



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

CENTRO DE FÍSICA APLICADA Y TECNOLOGÍA AVANZADA

EVALUACIÓN DE UN GENERADOR DE ONDAS  
DE CHOQUE DE DOBLE CABEZAL PARA  
APLICACIONES BIOMÉDICAS

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

**Licenciado en Tecnología**

PRESENTA:

**José Germán Cortés González**

DIRECTOR DE TESIS:

M. en C. Francisco Fernández Escobar

CODIRECTOR DE TESIS:

Dr. Achim Max Loske Mehling



QUERÉTARO QRO., NOVIEMBRE DEL 2017



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

A MI FAMILIA,  
MARÍA CATALINA GENOVEVA GONZÁLEZ CRUZ,  
JOSÉ GERMÁN CORTÉS REYNOSO,  
DANIEL ANTÓN CORTÉS GONZÁLEZ  
A AQUELLOS QUE SIEMPRE ME APOYARON.

## AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer en primer lugar a Rodolfo Nava Ordoñez y a su familia, Araceli Ordoñez Pérez, Rodolfo Nava Valdovinos y Paulina Nava Ordoñez por todo el apoyo que me han dado durante mi vida en Querétaro.

También agradezco a la UNAM por todas las oportunidades que me ha dado y a mis compañeros y amigos que me han acompañado durante este largo camino: Itzel Alexia Ávila Castro, Ángel Ollín Tinoco Martínez, Narciso Roberto Martínez Lévaro, Rubicelia Martínez Patlán, Guadalupe Jimena Hernández Rodríguez, Pablo Vicente Gómez Lauria, Maritere Domínguez Hernández, Rodrigo Brito Interiano, Víctor Hugo Maya Sandoval, Gabriel Iván Elías Clausen, Eleonor Gómez Rebolledo, Araceli Gómez Rebolledo, Óscar Valdés Hernández y Ricardo García Luna.

Le agradezco a mis tutores M. en C. Francisco Fernández Escobar y Dr. Achim Max Loske Mehling por permitirme colaborar en este gran proyecto.

También agradezco a mis sinodales: Dr. Ángel Luis Rodríguez Morales, D. I. Adrián Hendrik Oskam Voorduin, M. I. Rafael Guadalupe Chávez Moreno y Dr. Saúl Daniel Santillán Gutiérrez por su revisión y sus valiosos comentarios que han ayudado a perfeccionar este trabajo.

Por último, quiero agradecer al jefe del taller mecánico de CFATA: Sr. René Preza Cortés, por su gran, gran apoyo en la construcción del GET y a la laboratorista Paula Bernardino Peláez por su apoyo en los experimentos para este trabajo.

## **RESUMEN**

Se presenta el diseño y desarrollo de un generador de ondas de choque de tipo electrohidráulico con doble emisor (cabezal), para transferencias y concentraciones de energía basadas en las propiedades de los fenómenos ondulatorios mecánicos abruptos. La innovación de este equipo consiste en que puede emitir parejas de frentes de choque sucesivos, separados por un tiempo en el orden de decenas y centenas de microsegundos (50  $\mu$ s a 950  $\mu$ s) y con incertidumbre de  $\pm 5$   $\mu$ s, los cuales permiten reforzar la cavitación acústica cuyos efectos tienen múltiples aplicaciones en áreas de medicina y biología, tales como la litotricia extracorpórea, la transformación de bacterias y la transfección celular, entre otras.

## **ABSTRACT**

The design and development of an electrohydraulic shock wave generator with a double emitter (head) for transfer and concentration of energy based on the properties of abrupt mechanical wave phenomena is presented. This equipment's innovation is the ability to emit couples of successive shock fronts, separated by a time lapse in the order of tenths to hundredths of microseconds (50  $\mu$ s to 950  $\mu$ s) and  $\pm 5$   $\mu$ s of uncertainty, which allows reinforcement of acoustic cavitation whose effects have multiple applications in medical and biological areas, such as extracorporeal lithotripsy, bacteria transformation and cellular transfection, among others.

# ÍNDICE

	Página:
<b>Introducción</b>	<b>1</b>
<b>Capítulo 1: Antecedentes y presentación del trabajo</b>	<b>3</b>
1.1 Ondas de choque	5
1.2 Generación y concentración de las ondas de choque	7
1.2.1 Generación de ondas de choque por el método electrohidráulico	9
1.2.2 Generación de ondas de choque por el método piezoeléctrico	11
1.3 Aplicaciones de las ondas de choque	13
1.4 Mecanismos involucrados en la fragmentación de urolitos	16
1.5 Cavitación acústica y efecto <i>tándem</i>	18
1.6 Justificación	22
1.7 Hipótesis	22
1.8 Objetivos	23
1.9 Alcance	23
<b>Capítulo 2: Diseño y desarrollo del generador de ondas de choque GET</b>	<b>24</b>
2.1 Criterios de diseño y etapas constitutivas del generador novedoso	25
2.2 Partes diseñadas, ensambladas, maquinadas o rehabilitadas para el GET	27
2.2.1 Tina de pruebas	27
2.2.2 Etapas de carga y descarga de alto voltaje	29
2.2.3 Generador de pulsos con retardo variable	39
2.3 Ensamblado del generador electrohidráulico de doble cabezal	40
2.3.1 Diseño de la estructura general	40
2.3.2 Acabado y colocación de la tina de pruebas	43
2.3.3 Conexiones eléctricas del GET	45

2.3.4 Fuente de alto voltaje	48
2.3.5 Conexión al alto voltaje del generador MEXILIT	53
2.3.6 Acabado final del GET	54
<b>Capítulo 3: Evaluación del generador de ondas de choque GET</b>	<b>56</b>
3.1 Caracterización de parámetros de operación y control	56
3.2 Estandarizado de modelos de cálculos renales	60
3.3 Pruebas de fragmentación	61
<b>Capítulo 4: Discusión de resultados</b>	<b>63</b>
4.1 Caracterización de parámetros de operación y control	63
4.2 Pruebas de fragmentación	69
4.3 Conclusiones y perspectivas de mejoras	70
<b>Referencias bibliográficas</b>	<b>72</b>
<b>Apéndice 1: Reportes bimestrales de servicio social</b>	

## INTRODUCCIÓN

Con esta tesis se concluye el proyecto “Diseño y construcción de un generador de ondas de choque de doble cabezal para aplicaciones biomédicas”, al cual también se le dedicaron cuatro estancias de investigación (asignaturas de la carrera) y el servicio social.

Por motivos de documentación para el Laboratorio de Ondas de Choque (LOCH) del Centro de Física Aplicada y Tecnología Avanzada (CFATA) de la UNAM, lugar donde se desarrolló el proyecto, en este documento se presentan de forma detallada las actividades realizadas en las estancias, así como las comprendidas propiamente en el protocolo registrado para esta tesis.

Para facilitar la comprensión de ambos aspectos, así como para los lectores no familiarizados con las ondas de choque, el documento se encuentra organizado de la siguiente manera: En el capítulo 1 se presentan los antecedentes y conceptos sobre el tema, tales como la definición de una onda de choque, las técnicas para su generación, propagación y concentración, sus aplicaciones en la litotricia extracorpórea y los mecanismos físicos involucrados en la misma. Posteriormente, se justifica el trabajo y se comenta sobre su alcance.

El capítulo 2 trata el proyecto desde los criterios de diseño, su desarrollo y hasta el ensamblado de un prototipo de laboratorio funcional. Dicho desarrollo ocupa la mayor parte del capítulo, ya que se describen todas las partes requeridas para la construcción del generador novedoso, las cuales fueron agrupadas en 5 etapas: la tina de pruebas, las unidades de carga y descarga de alto voltaje, la fuente de alto voltaje, el generador de pulsos con retardo variable y la estructura metálica del conjunto, así como su cableado.

En el capítulo 3 se describen las evaluaciones realizadas al equipo, comenzando con la medición de las presiones inherentes a las ondas de choque concentradas para diversas energías liberadas en su generación (voltajes de descarga). Se continúa con la descripción

sobre el estandarizado de modelos artificiales de cálculos renales, los cuales fueron necesarios a las pruebas de fragmentación de los mismos, utilizando el generador electrohidráulico *tándem* (GET) en tres modalidades de ataque: monopolso, simultáneo y *tándem*. Los resultados de dichas pruebas son discutidos en el capítulo 4, comparando éstos con los de otro equipo del mismo tipo pero convencional (generador Mexilit), a fin de emitir las conclusiones pertinentes, así como perspectivas de mejoras a futuro.

Finalmente, se incluyen las referencias bibliográficas consultadas y un anexo (apéndice 1) que contiene los reportes bimestrales del servicio social mencionado, donde se da a conocer más a detalle las actividades al respecto.

# CAPÍTULO 1

## ANTECEDENTES Y PRESENTACIÓN DEL TRABAJO

En la naturaleza existen diversos fenómenos ondulatorios, los cuales se pueden agrupar en dos grandes clases: los de ondas mecánicas y los de ondas electromagnéticas. Las ondas mecánicas son aquellas que requieren de un medio material, ya sea sólido, líquido o gaseoso, para propagarse. En estos casos, las partículas del medio oscilan alrededor de un punto fijo sin que haya un desplazamiento neto de las mismas en alguna dirección preferencial; es decir, hay movimientos del medio sin que se transporte la materia que lo constituye. Las ondas electromagnéticas no requieren de medio alguno para su propagación, como es el caso de la luz, que puede propagarse aún en el vacío interestelar. Es un hecho que en los fenómenos ondulatorios, aun cuando no hay transporte de materia, sí hay transporte de energía. Los fenómenos ondulatorios electromagnéticos quedan fuera del contexto de este trabajo, por lo que en lo sucesivo todas las ondas referidas en el mismo son mecánicas.

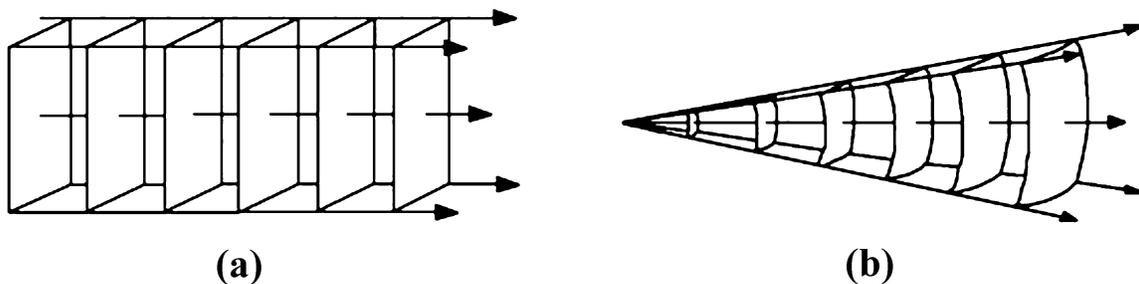
Si se arroja un objeto a un estanque de agua, se pueden ver las ondas que se forman en la superficie del estanque como una serie de círculos que se alejan del lugar donde cayó el objeto, como se muestra en la Fig. 1.1. En cada círculo, todos los puntos se encuentran en el mismo estado de movimiento y definen una superficie llamada *frente de onda*.



**Fig. 1.1** Ondas sobre una superficie de agua.

Si la densidad del medio es uniforme, la dirección de propagación de las ondas será perpendicular al frente de onda. Una línea perpendicular a los frentes de onda en la dirección del movimiento de las ondas se denomina rayo.

Cuando las perturbaciones viajan en una sola dirección, se tiene una onda plana, la cual se caracteriza porque en un determinado instante las condiciones son las mismas en todas las partes de cualquier plano perpendicular a la dirección de propagación. En la Fig. 1.2a se ilustra una onda plana, donde cada plano representa un frente de onda separado una longitud de onda del siguiente y las flechas mostradas representan los rayos. Para las ondas esféricas, generadas por una perturbación puntual, se tiene una situación tridimensional originada por un movimiento que se propaga en todas las direcciones, por lo que los rayos aparecen de manera radial y perpendiculares a superficies esféricas también espaciadas por una longitud de onda (Fig. 1.2b).



**Fig. 1.2 Tipos de frentes ondulatorios. (a) Onda plana. (b) Onda esférica.**

Según sea la dirección del movimiento de oscilación con respecto a la dirección de propagación de las ondas, éstas se pueden clasificar como ondas longitudinales u ondas transversales. Las ondas longitudinales son aquellas en las que el movimiento de oscilación es paralelo a la dirección de propagación de la onda, como el sonido. En las ondas transversales, el movimiento de oscilación es perpendicular a la dirección de propagación de la onda, como las ondas en la superficie del agua mostradas en la Fig. 1.1. Para más detalles sobre las ondas mecánicas, puede consultarse la bibliografía al respecto <sup>[1]</sup>.

## 1.1. Ondas de Choque

Dentro de la física y particularmente en la mecánica, el concepto “ondas de choque” no se refiere a fenómenos ondulatorios continuos, sino más bien se utiliza para definir la propagación de frentes de choque sucesivos en un medio material que puede ser sólido, líquido o gaseoso. Aún cuando los frentes de choque se originan de forma muy diferente a la de los fenómenos estrictamente ondulatorios, su propagación y efectos pueden explicarse mediante las leyes de la acústica. Un frente de choque hace vibrar la materia y por ello transporta a través de la misma parte de la energía que lo ocasionó. También se puede afirmar que un frente de choque está caracterizado por una discontinuidad de presión muy fuerte: una compresión seguida de una dilatación que se propaga en el medio, transportando energía. Así, al pasar el frente de choque por un sitio dado, la presión aumenta repentinamente y después disminuye a valores menores de su nivel inicial, para finalmente regresar al equilibrio. Este evento es relativamente rápido, ya que los frentes de choque viajan a una velocidad ligeramente mayor que la del sonido en el medio <sup>[2]</sup>; así, por ejemplo, para un frente de choque viajando en agua (con velocidad de aproximadamente 1500 m/s), el tiempo que tarda en cruzar una región de 1 cm (0.01 m) resulta de 6.67  $\mu$ s.

También se sabe que la cantidad de energía que transporta un frente de choque disminuye a medida que éste se aleja de la región de generación, ya que el medio material de propagación también va disipando la energía liberada en forma de vibraciones y calor, entre otros. Si el volumen del medio de propagación es relativamente grande con respecto a la región y energía de generación del frente de choque, la energía transportada por este terminará por disiparse completamente en el medio.

La generación de un frente de choque ocurre por un cambio súbito del estado termodinámico del medio; es decir, por variaciones abruptas de la presión, densidad y temperatura causadas por una liberación repentina de energía en dicho medio. El ejemplo más común al respecto es en una explosión. Se puede decir que la “envolvente” de la

explosión es el frente de choque propagándose, según se ilustra en la Fig. 1.3. Indudablemente, toda explosión involucra liberación abrupta de energía, con efectos destructivos no sólo en la región de la explosión, sino también en su entorno más o menos lejano (por la propagación del frente de choque), dependiendo de la intensidad de la energía liberada.



**Fig. 1.3. Producción de frente de choque por explosión.**

En las últimas tres décadas se han descubierto diversas aplicaciones benéficas de los frentes de choque en varios campos de la física, la biología, la química y la medicina <sup>[3, 4]</sup>. Estas aplicaciones requieren tanto de la generación repetible y controlada de los frentes de choque, como de su concentración adecuada en una región pequeña del espacio. Como se mencionó antes, la repetición de los frentes de choque es lo que da origen al término “ondas de choque” e inclusive se usa el singular (onda de choque) como sinónimo de frente de choque.

