de la lámina de corriente no debe ser considerada como un pistón magnético plano sino más bien como una superficie de curvatura creciente. La densidad de partículas es el resultado del barrido realizado por la lámina durante su desplazamiento.

### 3.3.3. Fase Radial

El desarrollo de la descarga de un plasma foco comienza con la ruptura eléctrica a lo largo del aislante, como se explicó en el apartado 3.3.1, dando como resultado la formación de la lámina de corriente que se acelera como consecuencia de la fuerza de Lorentz, que crece debido al aumento en la corriente durante la fase axial. Una vez que la lámina de corriente alcanza el final de los electrodos se inicia la fase radial que concluye con la compresión del plasma en un pinch.

Si el dispositivo funciona de forma óptima, el máximo de corriente debe coincidir con el momento de la compresión de la lámina de plasma en el centro del electrodo (ánodo). Gracias a esto, el pinch posee una alta densidad de energía, convirtiéndose en una intensa fuente de radiación y alta emisión

---

de neutrones producidos por los procesos de fusión que tienen lugar en el pinch[1].

### 3.4. Modelo Físico del Pinch

Debido a que la emisión de un plasma foco puede deberse a procesos de fusión, sean térmicos o no-térmicos, han surgido una serie de diversos modelos físicos apoyados en uno u otro de estos procesos. A continuación se detallarán los tres modelos que son la herencia del *Z-pinch*

#### 3.4.1. Modelo de Caldera Estática [3]

Este modelo establece que el pinch es un punto inmóvil de plasma termonuclear. La temperatura que se requiere para la producción de neutrones es del orden de los 10 keV y sería alcanzada por los mecanismos de calentamiento presentes durante la fase radial de la descarga. En este modelo tanto la emisión de neutrones como la radiación son isotrópicas.

#### 3.4.2. Modelo de Caldera Móvil [3]

Este modelo, al igual que el de Caldera Estática, supone la emisión del pinch debido a procesos termonucleares, pero en este caso el pinch se mueve con una velocidad de                    en dirección                   , paralela a los electrodos. De esta forma el modelo intenta explicar la anisotropía observada tanto en la emisión de radiación como de neutrones.

### 3.4.3. Modelo Haz-Blanco [3]

Este modelo supone que como efecto de las inestabilidades en el plasma posteriores al momento del pinch, se crean intensos campos electromagnéticos, cuya componente eléctrica acelera una porción de los iones en la dirección alcanzando una energía del orden de los 100 keV. Se producen así reacciones de fusión no-térmicas y de esta forma se explicaría la anisotropía en la emisión de neutrones y en la radiación.

## 3.5. Modelos de Escalamiento

Una de las características interesantes de los dispositivos plasma foco es lo relativamente constante que permanecen algunos parámetros del plasma para dispositivos en un amplio rango de energía, desde 1 kJ a 1 MJ. Dentro de estos parámetros mencionamos la temperatura de los iones y de los electrones, como también la densidad de electrones. Otro parámetro que permanece constante de un dispositivo PF a otro, es la velocidad de la lámina de corriente tanto durante la fase axial como radial, siendo  $v_{ax}$  para la fase axial y de  $v_{rad}$  para la fase radial [2].

Por otra parte, el valor del parámetro  $\frac{E}{V}$ , donde  $E$  es la energía almacenada en el banco de condensadores y  $V$  es el volumen del pinch, es usualmente utilizado para caracterizar y comparar los distintos dispositivos. De acuerdo a los modelos de escalamiento [4], resultados experimentales [4] y simulaciones teóricas [3], se

concluye que el radio del pinch tiene un valor cercano a  $r_p$ , donde  $r_p$  es el radio del ánodo, y para la longitud del pinch un valor de  $l_p$ .

Concretamente, ello significa que:

$$r_p \approx r_a \quad (3.5)$$

El valor de este parámetro para los dispositivos PF-400J y PF-50J es de entre  $0,47$  y  $0,57$ , siendo el valor óptimo de [4]:

$$r_p \approx r_a \quad (3.6)$$

Otros parámetros relevantes, que aparecen como el resultado de modelamientos teóricos y muestran cierta constancia para los valores de de las velocidades tanto axial como de la fase radial, están dados por las expresiones [5]:

$$v_{axial} \approx v_{radial} \quad (3.7)$$

$$v_{axial} \approx v_{radial} \quad (3.8)$$

Donde  $\gamma$  y  $\beta$  son valores geométricos comprendidos en el intervalo entre [0,47; 0,57]. Debido a que tanto los parámetros geométricos como las velocidades axiales y radiales son relativamente constantes se puede determinar un valor

experimental para el “*drive parameter*”  $\bar{I}$ ), el cual para dispositivos en un rango de energía almacenada de entre 3kJ a 1MJ es de [4]:

$$\bar{I} = \frac{E}{\tau} \quad (3.9)$$

Se han realizado esfuerzos para determinar modelos de escalamiento para algunos parámetros del plasma, como son la emisión de neutrones, iones, entre otros. Si bien no existe consenso sobre como escala el *yield* de neutrones,  $Y_n$  con respecto a la energía almacenada o a la corriente máxima, algunas de las más aceptadas para la emisión de neutrones en el régimen óptimo de operación son [6]:

$$Y_n \propto E^2 \quad (3.10)$$

$$Y_n \propto I^2 \quad (3.11)$$

Donde  $E$  es la energía almacenada en el banco de condensadores en unidades de kJ e  $I$  es la corriente máxima en MA.



---

## Capítulo 4

# Sistemas de Adquisición de Datos

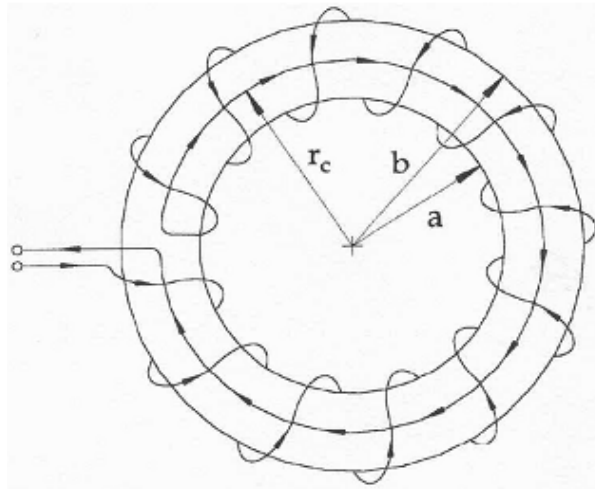
La adquisición de datos para los dispositivos de potencia pulsada como los plasma foco consiste en medir las señales eléctricas que se pueden obtener de la operación de estos. Se debe tener presente que los voltajes de operación fácilmente pueden superar los 5 kV y las corrientes eléctricas son superiores a los 15 kA.

Los métodos más usados para medir esos valores de corriente eléctrica y la caída de tensión son los detallados a continuación.

### 4.1. Medición de Corriente (Rogowski- Coil)

La bobina de Rogowski o *Rogowski-coil* es un dispositivo no invasivo para mediciones de corriente alterna y de pulsos de alta frecuencia debido a su buena respuesta temporal.

La bobina de Rogowski es construida generalmente con una espira central cerrada sobre sí misma con una bobina helicoidal de  $N$  vueltas. La corriente a medir circula perpendicularmente al plano de la espira central y por su centro como se observa en la Figura 4.1.



**Figura 4.1: Esquema de una Bobina de Rogowski helicoidal.**

El campo magnético  $B$  producido por la corriente  $I$  que circula por un conductor central infinito a una distancia  $r$  es

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \tag{4.1}$$

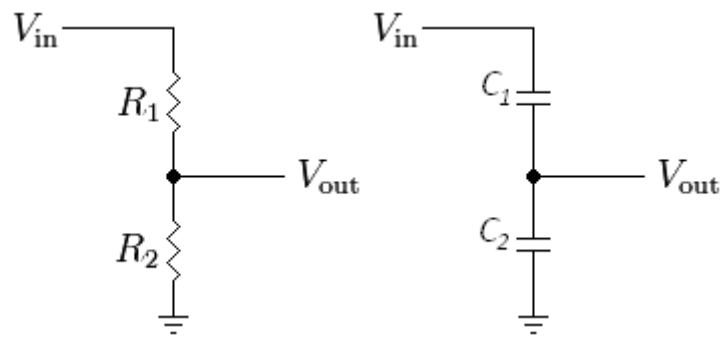
Si consideramos que  $r$  es constante, el campo magnético producido por  $I$  al interior de las espiras será espacialmente uniforme. La FEM inducida por los cambios en la corriente sobre los terminales de las  $N$  espiras es:

$$\mathcal{E} = -N \frac{d\Phi}{dt} \tag{4.2}$$

De la ecuación 4.2 podemos observar que la bobina de Rogowski mide las variaciones de la corriente en relación al tiempo con un factor de amplificación teórico ideal de  $N$ .

## 4.2. Divisor de Tensión

Los divisores de tensión permiten reducir el potencial de entrada mediante un arreglo de impedancias conectadas en serie. Para explicar su funcionamiento supongamos que una tensión inicial  $V_{in}$  está conectada en serie a un arreglo de resistencias como se observa en la Figura 4.2.



**Figura 4.2: Esquema eléctrico de un divisor resistivo (izquierda) y capacitivo (derecha).**

La caída de tensión sobre  $R_1$  es:

$$\frac{R_1}{R_1 + R_2} V_{in}$$

**4.3**

Existen también los divisores capacitivos se componen de un conjunto de condensadores en serie, siendo la caída de tensión sobre  $C_1$  de:

$$\frac{C_2}{C_1 + C_2} V_{in}$$

**4.4**

Es importante destacar que pese a que la impedancia de los condensadores ( ) depende de la frecuencia de la señal de entrada, la tensión resultante no depende de esa frecuencia.

# Capítulo 5

## Equipo y Método

El equipo y montaje utilizado en la construcción y operación del PF-2J consta principalmente de:

### 5.1. Fuente de Alto Voltaje (HV)

Suministra la corriente eléctrica y la caída de tensión al banco de condensadores.

La fuente de Alto Voltaje (DC) utilizada opera en un rango de 0V a 30 kV.

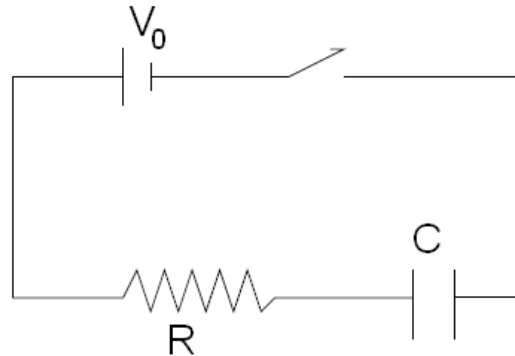
### 5.2. Resistencia de Carga

La resistencia de carga se construye en base a dos parámetros importantes para los equipos de potencia pulsada. Estos son: la potencia disipada y el tiempo característico del circuito. Si consideramos el circuito eléctrico de la Figura 5.1 tendremos que la caída de tensión en el condensador al cerrar el circuito queda descrita por:

—

5.1

Donde  $\tau$  es el tiempo característico del circuito. Para la carga de todos los bancos de condensadores se construyó una única resistencia de carga de  $R$   $\Omega$  capaz de disipar 600 W y con un tiempo característico menor a los 10 ms.



**Figura 5.1: Esquema de un circuito RC**

Considerando que en la carga del banco de condensadores es cercana al 95% del voltaje de operación de la fuente, se puede considerar el tiempo de carga para el banco de condensadores de 30 ms, lo cual permite una frecuencia de descarga superior a los 10Hz requeridos para la operación óptima del PF-2J.

### **5.3. Punta Alto Voltaje**

Para la medición de la caída de tensión, en las etapas iniciales y luego como referencia de voltaje se utilizó una punta de alto voltaje Tektronix capaz de medir una caída de tensión de 20 kV de manera continua y de hasta 40 kV en modo transiente.

### **5.4. Banco de Condensadores**

Éste es integrado por un conjunto de condensadores, los cuales pueden estar conectados en serie, en paralelo o en combinación mixta. Un ejemplo de ello es el

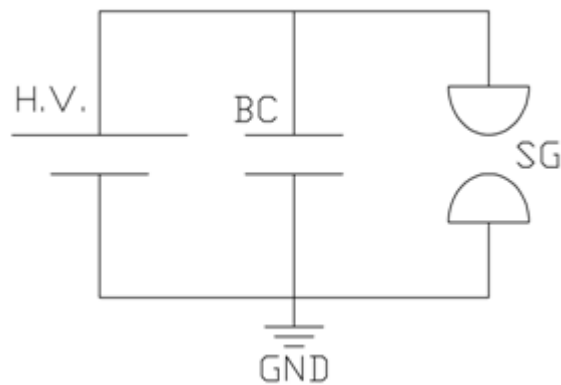
---

*Generador Marx*, que consiste en un arreglo de condensadores que se cargan en paralelo y se descargan en serie con el fin de aumentar la caída de tensión al momento de la descarga.

Para la construcción del acelerador de partículas tipo plasma foco (PF-2J) se desarrollaron tres bancos de condensadores los que se diferenciaban en su geometría y el tipo de condensadores con los cuales fueron construidos.

El primer banco de condensadores (BC-I) fue desarrollado con ocho condensadores comerciales conectados en paralelo capaces de soportar una caída de tensión de 10 kV cuya capacitancia conjunta es de 176 nF. Los condensadores fueron ordenados formando una configuración axial con un radio determinado y ubicados a 45° unos de otros. Tanto este como los bancos de condensadores posteriores incluían en su construcción un interruptor gaseoso o "*Spark gap*", el cual fija un voltaje de ruptura eléctrica para delimitar el voltaje de carga y operación tanto del banco de condensadores como de la cámara de descarga.

Posteriormente al diseño y la construcción de los bancos de condensadores, se debe realizar la caracterización eléctrica de él para obtener los parámetros de: inductancia y período (el banco de condensadores se comporta como un circuito LC). Estos parámetros son necesarios para el diseño de la cámara de descarga.

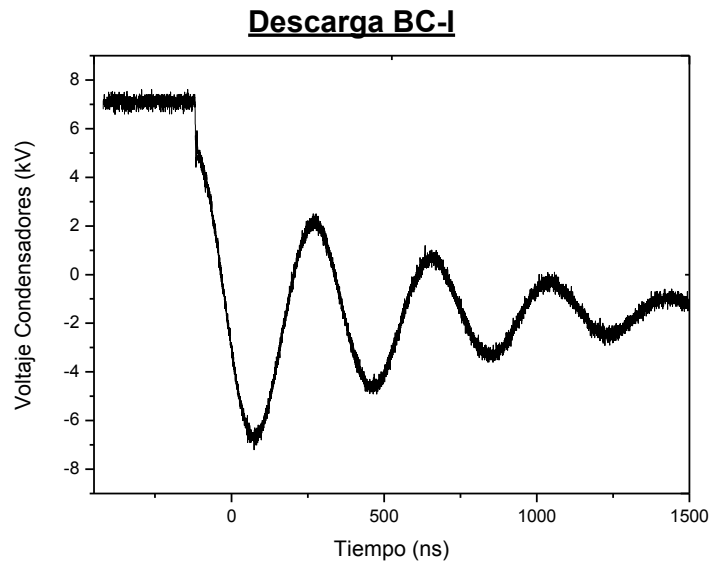


**Figura 5.2: Circuito de prueba para banco de condensadores.**

Para la determinación de los parámetros de inductancia y período se realiza la carga del banco de condensadores fijando el valor máximo de carga o de ruptura eléctrica (cierre del interruptor gaseoso) con la separación entre los terminales del *spark gap*. El voltaje al cual se produce una ruptura eléctrica entre dos terminales conductores, no sólo depende de la separación de estos, también influyen parámetros como la presión y la humedad.

Una vez alcanzado el voltaje de carga por el banco de condensadores se produce una chispa entre los terminales del *spark gap* cerrando el circuito LC y produciendo la descarga del banco (Figura 5.2). Una vez cerrado el circuito eléctrico se mide la caída de tensión en el banco de condensadores, midiendo la tensión entre un terminal del *spark gap* (conectado a un borne de los condensadores y al HV) y tierra (segundo terminal del *spark gap*, conectado al otro borne de los condensadores).





**Figura 5.3: Señal de descarga BC-I, con voltaje máximo de carga de 7,1 kV;**

*y*

De la señal de descarga obtenida para el primer banco de condensadores (BC-I)

(Figura 5.3) se obtiene el período del circuito LC siendo ,

utilizando el valor del período en la siguiente ecuación:

\_\_\_\_\_

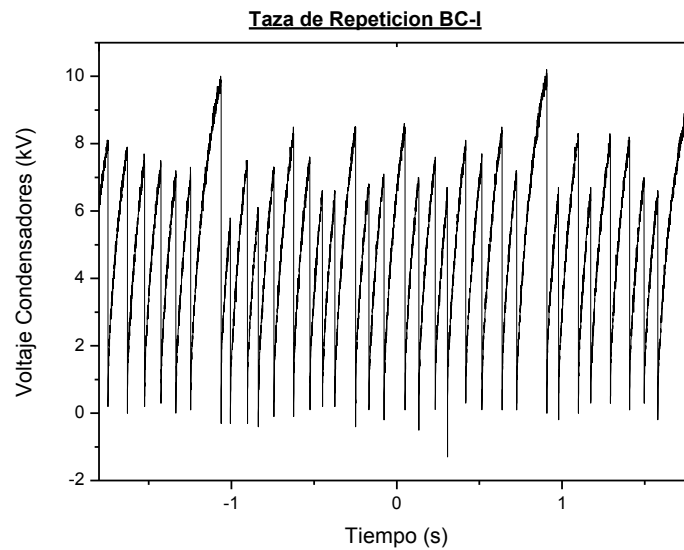
**5.2**

Resulta . Una vez caracterizado el banco con los respectivos

valores de T y L, se midió la tasa de repetición de la descarga del circuito para

saber si era posible superar los 10 Hz, los cuales se consideraron como el ritmo de

operación óptima para el funcionamiento del PF.