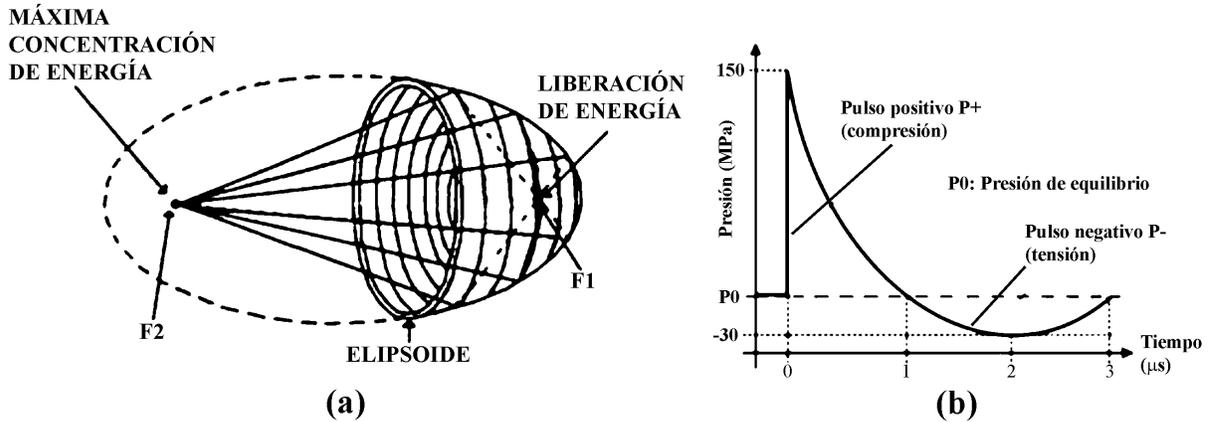
## 1.2. Generación y concentración de las ondas de choque

Todas las ondas de choque que se tratan en este trabajo son generadas y propagadas en agua, debido a las aplicaciones específicas con organismos, entre los que se encuentra el ser humano, en cuya composición hay en promedio un 75 % de agua. Tales aplicaciones se describen con mayor detalle en la sección 1.3.

Actualmente hay varios métodos para generar ondas de choque adecuadas a dichos propósitos <sup>[5]</sup>, de los cuales aquí se aluden únicamente los llamados *electrohidráulico* y *piezoeléctrico*. Este último, aún cuando no fue el utilizado en este trabajo, mereció una breve explicación por su relación con el sistema *tándem* (sección 1.5) que motivó la innovación del *doble cabezal* en este desarrollo.

La concentración de las ondas de choque se efectúa conforme al método con que se generan, ya que -entre otros- debe conocerse la geometría de los frentes de choque emitidos y la relación con su entorno. Considérese el ejercicio siguiente:

Cuando se libera abruptamente cierta cantidad de energía (decenas de Joules) en un volumen relativamente pequeño ( $\sim 1 \text{ mm}^3$ ), el frente de choque propagado a distancias relativamente grandes (decenas de cm) presenta simetría esférica (fig. 1.2b), por lo que la región de origen puede considerarse de tipo puntual. En los casos de fuentes “puntuales” la concentración se hace con reflectores elipsoidales, ya que la geometría de éstos permite reflejar gran parte del frente de choque generado (más del 50%) y enfocararlo a una región reducida del espacio (milímetros cúbicos), logrando ahí presiones “puntuales” de hasta 150 MPa ( $\sim 1500$  atmósferas). En otras palabras, si el frente de choque se genera en el foco interior (F1) de un reflector elipsoidal (ver Fig. 1.4a), la onda de choque se refleja en las paredes del mismo para concentrarse en el foco exterior (F2), logrando ahí las presiones mencionadas, según se muestra en la gráfica de la Fig. 1.4b. <sup>[5]</sup>



**Fig. 1.4 (a) Concentración de una onda de choque utilizado un reflector elipsoidal. (b) Variación de presión al paso de una onda de choque del tipo usado en aplicaciones biomédicas.**

Como se puede notar en la Fig. 1.4b, la presión en el punto de concentración de la onda de choque cambia abruptamente desde su valor de equilibrio ( $P_0$ ) hasta un valor máximo (150 MPa), para después disminuir en forma relativamente suave, cruzando dicho valor  $P_0$  hasta alcanzar un valor mínimo (-30 MPa) y finalmente regresar al equilibrio. Tales cambios ocurren en el orden de los microsegundos y a la región donde la presión supera a la de equilibrio se le conoce como pulso de compresión (P+), mientras que donde hay presiones inferiores a  $P_0$  se le llama pulso de tensión o de dilatación (P-).

En el ejercicio anterior, la liberación de energía fue de forma "puntual" aunque no se especificó la manera de hacerlo. En los inicios de las aplicaciones biomédicas de las ondas de choque se utilizaron microexplosivos [5], pero este método no prosperó tanto por la desventaja de estar reemplazando el microexplosivo por cada frente de choque emitido, como por el riesgo de almacenar muchos de ellos. En su lugar surgió el método electrohidráulico, que se utiliza hasta la fecha y se describe brevemente a continuación.

### 1.2.1 Generación de ondas de choque por el método electrohidráulico

En el método electrohidráulico <sup>[6]</sup>, la onda de choque se produce mediante una descarga eléctrica abrupta de alto voltaje -con magnitud entre 15 y 30 kV- previamente almacenados en un condensador con capacidad (C) de casi una décima de microfarad ( $C = 0.08 \mu\text{F}$ ), el cual se muestra en la parte izquierda de la Fig. 1.5, junto con la fuente de alto voltaje de c.d. que lo carga a través de la resistencia (R) limitadora de corriente. La descarga ocurre entre dos electrodos separados 1 mm, inmersos en agua y situados en el primer foco (F1) del reflector elipsoidal antes descrito, a fin de lograr la concentración mencionada, que se vuelve a ilustrar en la parte derecha de la Fig. 1.5.

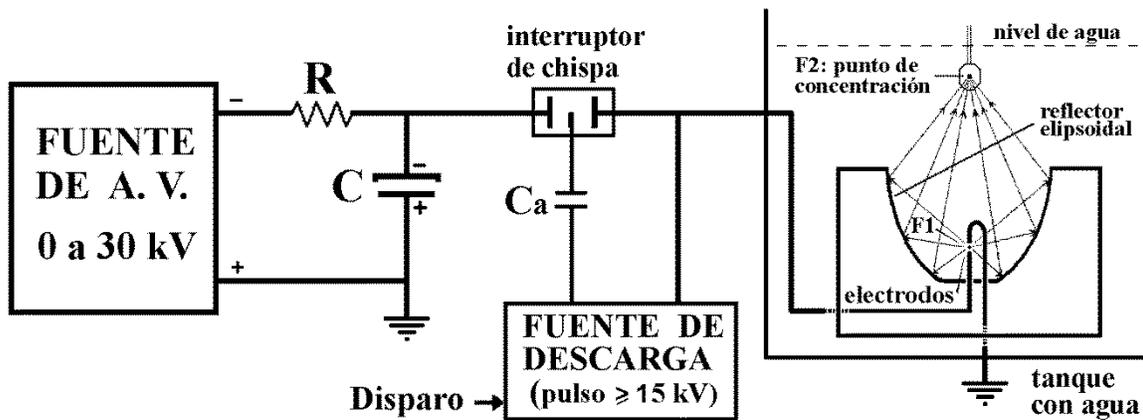


Fig. 1.5 Esquema básico de la generación y concentración de una onda de choque por el método electrohidráulico.

La fuente de alto voltaje mostrada en la figura anterior es de tipo variable, por lo que el control de la energía (E) liberada en cada descarga es mediante el alto voltaje ( $V_0$ ) preestablecido en la fuente, mismo al que prácticamente se carga el condensador (C) y el valor de la energía queda determinado por la expresión siguiente.

$$E = \frac{1}{2} C V_0^2 \quad \dots (1)$$

El proceso para repetir las descargas eléctricas (y en consecuencia las ondas de choque) es versátil, ya que para ello se utilizan las partes restantes del circuito básico mostrado en la Fig. 1.5. El funcionamiento del conjunto consiste en que inicialmente la fuente de alto voltaje carga lentamente ( $\sim 0.5$  s) el capacitor  $C$ , a través de la resistencia  $R$  (con valor de  $3.3 \text{ M}\Omega$ ), a un voltaje entre 15 y 30 kV con respecto a tierra. La descarga abrupta del voltaje así almacenado en  $C$  -y por consiguiente la generación de la onda de choque-, se produce posteriormente cuando el interruptor de chispa o “*spark gap*” cierra el circuito del ánodo de ( $C$ ) hacia los electrodos inmersos en agua, por acción de la fuente de descarga que lo controla, a través del condensador ( $C_a$ ) de acoplamiento ( $0.5 \text{ nF}$  a 30 kV).

El interruptor de chispa merece atención especial, ya que funciona como un conmutador de alta velocidad (tiempo de respuesta menor a  $10^{-7}$  s) para manejar voltajes altos. Cabe mencionar que el cierre del circuito de descarga, por las magnitudes de la tensión (15 a 30 kV) y la corriente momentánea involucrada (mayor a 100 A), no puede efectuarse mediante interruptores mecánicos o electromecánicos, debido a los efectos de corona y arco, además de la rapidez que se requiere ( $\leq 0.1 \text{ us}$ ) para provocar dichos fenómenos en forma abrupta o repentina.

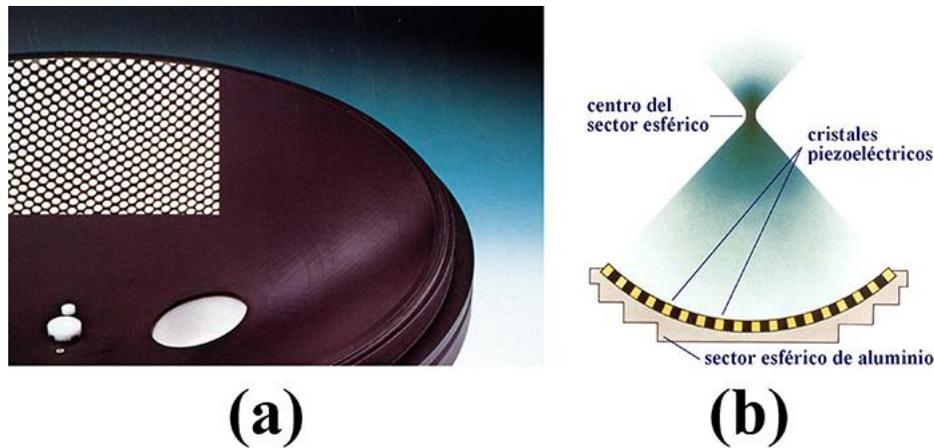
Tal interruptor de chispa está formado por tres electrodos en aire o gas inerte, de los cuales, los dos más extremos están separados una distancia mayor a 3 cm, de tal modo que al aplicar un voltaje máximo de 30 kV no ocurran efectos de corona o de arco. El tercer electrodo del interruptor de chispa está ubicado aproximadamente en la parte media o central con respecto a los electrodos extremos, de tal forma que si en este se aplica un pulso de 15 kV o más (a muy baja corriente), con respecto al electrodo extremo de salida (que conecta a uno de los electrodos inmersos en agua), se produce ionización del medio existente entre dichos electrodos (central y de salida), lo que equivale a “acercar” los electrodos extremos del interruptor de chispa, liberando por arco abrupto la alta tensión almacenada en el capacitor  $C$ . Dicho pulso de ionización proviene de una fuente de alto voltaje pulsado ( $\geq 15 \text{ kV}_{\text{pico}}$ ) a baja corriente ( $\leq 3 \text{ mA}$ ), que también se conoce como fuente de descarga o controladora de

disparo ("*spark-gap driver*"); cuyo principio de funcionamiento es similar al sistema de "encendido" de bujías en motores de combustión interna a gasolina desarrollados en las últimas décadas; es decir, este tipo de fuente recibe un pulso de nivel TTL como estímulo (señal de disparo) y proporciona el pulso necesario a dicha ionización.

### **1.2.2 Generación de ondas de choque por el método piezoeléctrico**

En el método de generación de ondas de choque conocido como piezoeléctrico <sup>[6]</sup>, se utilizan los materiales del mismo nombre (piezoeléctricos), que tienen la propiedad de convertir la energía eléctrica en mecánica y viceversa. Desde 1880, Jacques Curie y Pierre Curie descubrieron que al aplicar presión mecánica a un cristal de cuarzo, se establecían cargas eléctricas en los extremos del mismo y llamaron a este fenómeno efecto piezoeléctrico. Tiempo después se encontró que al aplicar un campo eléctrico al cristal mediante un voltaje en sus extremos, éste presentaba una deformación mecánica. Esto es el efecto piezoeléctrico inverso y se utiliza para generar ondas de choque en agua.

Los generadores piezoeléctricos están formados por un circuito de carga y disparo análogo al del método electrohidráulico, pero en este caso la descarga, en lugar de ocurrir entre electrodos inmersos en agua, actúa sobre un plato semiesférico que contiene un arreglo de aproximadamente 3000 cristales piezoeléctricos (Fig. 1.6a), todos ellos conectados en paralelo y cubiertos por una capa de material aislante e impermeable al agua, porque la superficie formada por dichos cristales es el fondo de un contenedor o tanque de pruebas, el cual se completa colocando encima las paredes laterales, que pueden ser de forma cilíndrica recta (Fig. 1.6b).



**Fig. 1.6 (a) Arreglo de cristales piezoeléctricos de un litotritor marca Richard Wolf GmbH, modelo Piezolith 2500. (b) Esquema simplificado.**

Al generar la descarga eléctrica, se aplica abruptamente un alto voltaje a todos los cristales, que los deforma momentáneamente transmitiendo energía mecánica al agua del contenedor de manera repentina. Debido a que los cristales están distribuidos sobre la superficie de un sector esférico (fondo del tanque), la energía liberada por cada uno de los cristales converge al centro (o foco) de dicho sector y antes de llegar al mismo ocurren efectos de superposición no lineales, los cuales constituyen el frente de choque, con las consecuentes presiones puntuales muy elevadas (entre 10 y 150 MPa) al momento de llegar al foco.

Como ya se mencionó, el circuito de descarga o excitación de los cristales piezoeléctricos es similar al del método electrohidráulico y se ilustra en la Fig. 1.7. La fuente de alto voltaje carga al capacitor  $C$  ( $\sim 0.5 \mu\text{F}$ ) a través de la resistencia  $R$  ( $\sim 100 \text{ k}\Omega$ ), a un voltaje entre 3 y 10 kV; el cual posteriormente se descarga sobre el arreglo de cristales al ionizar el interruptor de chispa mediante el pulso que recibe de la fuente de descarga ( $\geq 5 \text{ kV}$ ).

Por dicha similitud, el control de la energía liberada para la generación de cada frente de choque también es mediante la ecuación 1 anterior ( $E = \frac{1}{2} C V^2$ ), pero con los valores de  $C$  y  $V$  mencionados en el párrafo anterior.

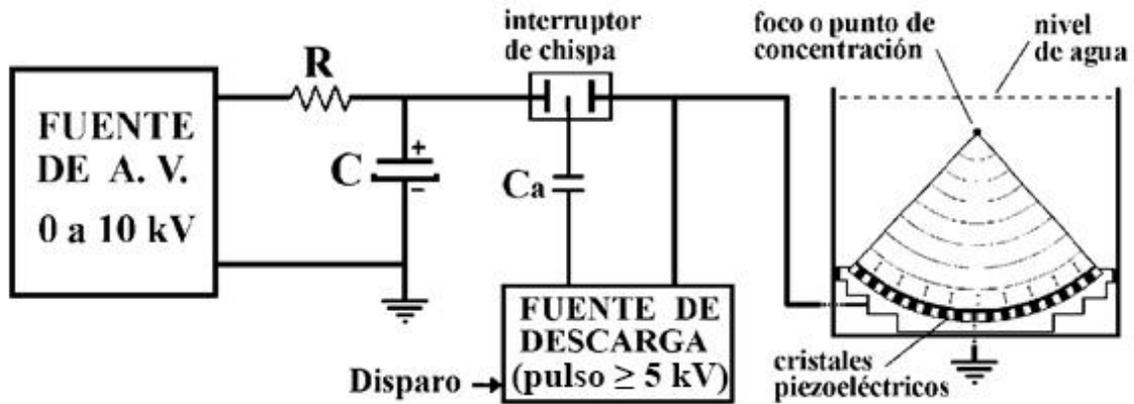


Fig. 1.7 Diagrama de un generador de ondas de choque de tipo piezoeléctrico.