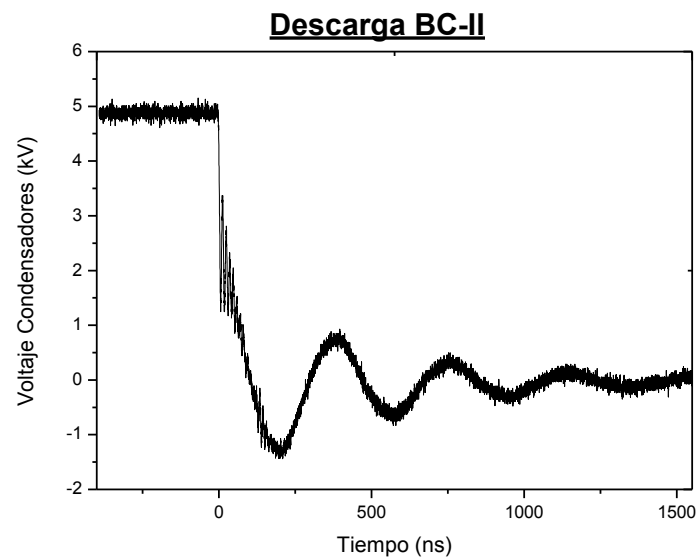


**Figura 5.4: Tasa de repetición del banco de condensadores en modo continuo, 30 Hz**

La frecuencia máxima registrada para BC-I fue de 44 Hz (Figura 5.4), lo cual supera ampliamente la frecuencia de operación esperada de 10 Hz para el PF-2J. Si bien los condensadores y el banco en sí lograron superar las pruebas y poseían valores razonables de inductancia y período; ellos no poseían la resistencia mecánica suficiente para operar a tasas de repetición tan altas, ya que luego de hechas las pruebas ellos perdieron capacitancia, llegando a una medida conjunta de 32 nF, lo cual representa una disminución al 19% del valor original.

Posteriormente a la construcción, análisis y fracaso del BC-I se construyó un segundo banco (BC-II) que consistió en un único condensador de con placas paralelas de papel aluminio y tereftalato de polietileno o mylar como dieléctrico entre las placas. El condensador poseía una capacitancia de 113,0 nF. Debido a las

pocas descargas realizadas sobre este banco se obtuvo un único valor para el periodo e inductancia (Figura 5.5). Los pocos disparos realizados en el BC-II se debieron principalmente a que el condensador no era capaz de soportar los 6 kV a los cuales se efectuaban las descargas. Al producirse la descarga o ruptura en *spark gap* se producían pequeñas rupturas eléctricas que atravesaban el dieléctrico entre las placas paralelas del condensador.



**Figura 5.5: Señal de descarga BC-II, con voltaje máximo de carga de 4,9**

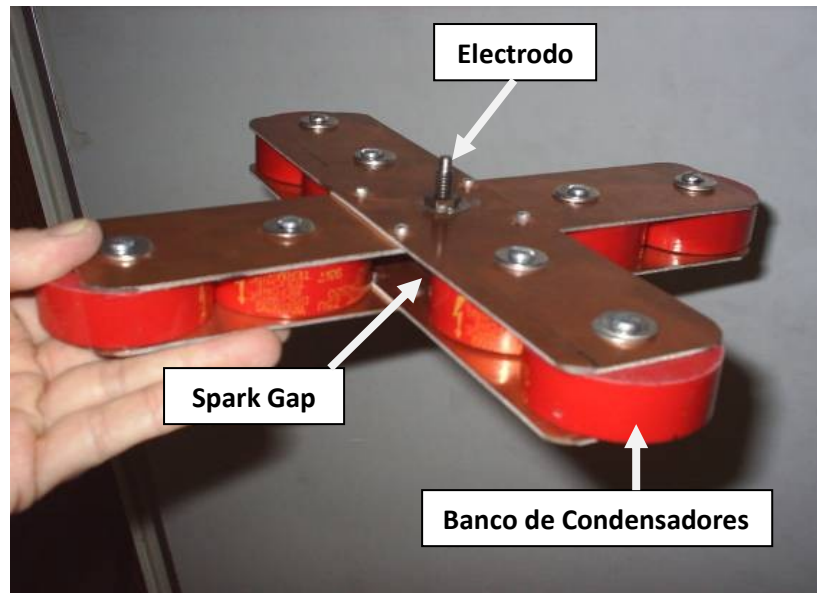
kV,

y

.

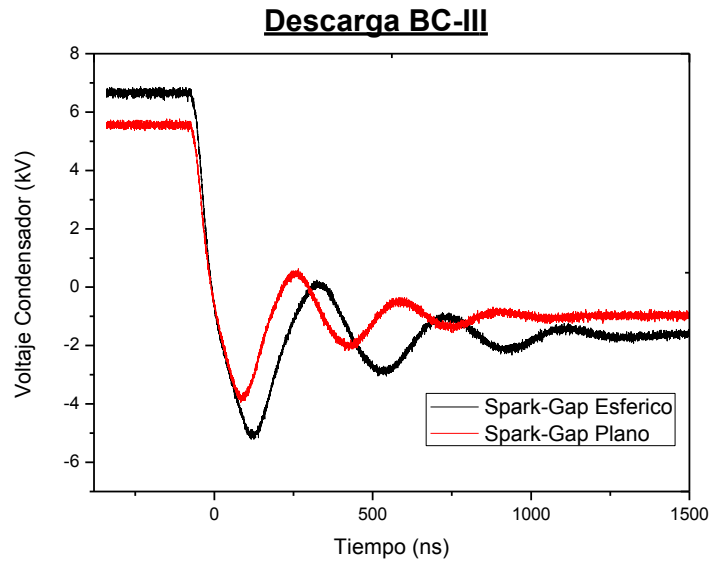
En consideración de las limitaciones encontradas en BC-I y en BC-II, se construyó un último banco de condensadores (BC-III). Para ello se utilizaron ocho condensadores cerámicos, con un voltaje máximo de carga de 10 kV, conectados en paralelo con capacidad conjunta de 182,0 nF. Los condensadores se ordenaron

en forma de cruz (ver Figura 5.6) con dos condensadores en cada brazo y el *spark gap* en el centro de la cruz formando el circuito de la Figura 5.2.

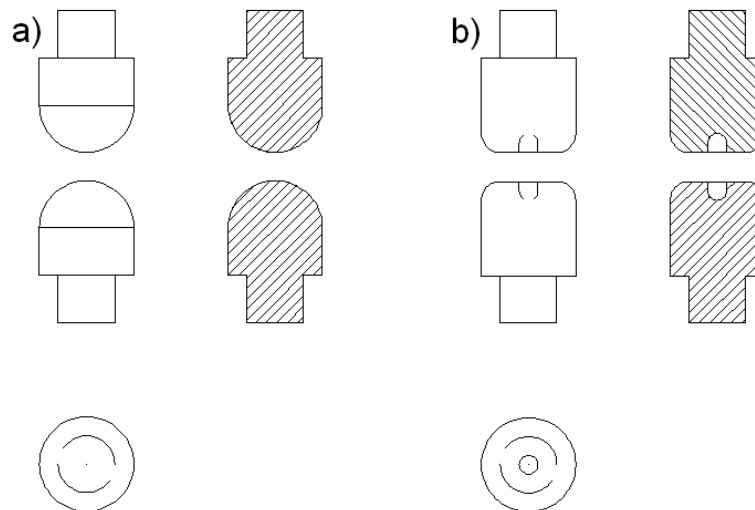


**Figura 5.6: Fotografía del BC-III.**

Para caracterizar BC-III se utilizó el mismo procedimiento utilizado para BC-I, resultando  $\tau = 1.5 \mu s$  y  $L = 1.5 \mu H$  (ver Figura 5.7 señal de *spark gap* esférico). Posterior a la caracterización del BC-III se realizó una modificación al *spark gap* cambiando los terminales semiesféricos por terminales cilíndricos con una concavidad en la superficie del contacto como se esquematiza en la Figura 5.7.b. La modificación generó una disminución del período y de la inductancia del banco, resultando  $\tau = 1.2 \mu s$  y  $L = 1.2 \mu H$  (ver Figura 5.7 señal de *spark gap* plano).



**Figura 5.7: Descargas para las dos configuraciones de *Spark gap***



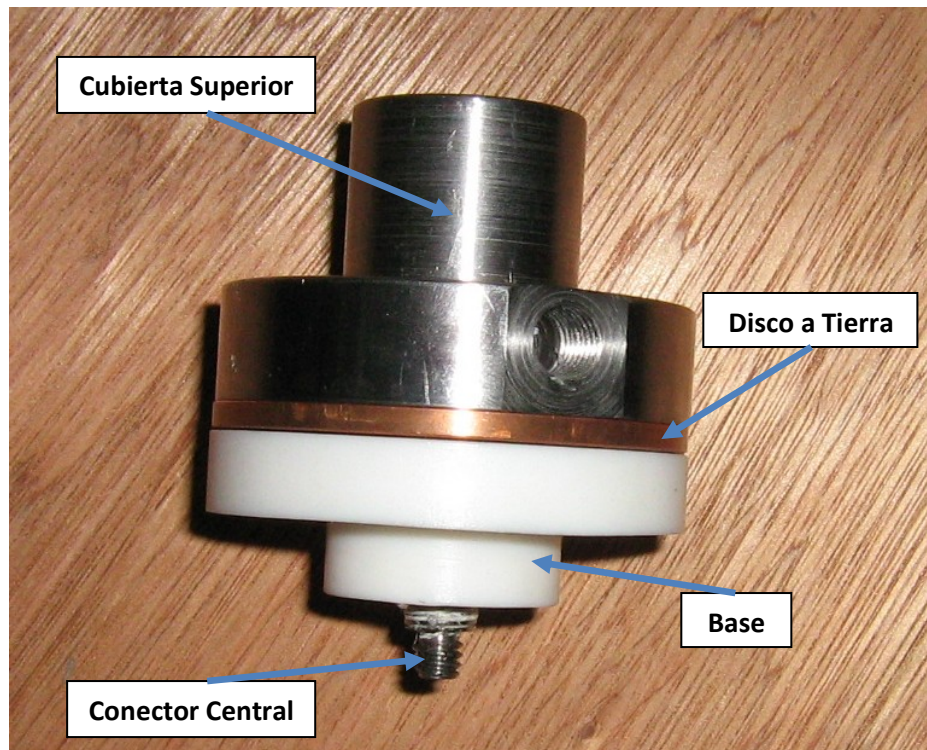
**Figura 5.8: a) Plano de *spark gap* para configuración esférica de terminales. b) Plano de *spark gap* para configuración de terminales Planos.**

---

En vista del buen funcionamiento del BC-III, se decidió utilizarlo como fuente de energía para alimentar el PF-2J. Por otra parte, para obtener un mejor aprovechamiento de la energía almacenada en el banco de condensadores, el sistema de almacenamiento debe poseer la menor inductancia posible de tal modo que la corriente en la descarga sea mayor. Por lo anterior, de acuerdo a la ecuación 5.2 es conveniente utilizar la configuración de *spark gap* modificado que presenta menor período.

### 5.5. Cámara de Descarga

El diseño y posterior construcción de la cámara de descarga debía cumplir con ciertas características inherentes tanto al proyecto como al funcionamiento de ella. Dentro de las características inherentes al proyecto se encontraba el tamaño (para su portabilidad); no podía tener dimensiones superiores a 5 cm x 5 cm x 5 cm; además, ser desmontable e independiente del banco de condensadores. Por otra parte, debía poseer conductos para entrada y salida de gas o material particulado que pudiera generarse durante las descargas. También debía funcionar a bajas presiones, que fluctuarían entre los 25 mbar y los 0,5 mbar.



**Figura 5.9: Fotografía Cámara de Descarga**

Para la construcción de la cámara de descarga se diseñaron y construyeron cuatro piezas independientes de distintos materiales que son: base, cubierta superior, disco a tierra y el conector central (ver Figura 5.9).

#### 5.5.1. Base

La base debe ser capaz de aislar las diferencias de tensión existentes entre el centro de la cámara por el cual circulan corrientes cercanas a los 17,0 kA sobre una tensión que puede llegar hasta los 10 kV con relación a tierra. Por ello fue construida en politetrafluoretileno, más conocido como teflón, por su

---

alta resistencia al arco eléctrico, al efecto corona, bajos valores de constantes dieléctricas y baja disipación térmica.

#### 5.5.2. Conector Central

El conector central sirve de puente eléctrico entre el ánodo y uno de los terminales del *spark gap* y brinda rigidez mecánica a la cámara de descarga, además de ser el soporte para el ánodo y el aislante; fue construido en acero inoxidable.

#### 5.5.3. Disco a Tierra

El disco a tierra sirve como soporte y puente eléctrico para los electrodos exteriores o cátodos (si es que la configuración los requiere). Para el proyecto se construyeron tres discos con diferentes características. El primero de ellos fue construido en Cu y no posee ningún tipo de barras de retorno, es un disco liso en una de sus caras. El segundo disco también de Cu tiene 8 barras de retorno de 2 mm de diámetro con una separación angular de 45° y a una distancia radial de 3 mm como se muestra en la Figura 5.10. El último de los discos fue construido en acero inoxidable sin barras de retorno posee un filo para favorecer la ionización en esa zona por efecto punta. Este filo de 2 mm de altura se ubicó cercano al centro.



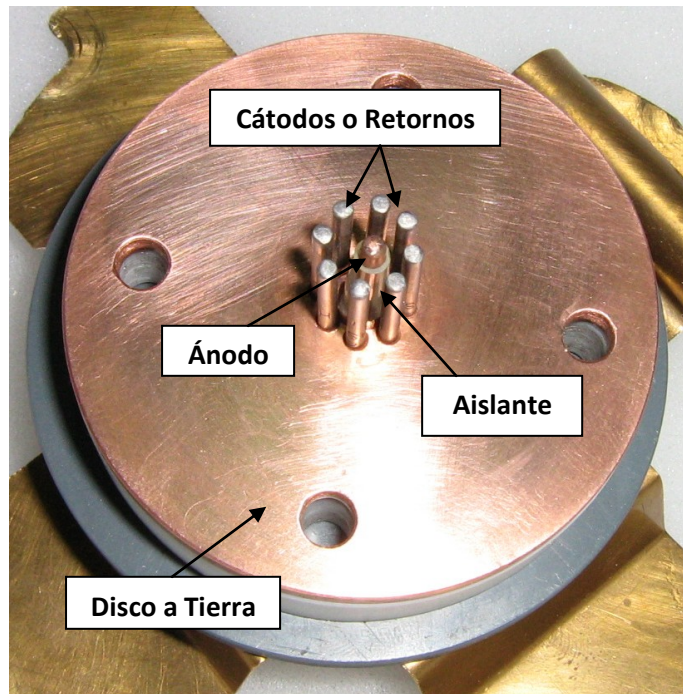
#### 5.5.4. Cubierta Superior

La cubierta superior tiene como finalidad cerrar la cámara y mantener la presión al interior de ella. Se construyeron dos cubiertas diferentes de acero inoxidable. Una de ellas posee una ventana superior de acrílico, la cual permite observar a simple vista el momento de la descarga eléctrica al interior de la cámara.

Por consideraciones de seguridad todos los elementos metálicos que se encuentren al aire libre (sin ningún tipo de recubrimiento o aislante) se deben encontrar al mismo potencial eléctrico que tierra. Por otra parte, para asegurar que la presión al interior de la cámara permanezca constante, el diseño de las piezas contemplo las cavidades y soportes necesarios para la colocación de O'rings.

#### 5.6. Ánodo, Aislante y Cátodos

El interior de la cámara de descarga se compone principalmente de un ánodo metálico rodeado por un material aislante usualmente óxido de aluminio (alúmina) o el cuarzo. El aislante se puede encontrar rodeado por un conjunto de cátodos o barras de retorno, que al igual que el ánodo son fabricados en metal (ver Figura 5.10).



**Figura 5.10: Fotografía del interior de la cámara de descarga.**

En la operación del PF-2J se ensayaron variadas configuraciones para los electrodos tanto en su razón de aspecto como la no utilización de retornos; además de cambios en los regímenes de gases, tanto el tipo de gas como su presión. Todo lo anterior en la búsqueda de condiciones óptimas de operación. A continuación se detallarán las dimensiones iniciales y materiales utilizados en el primer ensayo de configuración.

### 5.6.1. Ánodo

Se determinaron las dimensiones del ánodo o electrodo central para que se mantuviera constante la densidad volumétrica de la energía al momento del pinch (ecuación 3.6) y el valor del *Driver Parameter* dado en la ecuación 3.9.

Si consideramos el voltaje de carga promedio del banco de condensadores en  $V_c$ , los valores de capacitancia e inductancia de  $C$  y  $L$ , respectivamente, se obtiene (por conservación de la energía de un circuito LC) una corriente *peak* de  $I_{peak}$  y una energía almacenada en el banco de condensadores  $E_c$ .

Suponiendo constante la densidad de energía al momento del *pinch* de la ecuación 3.6, se obtiene para el radio del ánodo el valor  $r_a$ .

Por otra parte, si se espera que el pinch esté en el máximo de corriente a  $t_{pinch}$ , los cálculos en el *drive parameter* (ecuación 3.9) entregan el valor  $r_a$  para el radio del ánodo. En virtud de la similitud de ambos radios, se decidió fabricar un ánodo cilíndrico de cobre con un radio  $r_a$  y largo efectivo  $L_{eff}$  (sólo se considera el largo fuera del aislante).