### 1.3. Aplicaciones de las ondas de choque

En aplicaciones biomédicas generalmente se utiliza agua como medio de generación y propagación de los frentes de choque, debido a que la impedancia acústica de ésta es similar a la de los tejidos blandos del cuerpo humano y de muchos animales, incluyendo microorganismos. Una onda de choque generada y propagada en agua, al encontrar tejidos blandos sumergidos en la misma (o debidamente acoplados a ésta), prácticamente no sufre cambios y los atraviesa casi como si se tratara del mismo medio acuoso. Por otra parte, si los frentes de choque se concentran en una pequeña región del medio, tal concentración de energía permite obtener presiones muy elevadas, capaces de dañar objetos. Fuera de la pequeña zona de concentración, la presión es relativamente baja y no posee efectos destructivos considerables.

Lo anterior permitió el desarrollo de la técnica médica conocida como litotricia extracorpórea, la cual actualmente se usa en muchos hospitales del mundo para el tratamiento no invasivo de pacientes con cálculos renales. Se conoce como litotritor extracorporeal al aparato clínico mediante el cual se aplica dicho tratamiento, cuyo funcionamiento básico consiste en generar ondas de choque en agua, fuera del cuerpo, hacerlas pasar por el paciente y concentrar sobre el cálculo la energía liberada. La aplicación

de cientos de ondas de choque enfocadas sobre el cálculo crea esfuerzos que originan su ruptura en fragmentos muy pequeños que pueden ser eliminados por el paciente de manera natural en los días subsecuentes.

De hecho, se sabe que el descubrimiento de la litotricia extracorpórea no fue azaroso sino que fue basado en las observaciones de impactos de proyectiles no explosivos sobre blancos sólidos <sup>[7]</sup>, en los que se causaban daños esperados en la superficie y zonas cercanas al lugar del impacto (incluyendo partes internas del blanco), pero curiosamente también había daños considerables en la cara opuesta del impacto, aún en blancos con espesor y resistencia mecánica a colisiones relativamente grandes. Esto último hoy se explica porque el proyectil al impactarse con alta velocidad en el blanco (fenómeno abrupto), llega a generar una onda de choque que se propaga a través del cuerpo sólido e interacciona destructivamente con el mismo en su frontera de salida, lo cual se conoce como efecto Hopkinson (en honor a su descubridor) y se describe con mayor detalle en la sección siguiente.

El primer tratamiento exitoso de litotricia extracorpórea en un ser humano fue realizado en Alemania en 1980 <sup>[8]</sup>. A partir de entonces, han surgido diferentes aplicaciones de las ondas de choque tanto en otras ramas de la medicina (oftalmología, ortopedia, traumatología, cardiología) como en algunos campos de la química y la biología. En oftalmología, es muy conocido el padecimiento de cataratas, que hasta hace relativamente poco tiempo sólo era curable mediante cirugía. Actualmente se usan ondas de choque generadas por la energía de un rayo láser para removerlas <sup>[3, 4]</sup>.

En ortopedia, se aplican las ondas de choque para acelerar el proceso de regeneración de huesos (osteogénesis) en los casos de fracturas en personas con deficiencia al respecto, que generalmente son de edad avanzada. Es muy conocido que cuando niños y personas jóvenes llegan a sufrir una fractura ósea, el proceso de recuperación después de reacomodar e inmovilizar el área afectada, es relativamente corto (unas cuantas semanas), en comparación con las personas mayores que llegan a necesitar incluso clavos o placas metálicas para la

recuperación, misma que puede tardar varios años e incluso no llegar a sanar totalmente. Actualmente se siguen realizando experimentos con la finalidad de demostrar que la aplicación de ondas de choque a implantes de hidroxiapatita en fracturas de personas con deficiencia de osteogénesis puede acelerar tal proceso y con ello la recuperación del paciente. La hidroxiapatita es un biomaterial que se usa comúnmente para sustituir partes de la estructura ósea que el paciente ha perdido por algún padecimiento o accidente. Este biomaterial actúa como puente, permitiendo el paso de células hacia su interior, de manera que después de cierto tiempo, el hueso sustituye al biomaterial y la lesión queda reparada. Esta es una técnica que se usa con éxito desde hace varios años, aunque con resultados a largo plazo (meses). Debido a que las ondas de choque desencadenan el mecanismo de cicatrización ósea en pacientes con fracturas de cicatrización retardada, se espera que un fenómeno similar ocurra al aplicarle ondas de choque a regiones vecinas sobre un implante del biomaterial mencionado, acelerando la reposición ósea.

Dentro de la química, hay investigaciones exhaustivas encauzadas a la conservación de alimentos por métodos no térmicos y sin el uso de conservadores, ya que la mayoría de los consumidores prefieren alimentos mínimamente procesados, sin compuestos químicos y que no pierdan sus propiedades sensoriales (olor, sabor, aroma, apariencia, textura) y nutritivas (contenido de vitaminas, proteínas, minerales, etc.); es decir, lo más parecido a los alimentos frescos. En los procesos actuales de envasado no térmico se usan los conservadores (benzoato de sodio, por ejemplo), los cuales tienen la finalidad de actuar como agentes bactericidas o bacteriostáticos y asegurar la inocuidad del alimento. Aun así estos conservadores no dejan de ser una sustancia que a la larga también podría causar daños al organismo humano. Una alternativa al uso de conservadores es la pasteurización (método térmico), en la que el alimento a envasar es sometido a temperaturas altas y a presiones de vapor de agua, cuyos efectos bactericidas son indiscutibles. Desde hace aproximadamente una década, surgió la idea de usar sólo altas presiones, sin calor, para la conservación de alimentos. Recientemente se han estudiado los efectos de las ondas de choque para evaluar su potencial como método alternativo de conservación de alimentos; esto

es, usar las ondas de choque concentradas sobre el alimento, con fines bactericidas, tratando de lograr un alimento envasado de forma "más natural" [9].

En biología, las ondas de choque se usan para tratar de permeabilizar las membranas de algunas células y permitir la transfección celular; es decir, la onda de choque aplicada genera pequeñas perforaciones tanto en la membrana como en el núcleo de la célula, de tal forma que se facilita la incorporación de material genético exógeno al interior de la estructura celular. Hay perspectivas de que esta técnica, todavía bajo estudio, pudiera ser útil para el tratamiento de algunos tumores cancerígenos [3, 4].

Desde 1987, en el Instituto de Física de la UNAM., se estableció el Laboratorio de Choques Débiles, con la finalidad de realizar investigaciones en el campo de las ondas de choque enfocadas inicialmente a la medicina. A finales del siglo pasado (1999) dicho laboratorio cambió de sede y actualmente se conoce como Laboratorio de Ondas de Choque (LOCH), que pertenece al Centro de Física Aplicada y Tecnología Avanzada (CFATA) de la UNAM, en el campus Juriquilla de la ciudad de Querétaro, donde se han diseñado y construido generadores de ondas de choque experimentales tanto de tipo electrohidráulico (Mexilit) como piezoeléctrico (Generador Multifuncional), así como conversiones de litotritores clínicos a generadores de ondas de choque experimentales, con los cuales se han realizado investigaciones importantes que han llevado al desarrollo de nuevas técnicas y equipos que permiten sugerir mejoras a las características de funcionamiento y a la eficiencia de los litotritores comerciales [10, 11]. Este trabajo también pretende contribuir a dicha misión.

#### **1.4 Mecanismos involucrados en la fragmentación de urolitos**

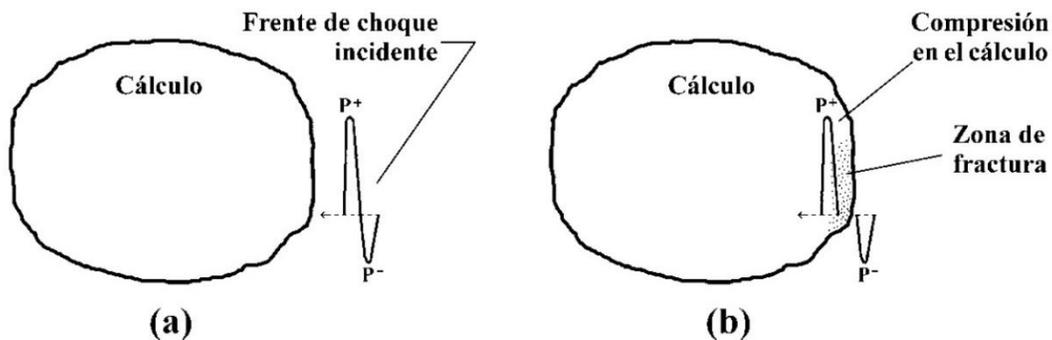
En el espectro de una onda de choque existen varias componentes con frecuencias más bajas que en el ultrasonido clínico, por lo que las ondas de choque tienen un poder de penetración en los tejidos blandos de los seres vivos mayor a dicha técnica de imagenología, además de causar cambios de presión mayores en la región de concentración. Por ello es más

recomendable el uso de ondas de choque en lugar de ultrasonido para ciertas aplicaciones médicas como el caso de la litotricia extracorpórea.

Cuando se desintegra un cálculo renal mediante dicha técnica, hay varios mecanismos involucrados en la interacción de las ondas de choque con la materia sólida [12]. Los más importantes son: el efecto de inercia, la compresión directa, el efecto Hopkinson y la cavitación acústica; los cuales se explican brevemente a continuación.

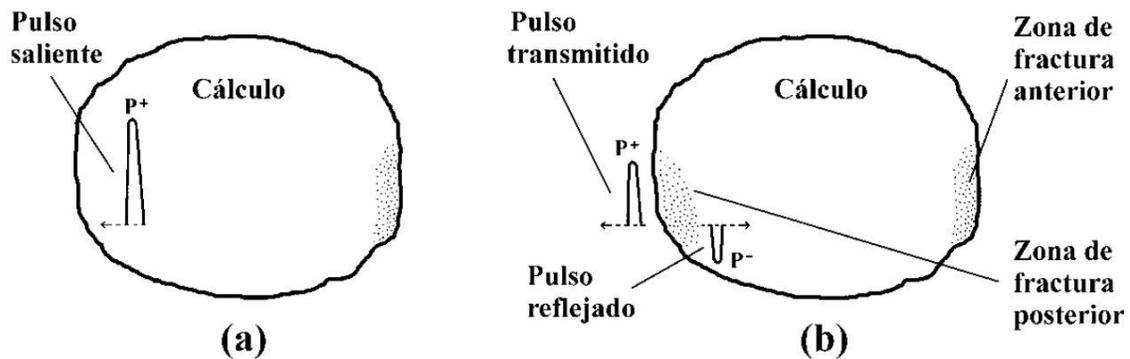
El efecto de inercia se produce porque generalmente el material sólido no tiene una estructura uniforme y al recibir cada frente de choque, las presiones que lo constituyen ( $P+$  y  $P-$ ) se propagan a su interior con intensidades diferentes, generándose tensiones variadas que tienden a fracturarlo.

La compresión directa se debe al instante de incidencia del frente de choque sobre el cálculo (Fig. 1.8a). El pulso de compresión  $P+$  (presión mayor a la de equilibrio) se transmite inicialmente al cálculo y viaja por su interior a mayor velocidad que en el agua (Fig. 8b), existiendo momentáneamente una presión muy elevada al principio de la materia sólida por donde entró el frente de choque, con respecto al medio líquido que quedó atrás y bajo la influencia del pulso de tensión  $P-$  (presión menor a la de equilibrio). Tal diferencia de presiones ocasiona esfuerzos considerables en esa zona y mediante la acción repetitiva de las ondas de choque se logra fracturar al cálculo en la región de incidencia de las mismas.



**Fig. 1.8 Efecto de la compresión directa. (a) Frente de choque llegando al cálculo. (b) Pulso de compresión transmitido al cálculo**

Después de que cada frente de choque penetra al cálculo, éste continúa viajando por su interior hasta llegar a la cara opuesta a la de incidencia (Fig. 1.9a) para después salir de la materia sólida y regresar al medio líquido. Como en esta interface el cambio es de mayor a menor densidad del medio, una parte del pulso de compresión es transmitido y otra parte es reflejada con un cambio de fase (como pulso de tensión) originando la fractura del cálculo en la cara posterior, según se ilustra en la Fig. 1.9b. Este fenómeno se conoce como el efecto Hopkinson y nuevamente la diferencia de presiones, ahora en dicha cara posterior del cálculo, causa tensiones en esa región la cual termina por fracturarse ante la acción repetida de los frentes de choque.



**Fig. 1.9. Efecto Hopkinson. (a) Frente de choque incidente en la cara posterior. (b) Nueva zona de fractura provocada por la diferencia de presión entre el pulso reflejado y el transmitido.**

### 1.5 Cavitación acústica y efecto *tándem*

El cuarto mecanismo importante en la fractura de los cálculos es la cavitación acústica. Generalmente los fluidos como el agua, sangre, u orina -circundantes a un cálculo- poseen gases disueltos y burbujas microscópicas. En la Fig. 1.10 se ilustran los cambios que sufren estas microburbujas ante el paso de una onda de choque. Inicialmente se comprimen súbitamente por la acción del pulso positivo (P+), almacenando energía potencial en su interior. Un instante después la presión disminuye drásticamente en el medio por el pulso de tensión (P-), permitiendo la liberación de dicha energía potencial y ocasionando que aumenten hasta cientos de veces su volumen, para posteriormente permanecer semi-

estables un tiempo relativamente corto (200 a 400  $\mu$ S), al cabo del cual colapsan violentamente por la presión hidrostática, provocando la emisión de ondas de choque secundarias muy intensas y chorros de líquido a velocidades muy altas (llamados *microjets*) capaces de perforar láminas metálicas de hasta 1 mm de espesor. Así entonces, las burbujas que colapsan cerca del cálculo contribuyen fuertemente a su desintegración.

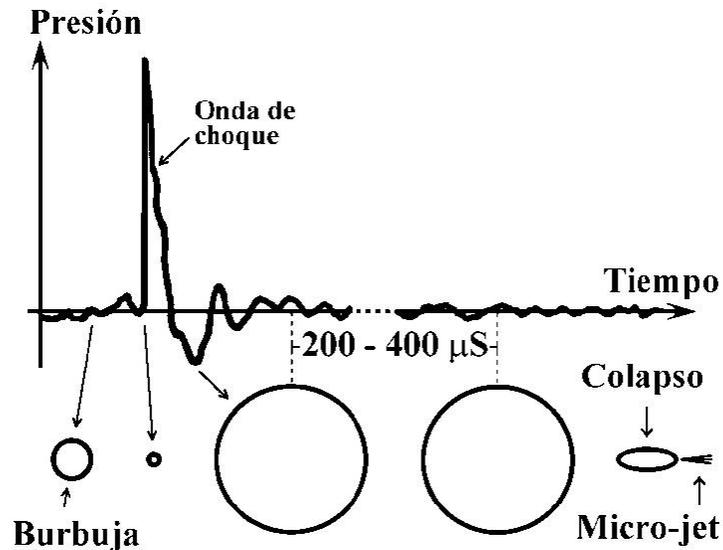
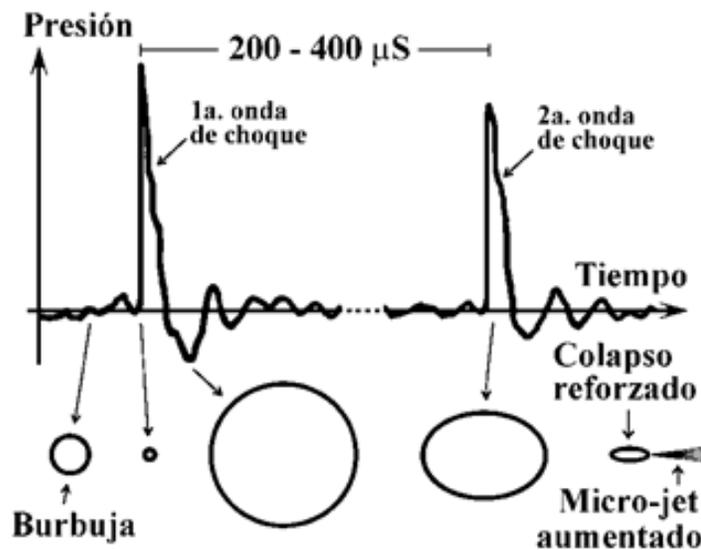


Fig. 1.10 Cavitación causada por una onda de choque.