### 5.6.2. Cátodos o Barras de retorno

Las barras de retorno se hicieron en acero rápido. Para determinar sus dimensiones se utilizó la relación de aspecto ( ) con el valor de 2,5. De esta forma la menor distancia desde el borde de los retornos al centro del ánodo es de 3,0 mm. El largo total de las barras de retorno se fijó en para que ellos superaran en altura al ánodo, ayudando de este modo a la compresión de la lámina de corriente. El radio de los retornos fue de 1 mm y él se determinó considerando el espacio disponible y la separación entre las barras.

### 5.6.3. Aislante

Para la construcción de los aislantes se utilizó el mismo material, pudiendo ser alúmina o cuarzo. La altura del aislante debía respetar el largo efectivo del ánodo, , y recubrir la base que lo soporta. Por tanto, el largo total de este fue de por sobre el soporte de los retornos. La geometría para los aislantes de cuarzo se indica en la Figura 5.11.

Para los aislantes de alúmina (con geometría cilíndrica) se utilizó el material disponible en el laboratorio. Debido a que el diámetro del material disponible era menor al requerido fue necesario completar la base con silicona para evitar rupturas eléctricas.

Se hicieron diferentes ensayos variando el largo efectivo del ánodo al igual que el largo total del aislante durante la operación del PF-2J.



**Figura 5.11: Fotografía del aislante de cuarzo.**

### **5.7. Calibración y Adquisición de Datos**

Dado el diseño de la cámara de descarga es posible observar lo que sucede al interior de la cámara analizando la caída de tensión producida durante la descarga eléctrica al interior de ésta y los cambios producidos en la corriente que circula al interior de la cámara. Para medir la caída de tensión al interior de la cámara se conecta un divisor resistivo al ánodo y se mide la caída de tensión con relación a tierra. Por otra parte para medir los cambios en la corriente se utiliza

una *Rogowski coil* la cual mide el  $i$  que circula por uno de los cables (o barras) que conectan la cámara de descarga con la tierra de los condensadores.

El paso previo a la adquisición de datos una vez instalados tanto el divisor resistivo como la *rogowski coil* es realizar la calibración experimental de ambos dispositivos.

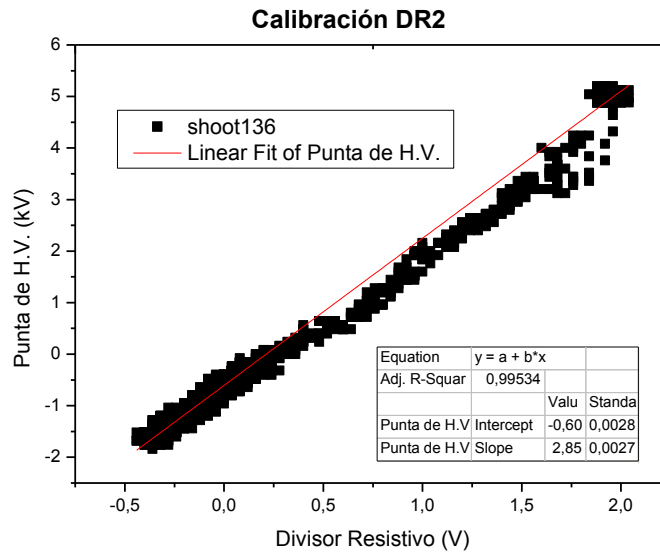
### 5.7.1. Calibración del Divisor Resistivo

Para realizar la calibración de cada uno de los tres divisores resistivos fabricados se necesitó una referencia, y esta fue la medición de voltaje entregada por una punta de alto voltaje la cual es capaz de medir 20 kV en modo continuo y hasta 40 kV en modo transiente.

El primer divisor resistivo que denominaremos DR1, fue construido con dos conjuntos de resistencia, como se esquematiza en la Figura 4.2, con  $R_1$  y  $R_2$ . Esta configuración es capaz de disipar una potencia de 20,0W. Tanto el divisor resistivo como la punta de alto voltaje se conectaron al ánodo central para medir la caída de tensión entre el ánodo y tierra. La relación entre la tensión en la punta de alto voltaje y el divisor es:

### 5.3

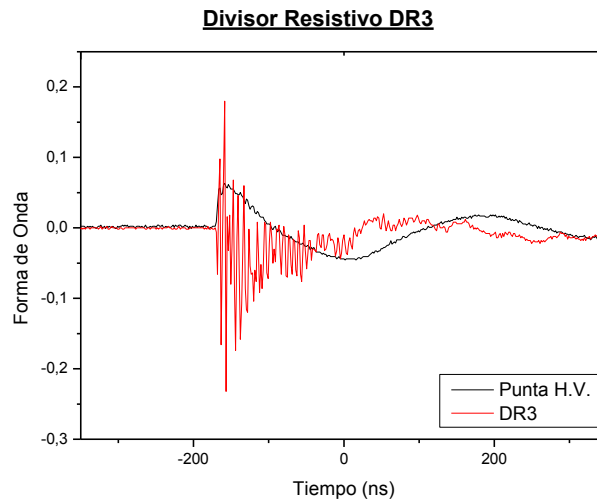
Donde  $C$  es una constante adimensional y  $V_0$  es un voltaje que corrige el desplazamiento  $t_0$  del osciloscopio (ver **Figura 5.12**).



**Figura 5.12: Calibración de divisor resistivo DR2**

Quedando la calibración del divisor resistivo DR1 como

. Posterior a la falla de este divisor resistivo se construyeron tres divisores más, uno de ellos con iguales características (DR2) pero con factor de amplificación distinto de . Habiendo fallado tanto DR2 como DR1 se construyó un nuevo divisor resistivo (DR3) con valores distintos para las resistencias, siendo estos de y , por otra parte la configuración era capaz de disipar hasta 20 W.



**Figura 5.13: Variación de la tensión en el tiempo, normalizada para configuración DR3.**

Se observa de la Figura 5.13 que los tiempos de respuesta de DR3 no es el suficiente para seguir los cambios producidos en la caída de tensión, esto puede deberse principalmente a que a estos valores de resistencia, las resistencias comerciales como las ocupadas son demasiado inductivas, generando un retardo en los tiempos de respuesta del divisor resistivo.

EL último de los divisores resistivos construido fue DR4 el cual fue construido con valores de resistencia equivalentes a DR1 y DR2, pero capaz de disipar una potencia de 90 W y soportar una la caída de tensión sobre el divisor por un tiempo mayor que el soportado por DR1 y DR2. La calibración de este divisor resistivo fue de .



### 5.7.2. Calibración de Rogowski Coil

La calibración del *rogowski coil* se realizó utilizando el principio de conservación de energía de un circuito LC. Si se considera que al tiempo  $t$  la energía del circuito es solo la energía almacenada en el banco de condensadores siendo esta de:

$$E = \frac{1}{2} C V^2 \quad (5.4)$$

Donde  $C$  es la capacitancia del banco de condensadores y  $V$  el voltaje de carga de los condensadores. Según la evolución de la corriente para un tiempo  $t'$  la caída de tensión sobre los condensadores será cero por tanto la energía del circuito quedara como:

$$E = \frac{1}{2} L I^2 \quad (5.5)$$

donde  $L$  es la inductancia del banco de condensadores (incluida la cámara de descarga) y  $I$  es el valor máximo para la corriente durante la descarga del circuito. Para que la energía se conserve es no puede haber perdidas de energía en la formación y desplazamiento de la lámina de corriente al interior de la cámara de descarga. Para que esto suceda se puede acortar el circuito puentando eléctricamente el ánodo con las barras de retorno. También no se pueden considerar las descargas realizadas con una presión al interior de la

cámara superior a 22 mbar ya que a estas presiones la lámina de corriente no es capaz de moverse y lograr el efecto pinch.

Al conservar la energía, igualando las ecuaciones 5.4 y 5.5 se puede obtener un valor teórico para la corriente máxima considerando el voltaje de carga del banco de condensadores, siendo esta de:

$$I_{max} = \frac{V_c}{\sqrt{L}} \quad (5.6)$$

Para realizar la calibración de la *rogowski coil*, se integró numéricamente la señal entregada por esta y se comparó el valor máximo de la integral ( ) de con el obtenido teóricamente para el voltaje de carga del banco de condensadores para ese disparo, luego se realizó un muestreo estadístico por sobre los valores de la ganancia ( ) quedando el factor de calibración para el *rogowski coil* de —

---

## Capítulo 6

# Resultados y Análisis

Una vez construida de la cámara de descarga y superadas las pruebas de vacío se estudió la posibilidad de operación del PF-2J en un régimen de gas estacionario (presión al interior de la cámara estable sin recambio dinámico de gases) o en flujo (presión estable al interior de la cámara de con recambio dinámico de gases).