Aun cuando las ondas de choque concentradas se aplican con éxito en la litotricia extracorpórea desde hace más de 35 años, las investigaciones al respecto continúan desarrollándose tanto para mejorar dicha técnica, como en la búsqueda de nuevas aplicaciones. La interacción de las ondas de choque con la materia viva e inanimada ha sido de gran interés a nivel mundial; y en particular en el CFATA se descubrió a principios de siglo una nueva forma de aplicar dichas ondas de choque concentradas, conocida como generación de ondas de choque *tándem* <sup>[11]</sup>.

El sistema *tándem* tiene como principio de funcionamiento el reforzar el colapso de burbujas de cavitación, a fin de incrementar la intensidad y el número de microjets y, en consecuencia, mejorar la eficiencia de fragmentación del litotritor. Para ello, se hacen incidir al cálculo y fluidos circundantes dos ondas de choque concentradas y en forma sucesiva, con un muy

pequeño y bien controlado tiempo entre ellas (en el orden de centenas de microsegundos), llamado tiempo de retardo. La primera onda de choque provoca los mecanismos de fragmentación antes descritos y particularmente la cavitación acústica. La llegada de la segunda onda de choque debe ser justo en el momento en el que la mayoría de las burbujas colapsan, a fin de incrementar la energía de corto alcance que liberan para la desintegración del cálculo. En la Fig. 1.11 se ilustra este proceso en forma análoga a la de la figura anterior.



**Fig. 1.11 Efecto *tándem***

El desarrollo del sistema *tándem* se llevó a cabo en el CFATA en el año 2001, mediante la construcción de un generador de ondas de choque experimental de tipo piezoeléctrico, denominado Generador Multifuncional, el cual fue basado en un arreglo de cristales ensamblado de fábrica (refacción de litotritor clínico). Posteriormente, en el año 2005, dicho sistema fue adaptado a un litotritor clínico del mismo tipo, marca Richard Wolf GmbH (Knittlingen, Alemania) modelo Piezolith 2300. Se utilizó el método piezoeléctrico para probar por primera vez la generación de ondas de ondas de choque *tándem*, por la rapidez con que responden los cristales involucrados ( $\sim$  ns), entre otros aspectos.

Para lograr lo anterior, básicamente se duplicaron los circuitos de excitación de los cristales piezoeléctricos (ver Fig. 1.7 y Fig. 1.12) y se agregó un generador de pulsos TTL

especialmente construido <sup>[11]</sup> para operar el conjunto, tanto en modo convencional, como en modo *tándem*. El criterio primordial de diseño en dicho generador de señales TTL, fue la emisión de ya sea pulsos singulares de 50  $\mu$ s de ciclo de trabajo, o bien parejas sucesivas de los mismos con un tiempo de retardo entre ellos muy bien controlado y variable dentro del intervalo de 50  $\mu$ s a 950  $\mu$ s. También se contempló que la repetición de cada evento (emisión monopulso o bipulso), pudiera hacerse ya sea en forma manual o de manera automática a frecuencias entre 0.33 y 3 eventos por segundo.

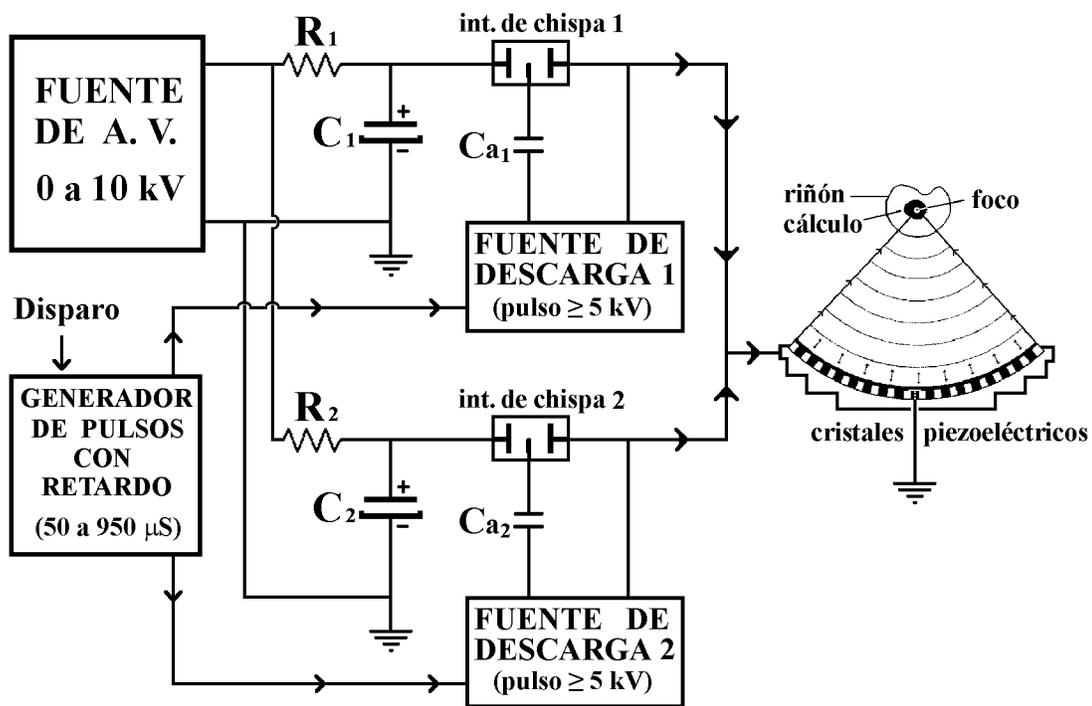


Fig. 1.12. Esquema básico del generador piezoeléctrico *tándem*.

También cabe hacer notar que el tiempo de retardo que separa los frentes de presión *tándem* es de varios órdenes de magnitud menor que el tiempo entre descargas sucesivas de un tratamiento clínico de litotricia extracorpórea, de modo que un evento de frentes de choque *tándem* aparenta ser un fenómeno singular. Esto último ha sido de provecho al tratar de aumentar la eficiencia de los litotritores clínicos, sin causar mayor daño a los tejidos circundantes al cálculo. De hecho, ya se han publicado estudios <sup>[12]</sup> tanto *in vitro* como *in vivo*

en los que se ha demostrado que un generador de frentes de choque *tándem* puede reducir el tiempo de tratamiento típico de litotricia extracorpórea hasta en un 50%, sin causar mayor daño a los tejidos.

### **1.6 Justificación**

Aun cuando desde la década pasada se logró mejorar la eficiencia de un litotritor clínico piezoeléctrico utilizando ondas de choque *tándem*<sup>[14]</sup>, todavía existe el inconveniente de que los litotritores clínicos de tipo piezoeléctrico son muy comunes en Europa pero escasos en América (incluyendo México), donde la mayoría de los hospitales cuentan con litotritores electromagnéticos y electrohidráulicos, por lo que fue deseable probar el sistema *tándem* en la generación de ondas de choque de este último tipo. Lamentablemente, en la generación electrohidráulica de cada onda de choque, la región emisora tarda un tiempo relativamente largo (cerca de 3 ms) en regresar a las condiciones que permitan emitir una segunda onda de choque. Ya se ha demostrado<sup>[14]</sup> que debido a que cada onda de choque es producida por una descarga eléctrica de alto voltaje entre dos electrodos sumergidos en agua, existe momentáneamente la formación de plasma y una burbuja de vapor residual, que impide producir un segundo frente de choque en los tiempos en los que ocurre la cavitación acústica (décimas de ms). Es por ello que en el CFATA se planeó la implementación de un nuevo generador electrohidráulico capaz de producir el efecto *tándem* mediante el uso de dos pares de electrodos con sus respectivos reflectores (cabezales) enfocados a un mismo punto, de manera que sea posible generar dos ondas de choque sucesivas en los intervalos de tiempo requeridos.

### **1.7 Hipótesis**

Los frentes de choque *tándem* concentrados, pueden ser producidos por métodos electrohidráulicos, sincronizando adecuadamente (en tiempo y espacio) los efectos de dos regiones de rompimiento eléctrico abrupto en el mismo medio acuoso.

## **1.8. Objetivos**

Los objetivos de esta tesis son consecuencia de actividades previas dedicadas al proyecto del generador de ondas de ondas novedoso, el cual fue inicialmente planeado en febrero del 2014. Desde esa fecha y hasta noviembre del año pasado, se participó en el diseño y desarrollo de sus diversas etapas y componentes, mediante varias “estancias de investigación” (asignaturas de la carrera) y la prestación del servicio social en el Laboratorio de Ondas de Choque del CFATA. Por ello los objetivos generales de esta tesis (iniciada en noviembre del 2016), consisten en participar en el ensamblado final del generador electrohidráulico *tándem*, hacer las pruebas pertinentes de su funcionamiento básico (carga y descarga de alto voltaje, medición de presiones, etc.), para finalmente efectuar las rigurosas pruebas de fragmentación de modelos artificiales estandarizados de cálculos renales, a fin de comparar los efectos de las ondas de choque *tándem* contra las equivalentes ondas de choque convencionales (monopulso).

## **1.9. Alcance**

En lo referente al desarrollo tecnológico del generador de ondas de choque novedoso, el proyecto se limitó a diseñar y construir un dispositivo único en su tipo que permitiera demostrar una mayor eficiencia de fragmentación que un litotritor electrohidráulico convencional (de un solo cabezal); es decir, el alcance de las actividades al respecto se contempló hasta las pruebas de fragmentación de urolitos artificiales (*in vitro*), que son parte esencial de los avances en la litotricia extracorpórea.

Desde un punto de vista más general, el hecho de tener un nuevo tipo de generador en el Laboratorio de Ondas de Choque, anticipa un alcance difícil de acotar en lo concerniente a las investigaciones y aplicaciones que podrán realizarse mediante dicho equipo, de las cuales ya se mencionaron algunas en la sección 1.3.

## CAPÍTULO 2

### DISEÑO Y DESARROLLO DEL GENERADOR DE ONDAS DE CHOQUE GET

Como se menciona al final del capítulo anterior, el proyecto del Generador de Ondas de Choque de Doble Cabezal para Aplicaciones Biomédicas inició a principios del 2014 con el propósito de equipar el Laboratorio de Ondas de Choque (LOCH) del Centro de Física Aplicada y Tecnología Avanzada (CFATA) de la UNAM, con un generador de tipo electrohidráulico que pudiera funcionar tanto en la modalidad *tándem* como de manera convencional (monopulso), a fin de poder comparar la eficiencia de fragmentación de urolitos entre ambos casos e inclusive contra el método piezoeléctrico en el que la modalidad *tándem* se implementó desde el 2001 en el mismo Laboratorio.

También se ha mencionado mi participación en dicho proyecto desde su inicio, dedicando al mismo 4 estancias de Investigación, la prestación del servicio social y finalmente este trabajo de tesis, cuyo programa de desarrollo comprendió básicamente el ensamblado final del equipo y las pruebas pertinentes de su funcionamiento. Dichas estancias de investigación y el servicio social se dedicaron tanto a la planeación general del conjunto como a conseguir y probar todas sus componentes y etapas por separado. Cabe mencionar que el término “conseguir” comprende actividades que fueron desde lo simple y rápido (como disponer de una pieza existente y a lo más rehabilitarla y/o adaptarla), hasta lo laborioso y tardado como participar en el maquinado de varias piezas, ya sea personalmente como en los casos de partes sencillas (torneado de urolitos artificiales, elaboración de tornillos de plástico, etc.), o bien de forma auxiliar apoyando al Jefe del Taller Mecánico del CFATA René Preza Cortés en los casos de maquinados más complicados.

Por lo anterior, las primeras dos secciones de este capítulo son una revisión breve del desarrollo cronológico del proyecto (actividades de las estancias y el servicio social), mientras

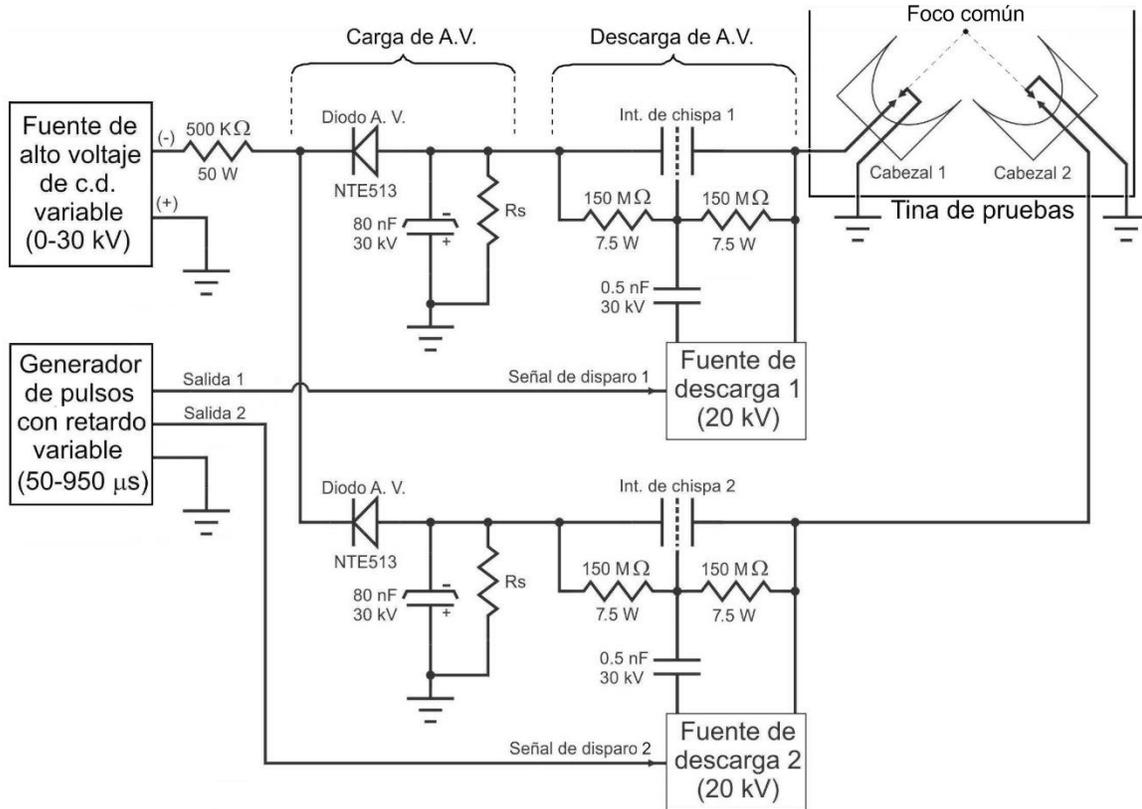
que la tercera y última sección del capítulo, así como los capítulos restantes, comprenden las actividades planeadas y realizadas en esta tesis.

## **2.1 Criterios del diseño y etapas constitutivas del generador novedoso**

Para diseñar el generador electrohidráulico *tándem* (GET) se tomó como punto de partida al primer generador de ondas de choque experimental, de tipo electrohidráulico y emisión en monopulso, que se construyó en el Laboratorio de Choques Débiles del Instituto de Física de la UNAM (antigua sede del actual LOCH del CFATA) a finales de la década de los ochenta, el cual fue denominado Mexilit y hasta la fecha se utiliza tanto en experimentos que no requieran emisión en modo *tándem*, así como en demostraciones de los principios de la litotricia extracorpórea dentro del aspecto de la divulgación de la ciencia. A su vez, dicho generador Mexilit fue inspirado en el litotritor clínico marca Dornier, modelo HM3, que desde hace varios años es considerado internacionalmente como el equipo clásico, o “estándar de oro” de la litotricia extracorpórea [5]. Esto último permitió contemplar al Mexilit como una buena referencia para comparar la eficiencia del nuevo generador.

El funcionamiento del generador Mexilit y sus circuitos básicos ya fueron descritos en el capítulo anterior (sección 1.2.1, fig. 1.5), así como el desarrollo del sistema *tándem* en un generador de tipo piezoeléctrico (sección 1.5, fig. 1.12). No es tan extraño que el criterio primordial del diseño del generador novedoso (GET) haya surgido de combinar dichos antecedentes, tomando también en cuenta que la emisión electrohidráulica de dos frentes de choque sucesivos, en un tiempo muy corto, no puede efectuarse desde la misma región (sección 1.6). Es decir, el GET sigue el esquema del generador piezoeléctrico *tándem* en lo referente a duplicar los circuitos de carga y descarga de alto voltaje, pero con componentes del generador Mexilit. A diferencia del sistema *tándem* piezoeléctrico, en este caso ambas descargas de alto voltaje no ocurren sobre el mismo transductor (arreglo de cristales), sino que se mantienen separadas y actúan sobre dos parejas de electrodos (bujías) y sus correspondientes reflectores elipsoidales (iguales al del Mexilit). La ubicación de ambos reflectores y sus bujías (cabezales) fue planeada de forma tal que concentraran sus

respectivos frentes de choque en un punto focal común. En la Fig. 2.1 se muestra un esquema general del GET, donde se pueden notar sus etapas básicas que son: la tina de pruebas con los cabezales, las etapas de carga y descarga de alto voltaje (por duplicado), el generador de pulsos con retardo y la fuente de alto voltaje, las cuales se describen en la sección siguiente, exceptuando la última que se desarrolló posteriormente y se trata en la sección 2.3.



**Fig. 2.1 Diagrama general del Generador Electrohidráulico Tándem (GET).**

Otro aspecto importante que se consideró en el diseño del GET, fue la cantidad de agua a utilizar en la tina de pruebas, ya que dicho líquido sólo es el medio de propagación de las ondas de choque que se aplican a diversas muestras, y por consiguiente debe evitarse su desperdicio. En la mayoría de los experimentos que se realizan en el LOCH, las muestras son contenidas en bolsitas de polietileno o pipetas de transferencia (viales de plástico suave), siempre selladas, por lo que el agua de la tina de pruebas generalmente es reutilizada (se

bombea a tanque de almacenamiento después de cada experimento) y sólo se desecha - hacia las plantas del jardín- en los experimentos eventuales donde animales pequeños se someten a las ondas de choque, o también cuando ya ha sido reciclada varias veces (aproximadamente de 5 a 10 veces). Por esto último, se decidió que las dimensiones de la tina de pruebas del GET fuesen las mínimas que permitieran la distribución de los cabezales mostrados en la Fig. 2.1, además de otros aspectos que se mencionan en la sección siguiente.

Dado que en el LOCH se tenían algunas refacciones tanto del Mexilit como del generador piezoeléctrico *tándem*, aprovechables para este proyecto, se optó por desarrollar al GET en forma modular, según se menciona al principio de este capítulo (lograr y probar cada una de sus etapas por separado), lo que a su vez facilitaría el ensamblado del conjunto así como el desmontaje de partes en futuros mantenimientos preventivos o correctivos.

## **2.2 Partes diseñadas, ensambladas, maquinadas, o rehabilitadas para el GET**

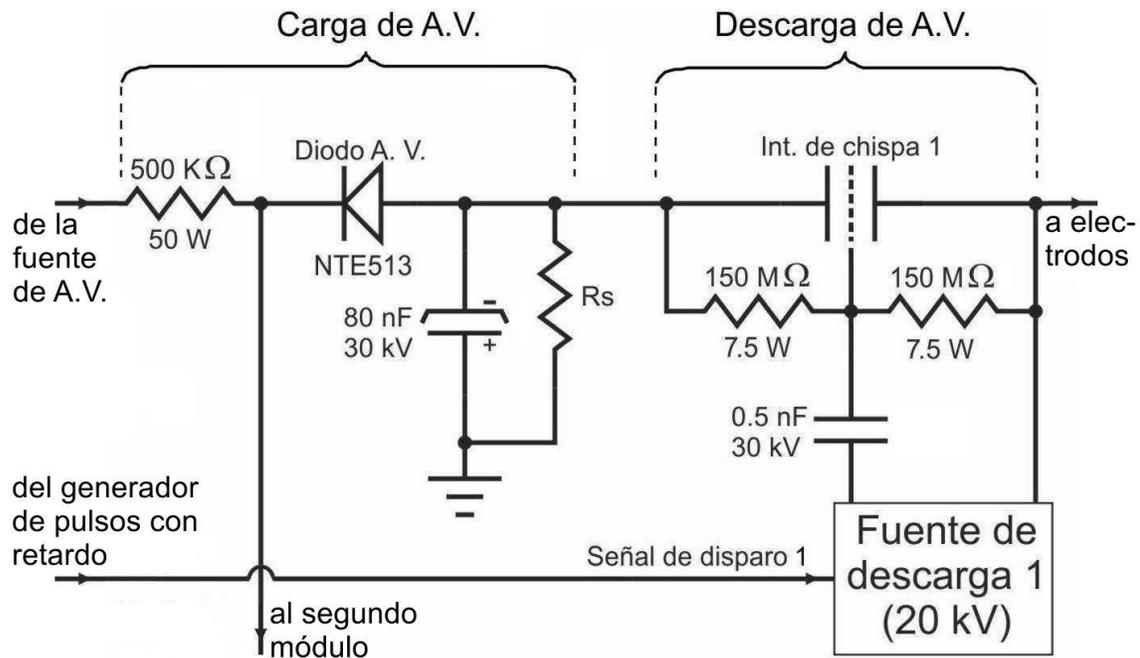
### **2.2.1 Tina de pruebas**

La tina de pruebas fue la primera etapa del proyecto que se planeó desde la primera estancia de investigación <sup>[16]</sup>. Para diseñar su forma y dimensiones fue necesario analizar los reflectores elipsoidales a utilizar -ya existentes-, así como sus parámetros <sup>[2]</sup> que se muestran en la Fig. 2.2. Con estos datos se efectuaron los cálculos pertinentes a una tina en la que se ubicarían dichos cabezales lo suficientemente separados, tanto para permitir el montaje y desmontaje de los reflectores con relativa facilidad, así como para evitar posibles interacciones secundarias de las ondas de choque, debidas a reflexiones indeseables por las paredes de la misma. Además, como los focos externos de ambos reflectores deberían ser coincidentes, se decidió ubicar los cabezales en el fondo de dicha tina, el cual se planeó con geometría oblicua obtusa, según se muestra en la Fig. 2.3, incluyendo las dimensiones correspondientes.



## 2.2.2 Etapas de carga y descarga de alto voltaje

Estas etapas, que se incluyeron por duplicado en el GET (ver Fig. 2.1), se muestran en forma unitaria a continuación (Fig. 2.4), para facilitar su descripción.



**Fig. 2.4** Unidad de las etapas de carga y descarga de alto voltaje.

En la figura anterior se pueden notar los elementos principales de dichas etapas: un condensador de alto voltaje (80 nF, 30 kV), un interruptor de chispa y una fuente de descarga (pulsos de 20 kV, 3 mA), además de otras partes menores como la resistencia limitadora de corriente de carga (500 k $\Omega$ , 50 W), el diodo de alto voltaje (tipo NTE 513, indispensable a la duplicidad de dichas etapas), el condensador de acoplamiento de la fuente de descarga (0.5 nF, 30 kV), las resistencias de polarización del interruptor de chispa (150 M $\Omega$ , 7.5 W) y la resistencia de escalamiento ( $R_s$ ) del condensador principal. Cabe mencionar que esta última no forma parte de los circuitos originales del Mexilit, y se contempló para el GET con el propósito primordial de medir directamente el alto voltaje previo a cada descarga, lo cual se verá en la sección 2.3.

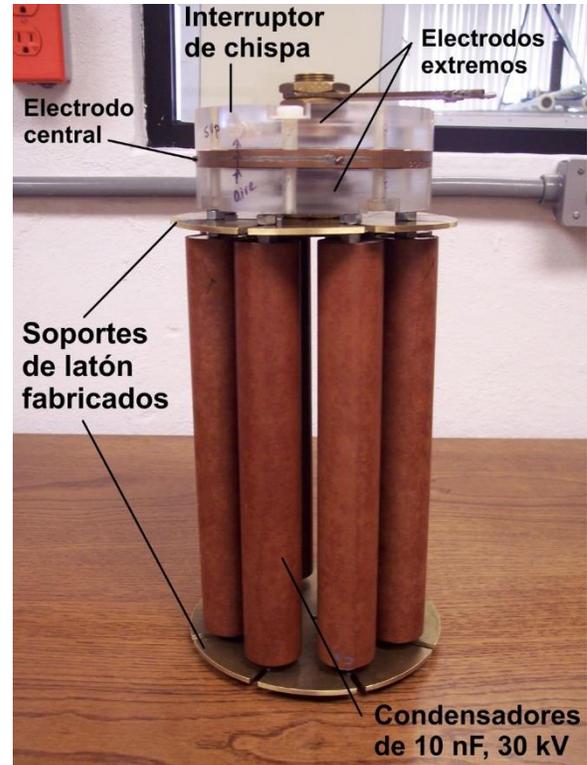
Desde el inicio de la segunda estancia de investigación (a mediados del 2014), se analizó la disponibilidad de dichas componentes, encontrando lo siguiente:

- i. El condensador principal, de 80 nF a 30 kV, realmente estaba formado por un banco de 8 condensadores idénticos (10 nF a 30 kV, cada uno de ellos) conectados en paralelo mediante soportes circulares de latón. Había otro juego de condensadores, pero faltaban sus discos de soporte y fue necesario maquinarlos directamente.
- ii. Sólo se tenía un interruptor de chispa y hubo que maquinar otro idéntico, cuyas partes complicadas estuvieron a cargo del Sr. René Preza -antes mencionado- y en lo personal sólo lo apoyé con el maquinado de piezas sencillas del mismo.
- iii. No se tenían las resistencias de polarización del interruptor de chispa, las cuales no existen en el comercio por su valor y regímenes de operación (150 M $\Omega$  al 2 % de tolerancia, 6 W de potencia y aislamiento para 15 kV). Fue necesario construir cuatro de ellas, así como los conectores para cada pareja.
- iv. Se tenían ambas fuentes de descarga, pero una de ellas no funcionaba por tener dañado el transformador de salida. Fue necesario reemplazarlo, previa adaptación de una “bobina” de encendido automotriz como transformador con devanados aislados.
- v. Las partes restantes: resistencia limitadora de corriente, diodos de alto voltaje y condensadores de acoplamiento, afortunadamente se tenían en el almacén del LOCH, por lo que no ocasionaron problema alguno.

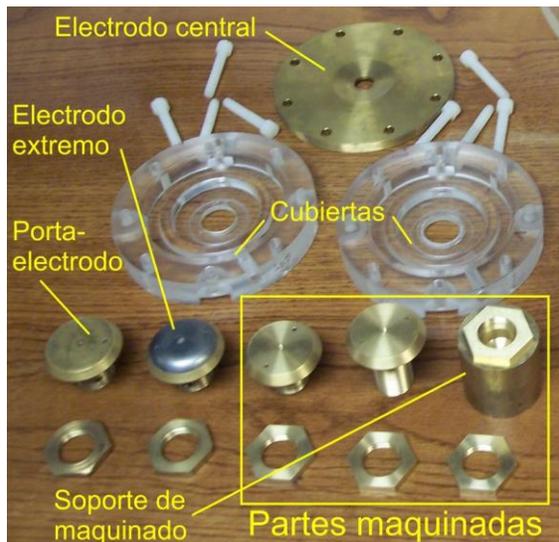
Para completar tales faltantes, se le dedicó la segunda estancia de investigación, así como las dos restantes y parte del servicio social. El primer punto se cubrió relativamente rápido (en alrededor de un mes), ya que inicialmente se usó la sierra caladora sobre una lámina de latón de 1/8” de espesor, para obtener cortes aproximadamente circulares de la misma, y después se utilizó el torno para el acabado fino de los círculos y sus perforaciones centrales. Finalmente se montó cada disco en una prensa giratoria y mediante la fresadora se hicieron las ranuras para las terminales de los condensadores. En la Fig. 2.5 se muestran dichos

soportes circulares de latón, ya con los ocho condensadores montados e inclusive acoplados al interruptor de chispa que se tenía disponible.

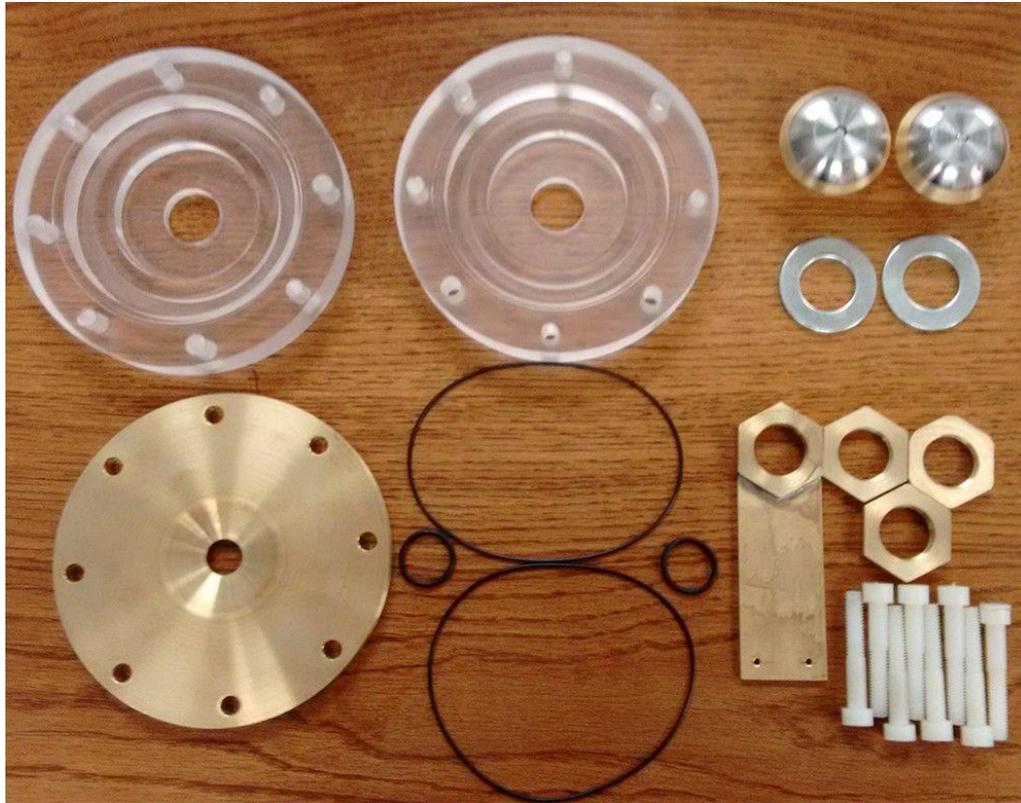
Para fabricar el interruptor de chispa faltante -punto (ii) anterior-, se desarmó completamente el existente (Fig. 2.6), registrando todas sus partes y medidas, para después maquinar directamente las piezas a mi alcance y turnar las complicadas al jefe del Taller Mecánico del CFATA. Gracias a la experiencia del Sr. Preza, se logró completar el conjunto de partes nuevas mostradas en la Fig. 2.7, cuyo ensamblado y las pruebas de su buen funcionamiento se describen tanto en las páginas 33 y 37-38 (de manera breve), así como en el apéndice I de este trabajo, donde hay mayores detalles al respecto.