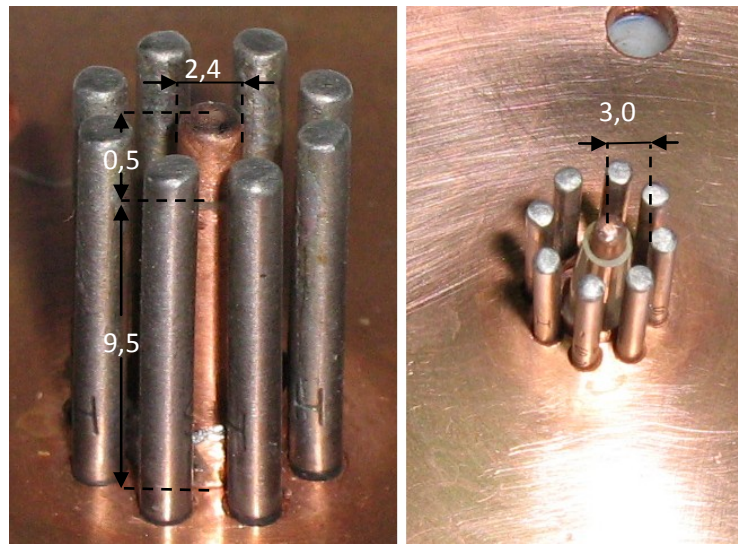
Se utilizó hidrógeno como gas de trabajo y la configuración propuesta en el apartado 5.6; por lo tanto se fijaron las dimensiones del radio del ánodo en  $r_a$ , el largo efectivo del ánodo en  $L_a$  y el largo efectivo del aislante en  $L_i$  (ver Figura 6.1).

Para un régimen de operación cuya evolución temporal es característica de los Plasma Foco, es de esperar que las señales eléctricas medidas presenten un quiebre pronunciado principalmente asociado a un cambio abrupto en la inductancia al interior de la cámara conocido con el nombre de "DIP". Este quiebre se observa como un aumento y una posterior disminución en la señal de voltaje. De manera contraria, para el  $\text{PF-2J}$  éste se presenta como una disminución y posterior aumento en la señal medida.

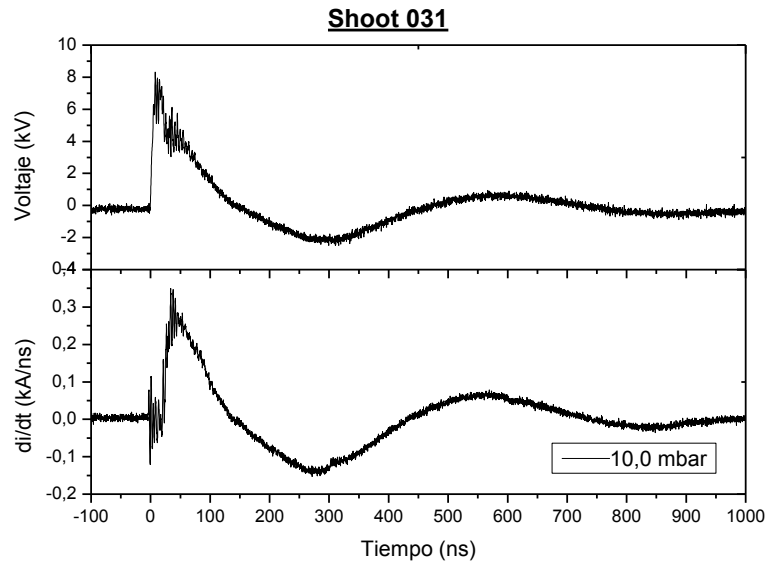
Para la configuración inicial y en un rango de presiones que varió entre los 25,0 mbar a los 0,5 mbar, no se observó ningún cambio en las señales eléctricas tanto para la configuración con barras de retorno como sin ellas, como se muestra en la Figura 6.2. Lo

anterior indica que no existe compresión de la columna de plasma, si es que ésta llega a formarse.

Por otra parte, al analizar físicamente el interior de la cámara de descarga no se observaron cambios en las estructuras del aislante ni cambios en su coloración o muestras de deposiciones metálicas. De igual forma para los retornos y el ánodo, no se observaron cambios como desgaste o decoloración debido al desplazamiento de la lámina de plasma y al transporte de materia realizado por ésta. Por otra parte, se observaron marcas de quemaduras sobre los electrodos asociadas principalmente a descargas filamentosas entre los electrodos. Considerando lo anterior es posible concluir que no hay formación de la lámina de corriente.



**Figura 6.1: Configuración inicial del PF-2J con retornos, aislante de cuarzo.**



**Figura 6.2:** Señales eléctricas correspondientes al *shoot 031*, configuración  $r=1,2$  ,  
 $\rho_0=0,5$  ,  $\epsilon=9,5$  , con retornos

Pruebas posteriores a la configuración geométrica inicial se realizaron con el propósito de encontrar la dependencia de la formación de la lámina de corriente con alguno de los parámetros que se pueden variar en la cámara, como el largo efectivo del aislante o la geometría del ánodo.

Basándose en configuraciones existentes para otro dispositivo PF de menor energía, en nuestro laboratorio se decidió mantener constante la geometría del ánodo y de los retornos, aumentando el largo efectivo del aislante llegando a . Para esta nueva configuración se observaron cambios en las señales eléctricas sólo cuando se encuentran presentes los retornos y para ambos regímenes de gas, en un rango de presiones comprendido entre [23,0; 2,0] mbar.

Un ejemplo de ello se observa en la Figura 6.3, donde estos cambios se ven muy similares al *DIP*, aunque ellos no exhiben el comportamiento esperado para el caso en que ocurre compresión de la lámina de corriente, debido a que el tiempo que demora la lámina de corriente en alcanzar la compresión aumenta con relación a la presión y esto no se observa en la Figura 6.4.

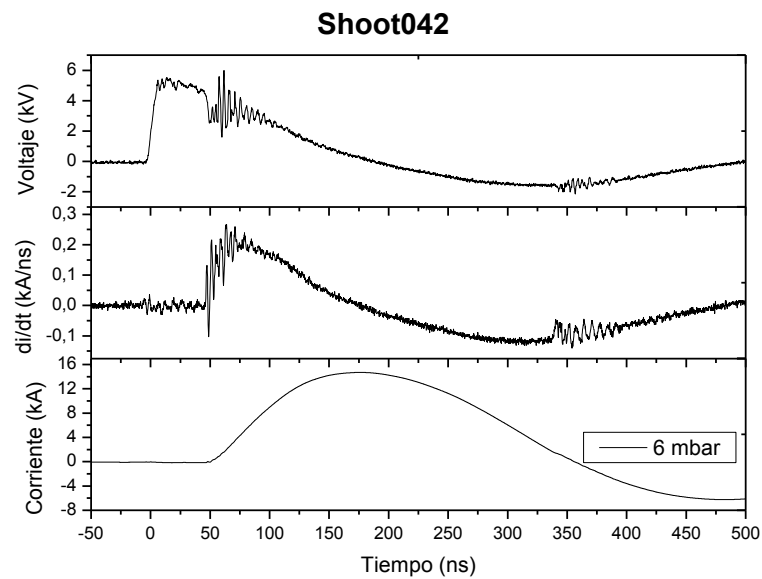
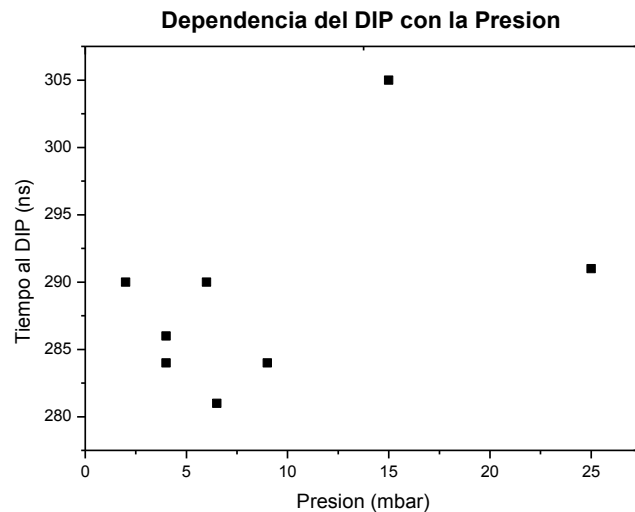


Figura 6.3: Señales eléctricas correspondientes al *shoot 042*, configuración  $r=1,2$  ,

$\sigma=0,5$  ,  $\epsilon=10,0$  , con retornos.



**Figura 6.4: Dependencia del tiempo de aparición del *dip* con la presión.**

Otro detalle importante del análisis de las señales eléctricas medidas en la descarga es el tiempo en que ocurre el cambio abrupto en las señales eléctricas, este se encuentra cercano al mínimo de corriente donde el campo magnético es mínimo, siendo también mínima la fuerza compresora debido a las fuerza de Lorentz. Por lo tanto, no habría la fuerza necesaria para comprimir la columna de plasma. Es por tanto, que el cambio abrupto en la inductancia al interior de la cámara debe reflejar otro fenómeno ocurrido en ella siendo este un fenómeno desconocido. Además no se observan cambios físicos o de aspecto en las barras de retorno o en el ánodo, lo cual indica que es probable que no se haya formado una lámina de corriente.

Análisis posteriores cambiando el largo efectivo del ánodo tampoco mostraron indicios de la formación de la lámina de corriente.

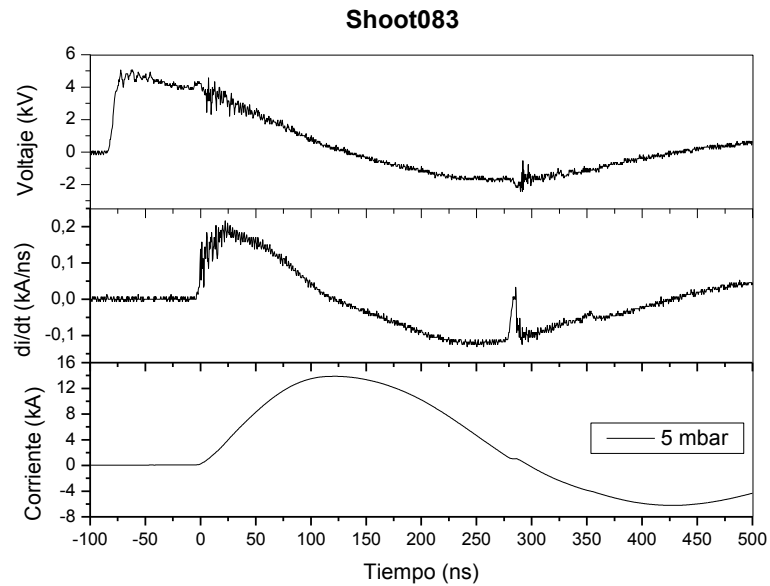
---

Ensayos posteriores fueron orientados al aumento del largo efectivo del aislante, para luego variar las dimensiones del largo efectivo del ánodo. Siguiendo esa dirección se aumento el largo efectivo del aislante hasta , y se varió el largo efectivo del ánodo dándole los valores de y . Para esta configuración de electrodos y aislante se obtuvieron quiebres en las señales eléctricas para un régimen de flujo de gas con retornos como sin estos.

Para la configuración de ánodo efectivo se realizaron descargas de la forma estándar y agregando un filo (1,0 mm de altura) a la base de los retornos con la intención de favorecer la formación de la lámina de corriente debido a la concentración de las cargas por efecto punta.

Para este largo efectivo de aislante se observó un comportamiento muy similar al caso anterior, tanto en la dependencia del “*dip*” con la presión y lo observado físicamente sobre los electrodos. La única diferencia notable con respecto a la configuración anterior es lo pronunciado de los quiebres en las señales eléctricas como se puede observar en la Figura 6.5.

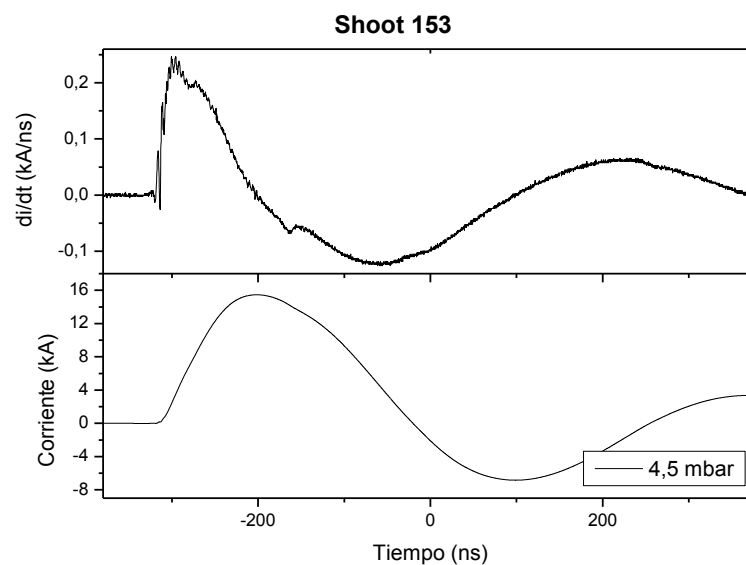




**Figura 6.5 Señales eléctricas correspondientes al *shoot* 083, configuración  $r=1,2$  ,  $\sigma=0,5$  ,  $E=11,0$  , con retornos**

A presiones inferiores a 10,0 mbar para este largo efectivo del aislante y largos superiores a éste, se presentan importantes desfases de tiempos entre la ruptura eléctrica en el *spark gap* marcada por el aumento de voltaje en el divisor resistivo y el inicio de la descarga al interior de la cámara, marcada por el inicio de la señal del di/dt, en la *Rogowski coil*. Este desfase supone un problema para las descargas, ya que al mantenerse tanto tiempo la caída de tensión en uno de los terminales del *spark gap*, el divisor resistivo debe soportar una alta tensión y disipar mucha potencia, siendo por lo general incapaz de soportarlo causando una fuga de corriente a través de él que produce su falla. Por este detalle técnico se decidió no utilizar divisores resistivos y proceder sin señal de voltaje.

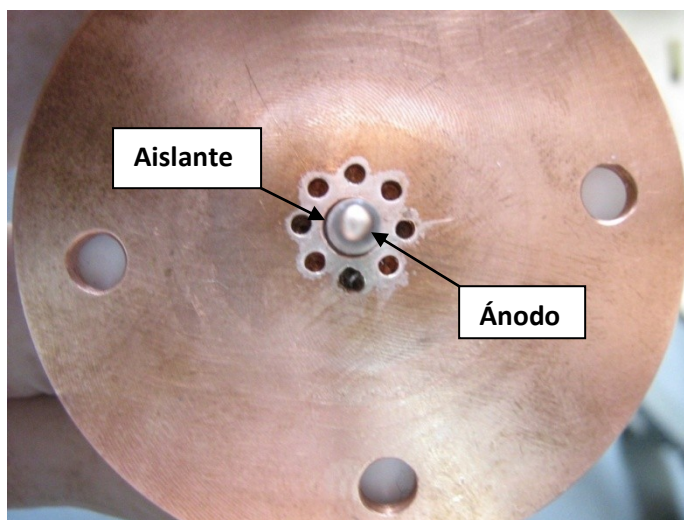
El siguiente ensayo se realizó para un largo efectivo del aislante de . Para este largo efectivo se realizaron pruebas sin retornos y en un régimen de flujo de gas, junto con un largo efectivo del ánodo con valores que entre los 1,5 mm a los 3,5 mm, obteniéndose quiebres en las señales eléctricas para los largos efectivos del ánodo entre 2,8 y 3,5 mm.



**Figura 6.6: Señales eléctricas correspondientes al *shoot* 153, configuración  $r=1,2$  ,  $r_0=3,3$  ,  $E=12,0$  , sin retornos**

Se observa en la Figura 6.6 que el *DIP* es cercano al máximo de corriente lo cual hace que la compresión de la columna de plasma se realice con una fuerza de Lorentz también máxima. Por otra parte, para esta configuración se observa desgaste de los materiales tanto para el cátodo (Figura 6.7) como para el largo efectivo del ánodo (Figura 6.8), lo

cual es evidencia de la formación de la columna de plasma y del avance de esta ocurriendo lo que se conoce como la fase axial (ver 3.3.2).

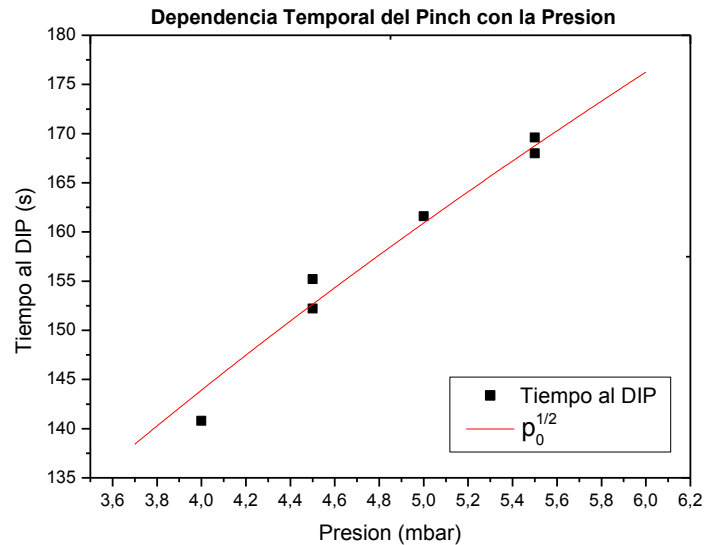


**Figura 6.7:** La imagen muestra el desgaste producido por la lámina de corriente sobre el disco a tierra.



**Figura 6.8:** Imagen del ánodo, muestra desgaste del material por acción de la lámina de corriente.

Por otra parte los quiebres en la señal para esta configuración (manteniendo constante) poseen cierta dependencia con respecto a la presión como se observa en la Figura 6.9.