**Fig. 2.5 Primer banco de condensadores, ya acoplado al interruptor de chispa.**

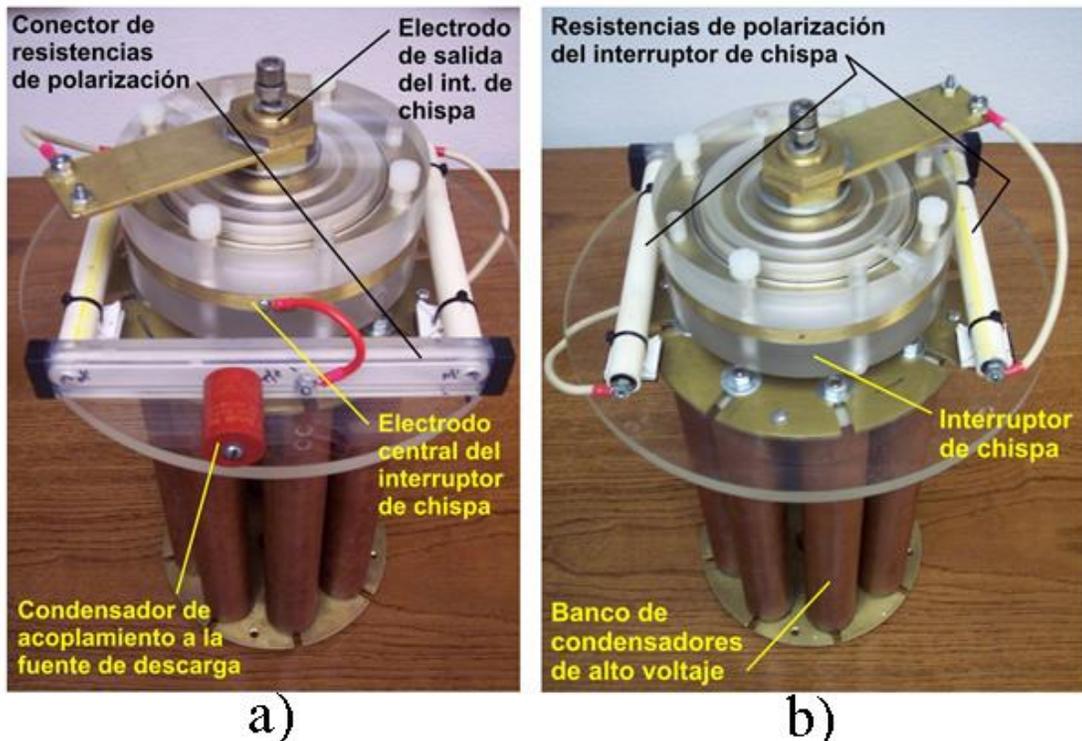


**Fig. 2.6 Interruptor de chispa original, desarmado para duplicar sus componentes. Las partes dentro del cuadro fueron las maquinadas personalmente, así como los ocho tornillos de Nylamid® mostrados en la imagen.**



**Fig. 2.7 Conjunto completo de componentes del nuevo interruptor de chispa.**

Con respecto a las resistencias de polarización de los interruptores de chispa -punto (iii) anterior-, las actividades desarrolladas no fueron difíciles pero si laboriosas, ya que involucraron la selección de 60 resistencias comerciales (por medición directa), para formar 4 grupos de 15 de ellas, cada uno de los cuales es un arreglo en serie de las mismas, acabado con las terminales y el aislamiento eléctrico adecuados. En el apéndice I se describe con mayor detalle el proceso de su fabricación y las pruebas a las que fueron sometidas para garantizar su buen funcionamiento. También ahí se explica la manufactura de los conectores especiales para cada pareja de dichas resistencias de polarización, los cuales adicionalmente soportan una de las terminales de cada condensador de acoplamiento con la fuente de descarga correspondiente. En la figura siguiente se muestran imágenes de la nueva unidad de carga y descarga de alto voltaje, ensamblada casi en su totalidad; es decir, con las componentes descritas hasta aquí.

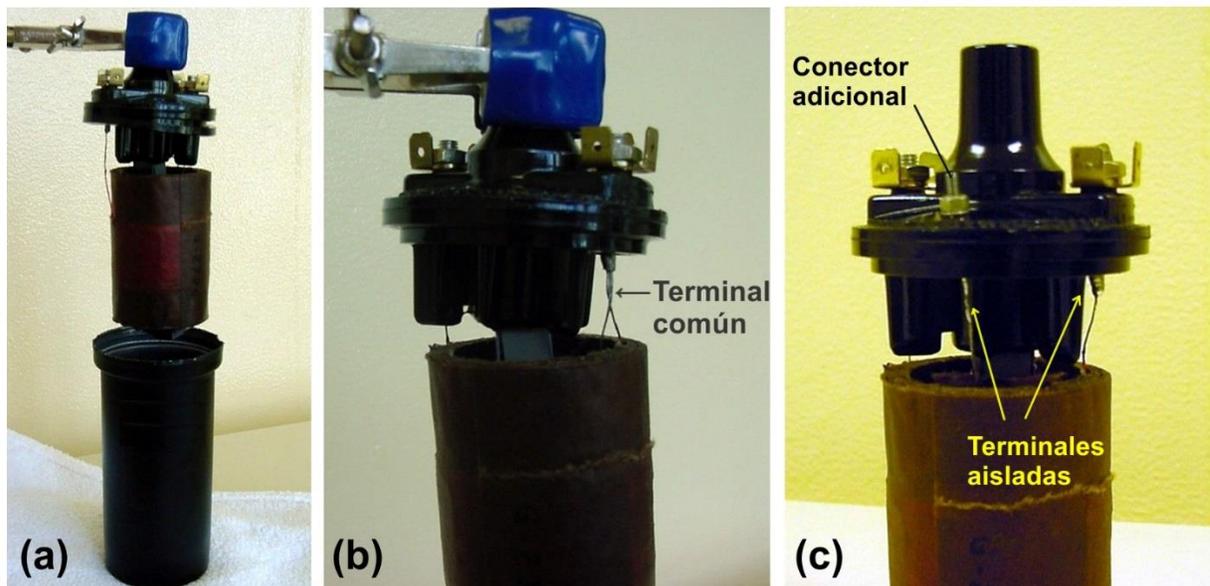


**Fig. 2.8** Ensamblado de la nueva unidad de carga y descarga de alto voltaje. a) Por este lado se observa el condensador de acoplamiento a la señal de disparo, conectado a las resistencias y al interruptor mediante una placa de cobre encapsulada en acrílico. b) De este lado se observa con facilidad las resistencias encapsuladas en PVC.

Lo último de los faltantes antes mencionados (punto iv de la lista anterior), consistió en reparar una de las dos fuentes de descarga ya existentes, la cual tenía el transformador de salida dañado. Tales fuentes fueron diseñadas y construidas en el LOCH años atrás, con dicho transformador obtenido mediante la modificación de una “bobina” de encendido de bujías en motores de combustión interna a gasolina, por lo que para tener el transformador de reemplazo fue necesario repetir dicha modificación, según se describe a continuación.

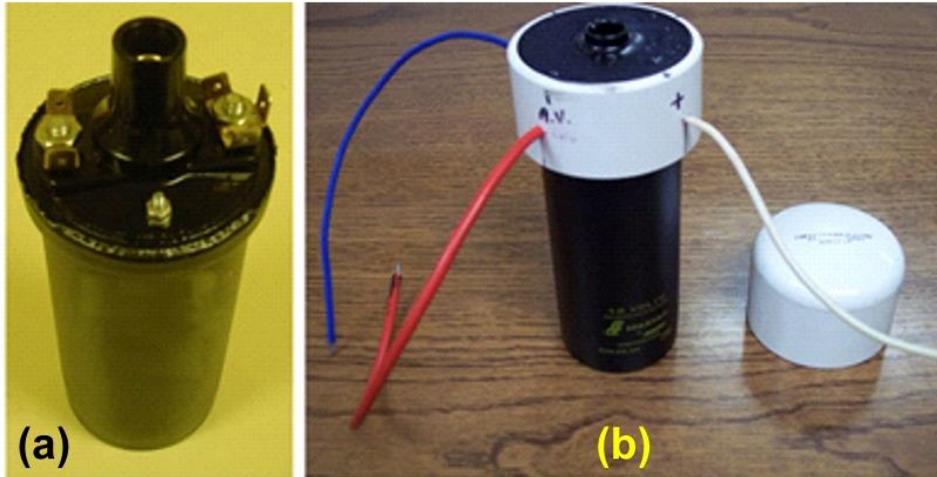
Se dispuso de una “bobina” tipo SPARTAN SP5-10W, que realmente es un autotransformador (3 terminales) de la industria automotriz, contenido en aceite, el cual había que convertir a transformador con devanados aislados (4 terminales), manteniendo el mismo medio dieléctrico. La manufactura <sup>[17]</sup> comenzó con la apertura del contenedor de aceite y los devanados, extrayendo estos últimos para sujetarlos en un soporte que permitiera el escurrimiento del dieléctrico sin perderlo (Fig. 2.9a).

Con lo anterior fue posible desoldar los extremos de los bobinados de sus conectores en la tapa (Fig. 2.9b), separando esta última para agregarle un conector adicional (tornillo de 1/8" x 1", previa perforación correspondiente), para después soldar ambos devanados pero en forma aislada (Fig. 2.9c) y posteriormente regresar el conjunto a su contenedor con el aceite, sellando la tapa del mismo con las pestañas de lámina desdobladas en su apertura; es decir, se volvieron a doblar las pestañas a su forma original.



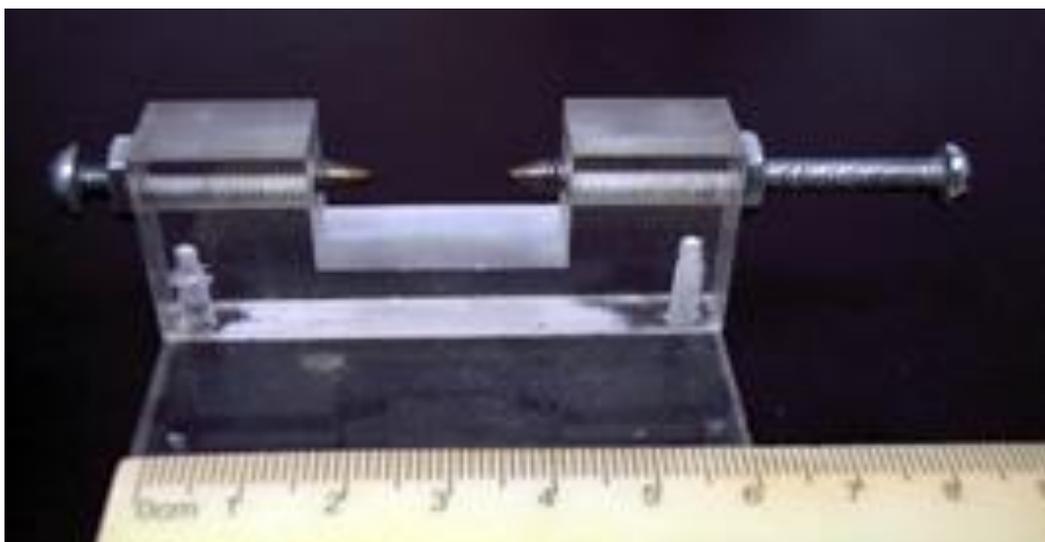
**Fig. 2.9 Adaptación del autotransformador a transformador de alto voltaje: (a) extracción de los bobinados, (b) separación de terminales, (c) terminales aisladas y conector adicional.**

El transformador así obtenido se muestra en la Fig. 2.10a, pero todavía fue necesario reforzar el aislamiento eléctrico entre los conectores de la tapa por haber incluido una terminal de alto voltaje cercana a los conectores del devanado primario. Para esta última parte del proceso se utilizó un tapón de tubo PVC de 2", al cual se le cortó el extremo cerrado para tener un molde de forma cilíndrica recta, que fue colocado en la parte superior del transformador, con perforaciones previas para el paso de cables, para finalmente conectar los cables a las terminales y llenar el molde con resina epóxica EPO-200®. En la figura 2.10b se muestra el transformador acabado, así como otro tapón de tubo PVC de 2" que fue usado como soporte y aislante de la parte inferior del transformador.



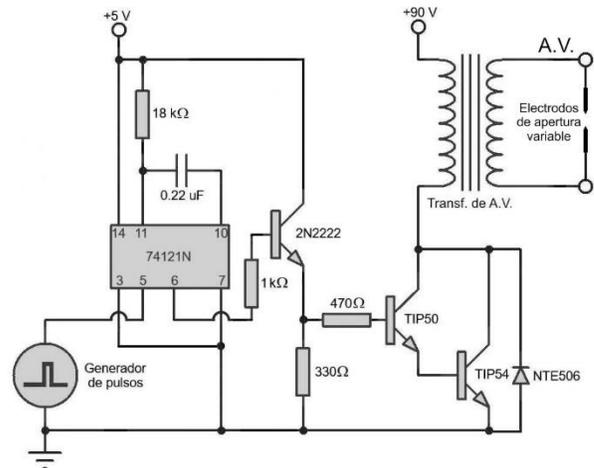
**Fig. 2.10 Acabado del transformador de alto voltaje: (a) partes reubicadas, (b) relleno epóxico**

Para comprobar el buen funcionamiento del transformador de alto voltaje, se realizaron pruebas de arco voltaico entre dos electrodos en aire con separación variable, teniendo en cuenta que la constante de rompimiento eléctrico del aire es de 10 kV/cm en promedio. Para ello fue necesario elaborar el dispositivo de arco mediante dos tornillos de fierro galvanizado de 5/32" de diámetro, con largos respectivos de 1¼" y 2", ambos con puntas cónicas (torneadas), los cuales fueron soportados colinealmente en acrílico de 9 mm de espesor, uno frente al otro, según se muestra en la Fig. 2.11.



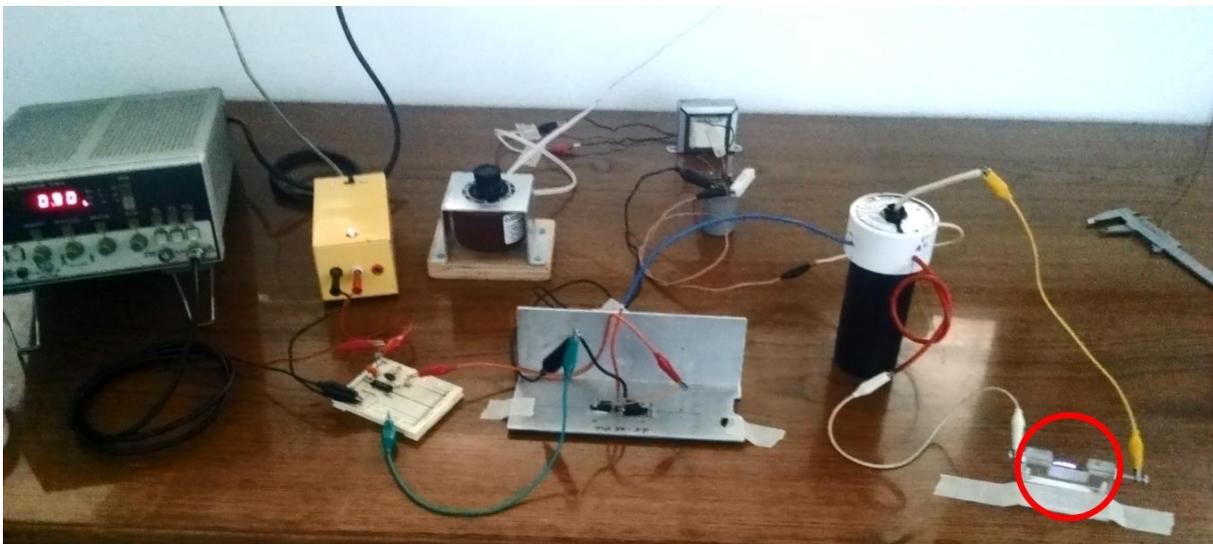
**Fig. 2.11 Electrodo con separación variable.**

Posteriormente las terminales de salida del transformador fueron conectadas a dichos electrodos, con el primario de éste como carga de colector de un arreglo Darlington de transistores TIP50 y TIP54, polarizados con una fuente no regulada de 90 Vcd a 2 A, los cuales recibían la señal de estímulo de un generador de funciones HP8111A (pulsos TTL a 1 Hz de frecuencia y 10  $\mu$ s de ciclo de trabajo), pero a través de un



**Fig. 2.12 Circuito de prueba del transf. de A.V.**

multivibrador monoestable no re-disparable de 2.5 ms de ciclo de trabajo, configurado en base al microcircuito SN74121 (fig. 2.12). Ya con lo anterior operando en la forma provisional que se muestra en la Fig. 2.13, se procedió a encontrar la distancia máxima entre los electrodos en la cual se producía repetidamente (sin fallas) el arco de alto voltaje, en 50 disparos sucesivos, la cual resultó ser de  $22.5 \pm 0.01$  mm, por lo que se consideró exitosa la reposición de dicho transformador (emisión mayor a 15 kV) y fue finalmente montado en su respectiva fuente de descarga.