**Figura 6.9: Dependencia del tiempo al *dip* (*pinch*) con la presión.**

Si consideramos que el tiempo que demora la lámina de corriente hasta el momento de compresión o pinch es el tiempo que le toma superar la fase axial ( ) y la fase radial ( , los cuales poseen un valor teórico de [5]:

$$\tau_{pinch} = \frac{1}{\omega_p} \left( \frac{c}{v} \right) \left( \frac{r_a}{L} \right) \left( \frac{I_c}{I} \right) \left( \frac{p}{p_0} \right) \left( \frac{\gamma}{\gamma_0} \right) \quad (6.1)$$

$$\tau_{pinch} = \frac{1}{\omega_p} \left( \frac{c}{v} \right) \left( \frac{r_a}{L} \right) \left( \frac{I_c}{I} \right) \left( \frac{p}{p_0} \right) \left( \frac{\gamma}{\gamma_0} \right) \quad (6.2)$$

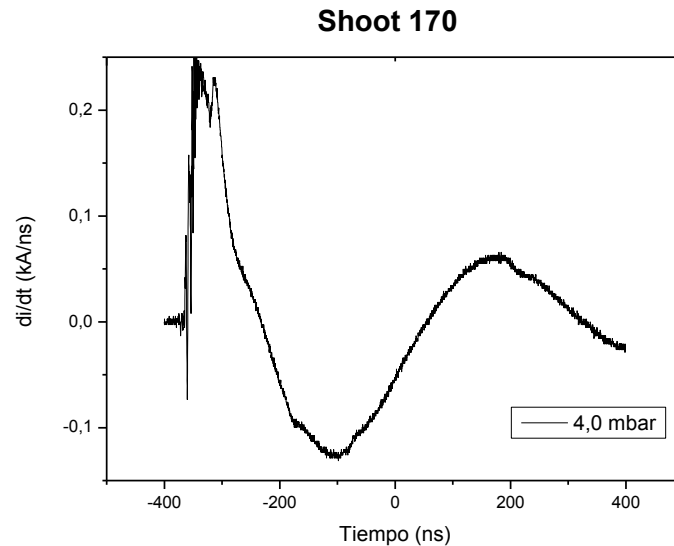
donde  $c$  es la razón de aspecto (ver 3.1),  $r_a$  es el radio del ánodo,  $\epsilon_0$  es permitividad del gas,  $L$  es la longitud del ánodo efectivo,  $I_c$  es la corriente característica,  $p$  es la presión al interior de la cámara y  $\gamma$  es la razón de calor específico. El tiempo hasta el pinch resulta dado por:

$$\tau_{pinch} = \frac{1}{\omega_p} \left( \frac{c}{v} \right) \left( \frac{r_a}{L} \right) \left( \frac{I_c}{I} \right) \left( \frac{p}{p_0} \right) \left( \frac{\gamma}{\gamma_0} \right) \quad (6.3)$$

De la ecuación 6.3 se tiene que para una configuración fija, el tiempo hasta el momento del pinch varia como  $\frac{1}{\omega_p}$  lo cual es consistente con la evolución del pinch mostrada en la Figura 6.9. En virtud de lo anterior se puede concluir que el quiebre en la señal del  $di/dt$  fue originado, para esta configuración, por la compresión de la columna de plasma en la parte superior del ánodo.

Por otra parte cuando el gas al interior de la cámara fue deuterio, se observa *DIP* a presiones inferiores a las del hidrógeno (para la misma configuración de electrodos). Esto se debe principalmente a la mayor masa de las moléculas de deuterio. La mayor masa de las moléculas de deuterio hace que la velocidad de la lámina de corriente sea menor que para hidrogeno a igual  $I$ ; por tanto, el pinch se aleja temporalmente del máximo de

corriente haciendo menos eficiente la compresión, dando como resultado menor emisión y *DIP* menos marcados (Figura 6.10).



**Figura 6.10: Señales eléctricas correspondientes al *shoot* 170, configuración  $r_1=1,2$  ,  $r_0=3,2$  ,  $E=11,9$  , sin retornos**

Si bien no fue posible medir emisión de neutrones cuando el gas fue deuterio, ello no descarta la existencia de emisión debido a dos causas. La primera de ellas es la baja cantidad de neutrones esperados, considerando los modelos de escalamiento para el *yield* de neutrones (ecuaciones 3.10 y 3.11); las cuales son de 102 neutrones para la ecuación **3.10** con una energía de 3,2 J y neutrones para la ecuación 3.11 con una corriente de 17,9 kA para un ángulo sólido de  $\Omega$  srad.

La segunda causa es el tiempo del *DIP*, el que se encuentra lejos del máximo de corriente.

Por tanto los neutrones esperados, si es que existe emisión, son muchos menos que los

esperados por las aproximaciones para el *yield*, siendo así un número muy reducido, lo cual hace muy difícil su detección.

Por otra parte la existencia de DIP debido a la compresión de la columna de plasma no es evidencia suficiente para asegurar la emisión de neutrones debido a procesos termonucleares o no termonucleares del tipo *beam - target*.

---

# Capítulo 7

## Conclusiones y Perspectivas de Trabajos Futuros

### 7.1. Conclusiones

Uno de los logros de este trabajo de investigación fue el diseño y construcción de un acelerador de partículas del tipo plasma foco, capaz de funcionar con una baja energía almacenada de tan solo 2 J, lo que viene a llenar un vacío en el desarrollo de los plasma foco en el rango de energía del orden de la unidad de joules.

Por otra parte, la construcción del PF-2J se realizó cumpliendo los requerimientos de tamaño e independencia de la cámara de descarga, logrando así un dispositivo plasma foco de un volumen menor a otras máquinas existentes, que operan con energías tanto inferiores como superiores.

Además, los ensayos en el PF-2J modificando la configuración de los electrodos, aislante y presión de operación; mostraron las condiciones a las que el acelerador de partículas funciona en una forma óptima para la operación con  $H_2$ . Lográndose de esta forma la compresión de la lámina de plasma en el máximo de la corriente, como se observa en la Figura 6.6.



## 7.2. Perspectivas de Trabajos Futuros

Las perspectivas de trabajos futuros deben ser orientadas principalmente al aumento de la presión óptima de operación en  $H_2$  y así asegurarse de que la presión en operación de  $D_2$  no sea cercana a cero. De esta forma se opera en un rango de presiones donde es más probable que se forme la lámina de corriente. Además, al aumentar la presión de operación, disminuyen las diferencias entre el inicio de la descarga al interior de la cámara y la ruptura eléctrica en el *spark gap*.

Al analizar la configuración que reportó el mejor rendimiento, se obtiene un valor del *Drive Parameter* de  $\bar{\quad}$ , que es menor al valor óptimo descrito [2]. Es por esto que para mejorar este índice se debe disminuir el radio efectivo del ánodo, para de esta forma poder aumentar la presión de operación en  $H_2$ .

Además, como se observó en el capítulo 6, existe cierta relación entre la formación de la lámina de corriente y el largo efectivo del aislante. Por lo tanto, las perspectivas de trabajo posteriores también deben ir orientadas al aumento del largo del aislante para ver la posibilidad de optimizar la operación del PF-2J.

---

# Bibliografía y Referencias

## Bibliografía

- A. Bernard; H Bruzzone; P. Choj; H. Chuaqui; V. Gribkov; J. Herrera; K Hirano; A. Krejci; S. Lee; C. Luo; F. Mezzetti; M. Sadowski; H Schmidt; K. Ware; C. S. Wong; V. Zoita, Scientific Status of Plasma Focus Research, J. Moscow Phys. Soc., vol. 8, págs. 93 – 170, 1998.
- Leopoldo Soto, New Trends and Future Perspective on Plasma Focus Research, Plasma Phys. Control Fusion, vol. 47, N° 5A, págs. 361 – 381, 2005.
- Raymond A. Serway; Clement J. Moses; Curt A. Moyer, “Física Moderna”, 3ª ed., vol. I, Thomson, Mexico, 2006.
- Kenneth S. Krane, “Introductory Nuclear Physics”, 2ª ed., vol. I, John Wiley & Sons, Canada, 1988.
- Tipler; Mosca, “Física Para la Ciencia y Tecnología”, 5ª ed., vol. II, Reverté, España, 2005.

---

## Referencias

1. *Scientific status of plasma focus research*. **Bernard, A., y otros.** 8, 1998, J. Moscow Phys. Soc., Vol. I, págs. 93-170.
2. *New trends and future perspectives on plasma focus research*. **Soto, Leopoldo.** 2005, Plasma Phys. Control Fusion 47, págs. A361-A381 .
3. *El Efecto Z-Pinch y la fusión nuclear controlada*. **Pouzo, Jorge.** s.l. : No publicado, 1985.
4. *Nanofocos: an ultra-miniature dense pinch plasma focus device with submillimetric anode operating at 0.1J*. **Soto, Leopoldo, y otros.** 2009, Plasma Sources Sci. Techno. 18.
5. *Dimensions and Lifetime of Plasma Focus Pinch*. **Lee, Sing y Serban, Adrian.** 1996, IEEE Transactions on Plasma Science, vol 24 N°3, págs. 1101-1105.
6. *Current and Neutron Field Scaling of fast High Voltage Plasma Focus*. **Decker, y otros.** 1980, Plasma Physics, Vol22, págs. 245-260.