**Fig. 2.13 Prueba del transformador de alto voltaje. Se observa en la esquina inferior derecha el arco de alto voltaje.**

Cabe mencionar que el circuito de prueba del transformador es parte de las fuentes de descarga, donde el ciclo de trabajo de 2.5 ms es el mínimo necesario al buen funcionamiento de las mismas, ya que este determina la cantidad de energía almacenada en forma de campo magnético en el primario del transformador de alto voltaje, que al colapsar (al cortar la corriente que lo produce) induce el pulso de alto voltaje necesario al interruptor de chispa. En otras palabras, cada fuente de descarga es una etapa que recibe un pulso TTL de corta duración (10 a 50  $\mu$ s) y después de un tiempo relativamente largo ( $\tau \geq 2500 \mu$ s) se obtiene el arco voltaico de respuesta. Esto último no es preocupante cuando se opera al generador de ondas de choque en modo convencional (monopulso), ya que dicha constante de tiempo resulta despreciable con respecto a la frecuencia con que se repiten los frentes de choque (0.33 a 3 Hz); sin embargo, en el modo de operación en *tándem* debe cuidarse que ambas fuentes de descarga tengan el mismo tiempo de respuesta, para evitar alteraciones significativas en el retardo de los pulsos sucesivos, los cuales están restringidos al intervalo de 50 a 950  $\mu$ s, según lo especificado en la sección 1.5 (capítulo 1).

Para lograr dicha sincronía en las fuentes de descarga, se agregó un trim-preset de 2  $k\Omega$  (en 20 vueltas) a sus bases de tiempo, en serie con la resistencia de 18  $k\Omega$  (Fig. 2.12), ajustando cada una de ellas a  $2700 \pm 5 \mu$ s, mediante un osciloscopio Tektronix TDS3032 y el generador de funciones antes mencionado.

Finalmente, cada fuente de descarga fue probada con su respectiva unidad de carga y descarga de alto voltaje, e inclusive con reflector y bujía inmersa en agua, a fin de constatar la emisión de las descargas electrohidráulicas. Para ello se utilizó el montaje mostrado en la Fig. 2.14 (junto al generador Mexilit, por la necesidad de su fuente de alto voltaje), donde se puede notar que el reflector, bujía y partes de acoplamiento electromecánico (estas últimas no visibles en la imagen) fueron soportados provisionalmente en un banco de madera previamente construido para este fin; es decir, tanto con los empaques adecuados para evitar fugas de agua, así como con los conectores especialmente maquinados para las bujías

(ver apéndice I). En la Fig. 2.15 se puede observar la bujía dentro del reflector, tanto antes de la descarga electrohidráulica como durante la misma.

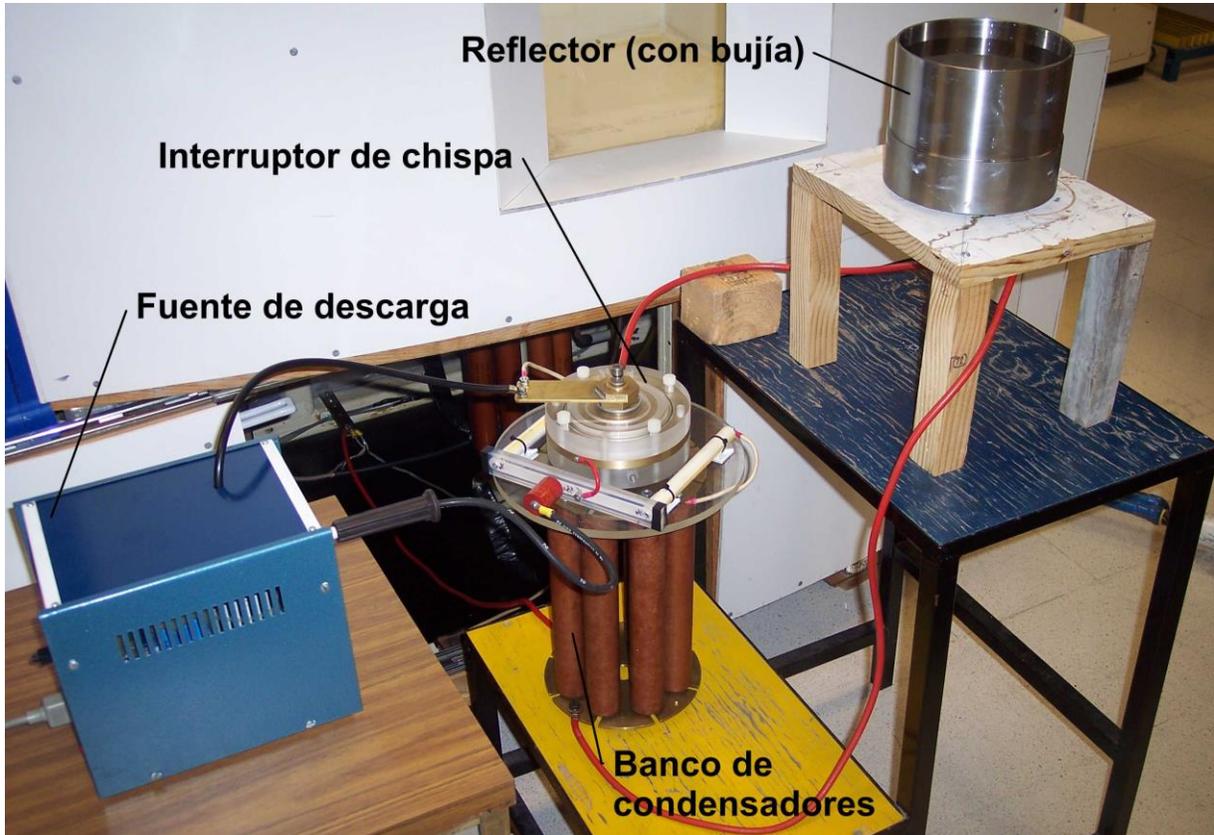


Fig. 2.14 Montaje de pruebas de descargas electrohidráulicas

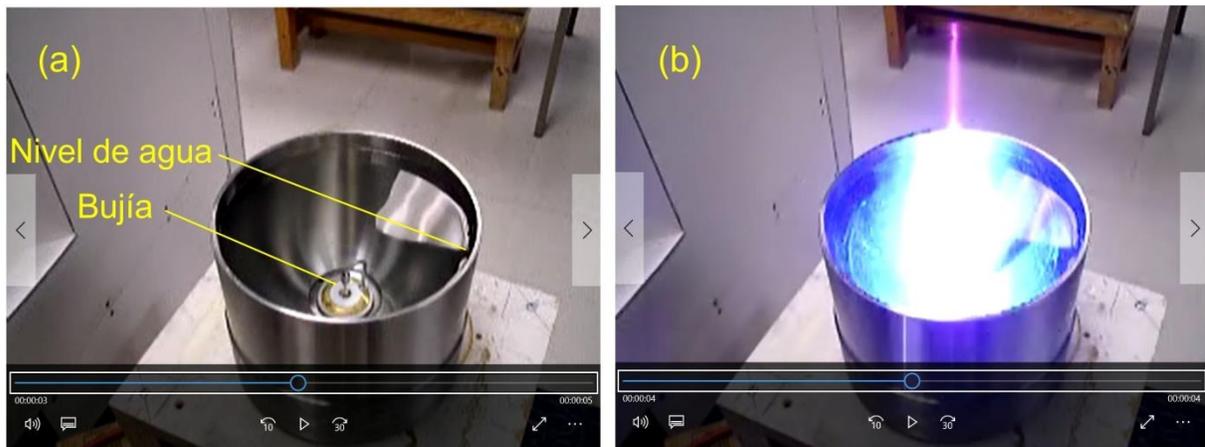


Fig. 2.15 Estados de la bujía inmersa en agua. (a) Antes de la descarga. (b) Durante la descarga.

### 2.2.3 Generador de pulsos con retardo variable

Disponiendo de los circuitos en tableta impresa de una versión anterior de un generador de pulsos con retardo variable (utilizado originalmente en el desarrollo del generador piezoeléctrico *tándem* <sup>[11]</sup>), fue necesario entender su funcionamiento, identificar sus componentes y particularmente su cableado para controles e indicadores, ya que estos últimos tuvieron que volver a ensamblarse conforme a las necesidades de este proyecto, recuperando el acabado en chasis metálico para su futuro acoplamiento al resto del sistema.

En la Fig. 2.16 se muestra el panel frontal de dicho ensamblado, en el que además del interruptor e indicador de encendido, presenta un selector para uso ya sea en modo manual o automático (repetibilidad de la emisión de las ondas de choque), una modalidad que aumenta en mil veces el retardo para confirmar audiblemente la emisión *tándem*, botones de arranque y paro, ajuste del retardo (entre 50 y 950  $\mu$ s) con potenciómetro de 10 vueltas con vernier, “display” contador de eventos (emisiones monopulso o *tándem*) y botón de “reset” del mismo. En las partes posterior y lateral derecha (no mostradas en la imagen) se encuentran respectivamente el control de la frecuencia para emisiones en modo automático (entre 0.33 y 3 Hz) y las salidas de los pulsos TTL adecuados a las fuentes de descarga mencionadas.



Fig. 2.16. Generador de pulsos con retardo variable re-ensamblado.

Finalmente, se confirmó el buen funcionamiento del equipo recuperado mediante un osciloscopio Tektronix TDS3032, conectando los dos canales de este a las salidas de los pulsos con retardo, obteniendo oscilogramas como los que se muestran en la Fig. 2.17.

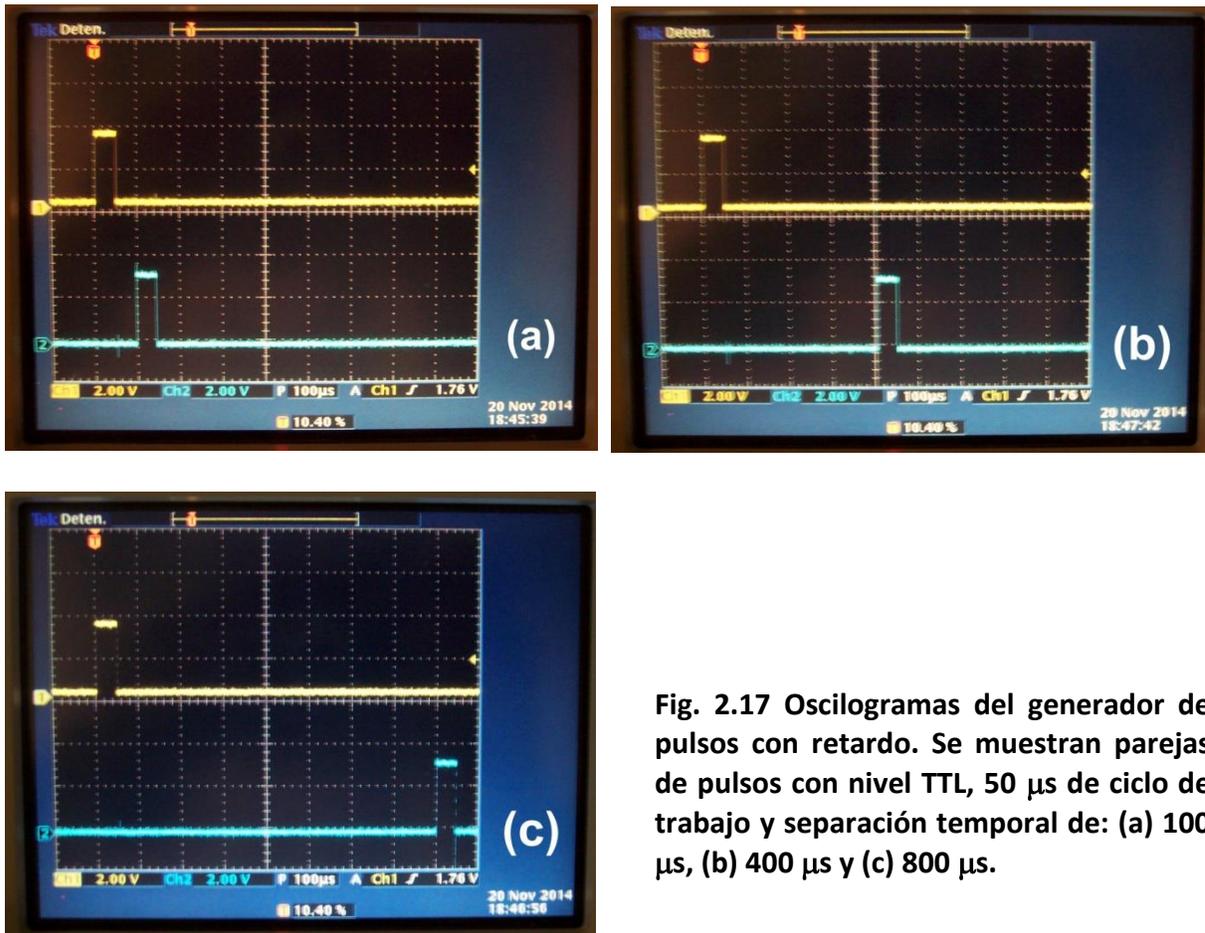


Fig. 2.17 Oscilogramas del generador de pulsos con retardo. Se muestran parejas de pulsos con nivel TTL, 50  $\mu$ s de ciclo de trabajo y separación temporal de: (a) 100  $\mu$ s, (b) 400  $\mu$ s y (c) 800  $\mu$ s.

## 2.3 Ensamblado del generador electrohidráulico de doble cabezal

### 2.3.1 Diseño de la estructura general

A partir de esta sección se describe el trabajo realizado durante esta tesis, la cual comenzó en noviembre de 2016 con la planeación de una estructura general donde se pudieran colocar todas las etapas constitutivas del generador novedoso. Tal diseño fue elaborado

mediante el programa SolidWorks®, tanto para determinar las dimensiones adecuadas al conjunto, así como para visualizar fácilmente el acomodo de sus módulos sin tener que interactuar físicamente con ellos.

Después de varias propuestas, se optó por una estructura rectangular de fierro tubular (PTR) de 1.5", con superficies útiles de 1300 mm x 600 mm en dos plataformas, una en la parte superior a 1056 mm del suelo y otra suspendida a 594 mm de distancia de la primera. Cada plataforma estaría conformada con madera de ¾" de espesor y acabado en Formica® negra.

En la plataforma superior se colocarían la tina de pruebas y el generador de pulsos con retardo variable, dándole al GET una altura total de 1606 mm. La plataforma inferior contendría todas las etapas de electrónica interconectadas mediante un panel de control con el que se pudiera interactuar con ellas: las fuentes de descarga que activan los interruptores de chispa, la fuente de alto voltaje dentro de una caja de madera pintada de amarillo para separarla del resto y los bancos de capacitores con sus respectivos interruptores de chispa. Se planeó además la colocación de placas de aluminio en dicha zona (como blindaje electromagnético) para evitar que las descargas de alto voltaje produjeran efectos indeseables (ruido electromagnético). Por último, se decidió colocar ruedas en las patas de toda la estructura para facilitar su movimiento dentro del LOCH. La Fig. 2.18 muestra el modelo tridimensional del diseño final.

Una vez determinado el diseño, se extrajeron planos con medidas del modelo tridimensional y se entregaron al jefe del taller mecánico del CFATA, el Sr. René Preza Cortés, para su construcción.

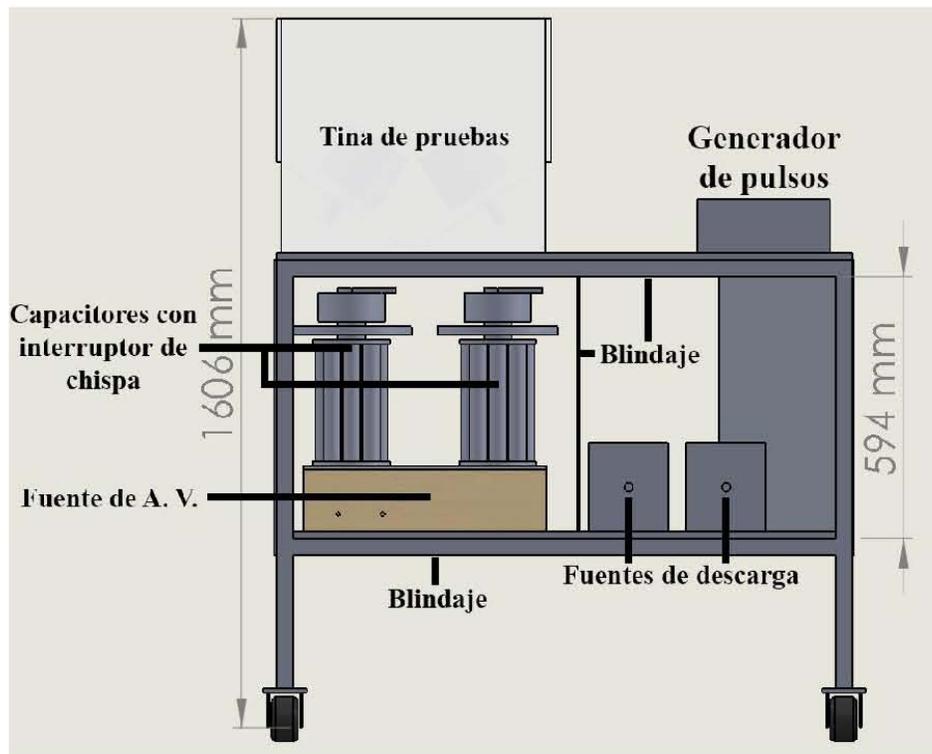
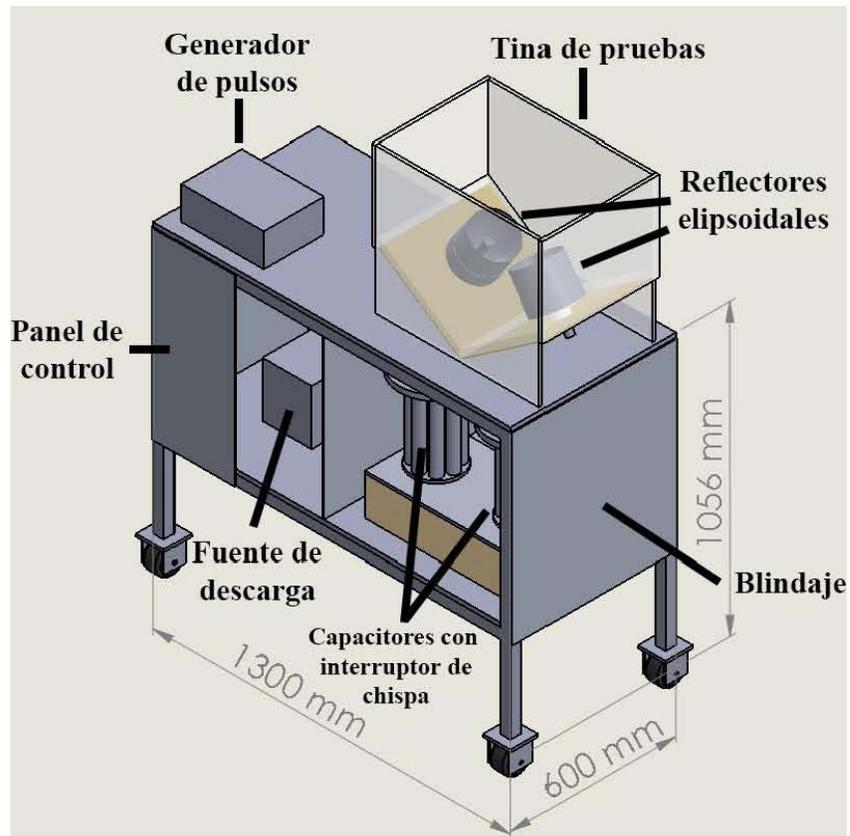
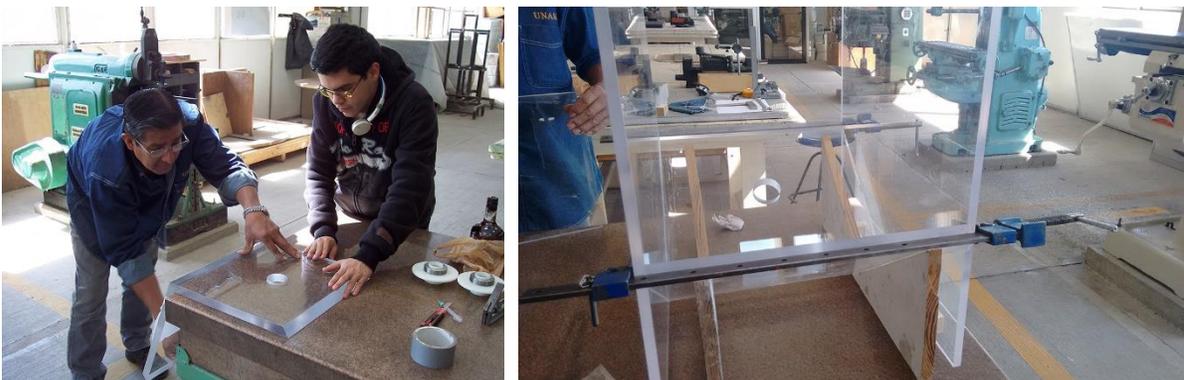


Fig. 2.18 De arriba a abajo, las vistas isométrica y posterior del modelo tridimensional del GET, con medidas en mm.

### 2.3.2 Acabado y colocación de la tina de pruebas

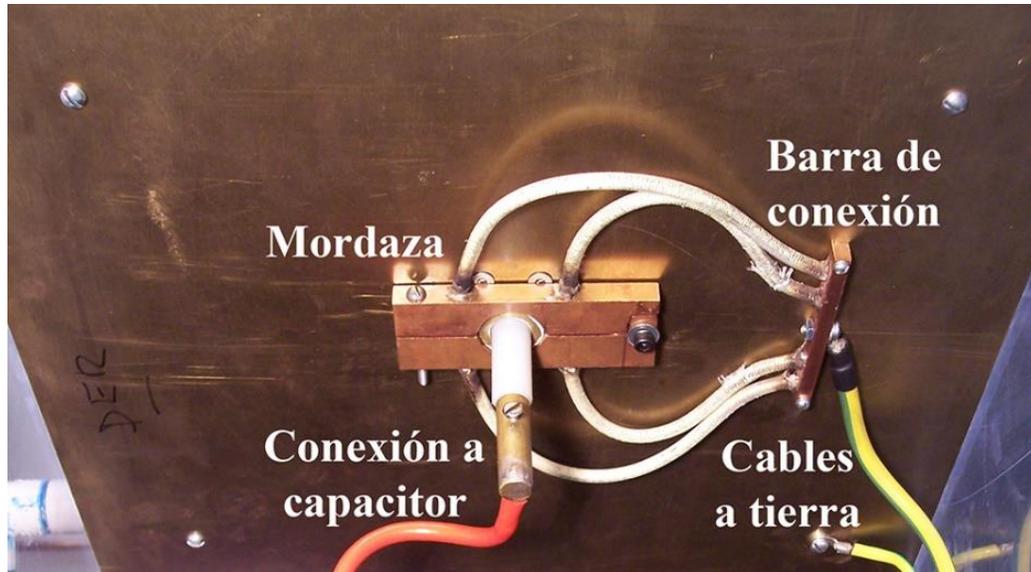
Las piezas de la tina de pruebas (descrita en la sección 2.2.1) ya habían sido manufacturadas al inicio de este trabajo de tesis, pero se decidió posponer su ensamblado hasta que se determinara con certeza su colocación en la estructura del GET. Es decir, una vez terminado el diseño descrito en la sección anterior se prosiguió a concluir el ensamblado de la tina.

Para esto, y nuevamente con ayuda del jefe de taller, René Preza Cortés, se pegaron las caras de la tina una por una utilizando Pegacril®. El primer par de caras fue el fondo oblicuo de la tina, para lo cual primero se hizo un molde de madera donde se pudieran colocar ambas piezas en el ángulo correcto antes de pegar. Una vez que secó el pegamento, se procedió a pegar las demás caras con ayuda de prensas. Este proceso se ilustra en la Fig. 2.19.



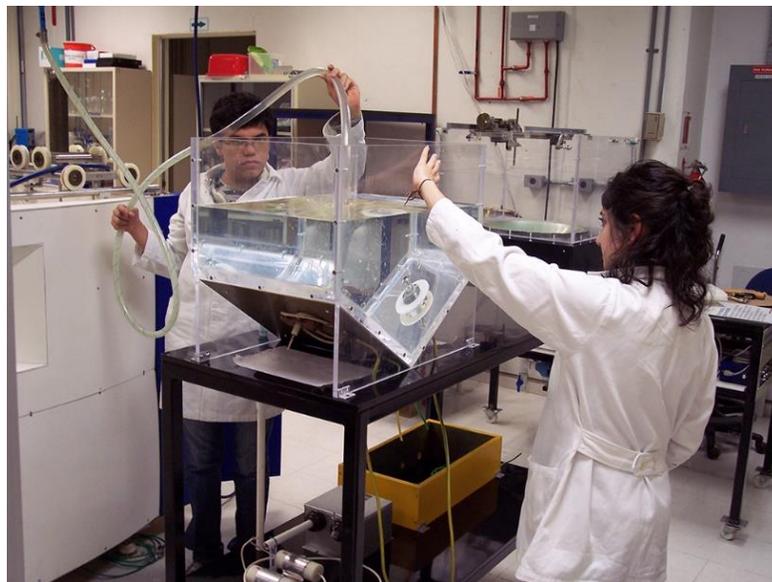
**Fig. 2.19 Pegado de la tina de pruebas. A la izquierda se observa el pegado del fondo y a la derecha el pegado de las caras laterales.**

Por otro lado, se vio necesaria la colocación de placas de latón de 1/8" de espesor en las caras del fondo de la tina, tanto para tener blindaje electromagnético ante la cercanía de los electrodos de descarga (bujías), como para facilitar las conexiones a los mismos, particularmente con los sujetadores de bujía a tierra. Cada una de estas placas fue perforada acorde a los agujeros del fondo de la tina y finalmente sujeta con tornillos a cada cara. Después se realizaron más perforaciones para sujetar las mordazas para las bujías. El cableado resultante se observa en la Fig. 2.20.



**Fig. 2.20** Vista del inferior de la tina. Se observan las conexiones a la bujía de descarga.

Por último, una vez colocada la tina en su posición planeada en la estructura del GET, se perforó un agujero de  $\frac{3}{4}$ " en uno de los costados de tal manera que este quedara en la parte más baja del fondo y se pudiera colocar tubería de PVC de  $\frac{1}{2}$ " que permitiera su drenado. Después de terminar dicha tubería se procedió a realizar una prueba de llenado (Fig. 2.21) para identificar posibles fugas, encontrando una muy pequeña que fue sellada con silicón y se realizó una segunda prueba, la cual ya fue exitosa.



**Fig. 2.21** Prueba de llenado de la tina del GET.

### 2.3.3. Conexiones eléctricas del GET

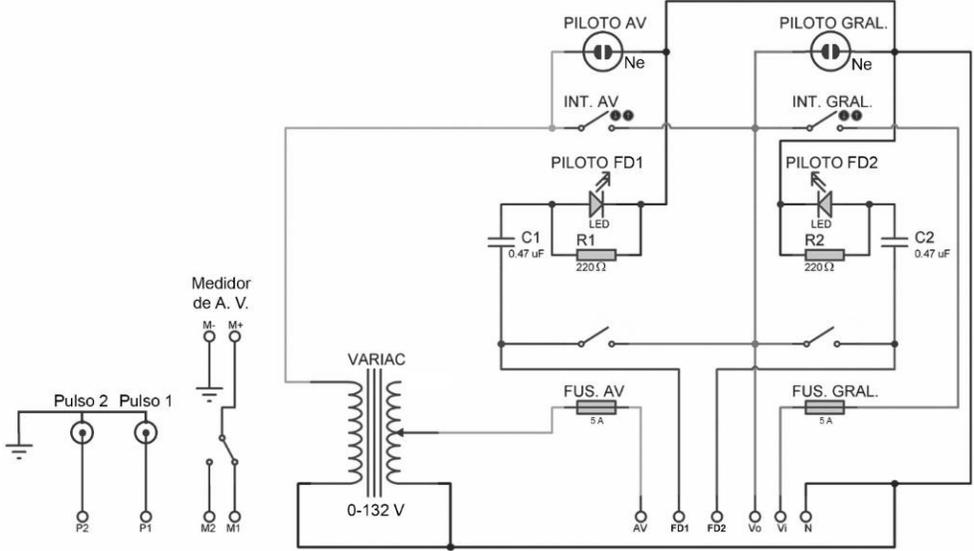
Para diseñar las conexiones eléctricas necesarias se requirió primero determinar los componentes del panel de control. Estos componentes, mostrados en la Fig. 2.22, fueron:

- i. Un interruptor para encendido general con un piloto de neón y fusible.
- ii. Un interruptor para encender la fuente de alto voltaje con un piloto de neón y fusible.
- iii. Interruptores para cada fuente de descarga con un piloto de LED en cada una de ellas.
- iv. Un variac (Powerstat, tipo 10C) para el control del alto voltaje.
- v. Un medidor de voltaje (escalado) para los bancos de condensadores de A.V., con un interruptor para seleccionar uno u otro.
- vi. Conexiones al generador de pulsos con retardo variable.
- vii. Una salida de señal de sincronía (TTL) para una cámara o algún otro dispositivo.

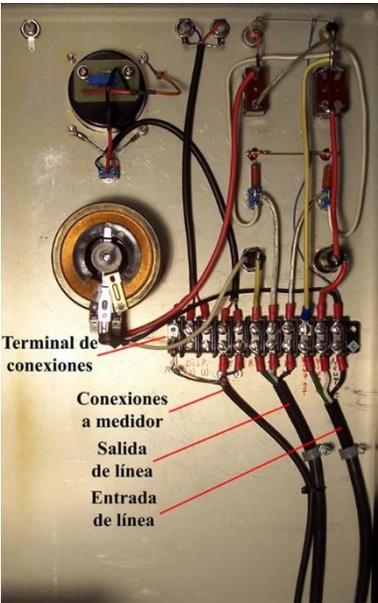


Fig. 2.22 Panel de control, vista frontal.

Con base en lo anterior se planeó el circuito mostrado en la Fig. 2.23, donde se muestran también las distintas salidas y entradas necesarias a las etapas y componentes del GET: neutro (N), entrada de voltaje de línea (Vi), salida de voltaje de línea (Vo) a multicontactos auxiliar, salidas de línea a las fuentes de descarga (FD1 y FD2), salida de línea controlada al transformador de alto voltaje (AV), entradas del voltaje (escalado) de los bancos de condensadores (M1 y M2) y entradas de los pulsos para las fuentes de descarga (P1 y P2). El cableado del panel de control se muestra en la Fig. 2.24.

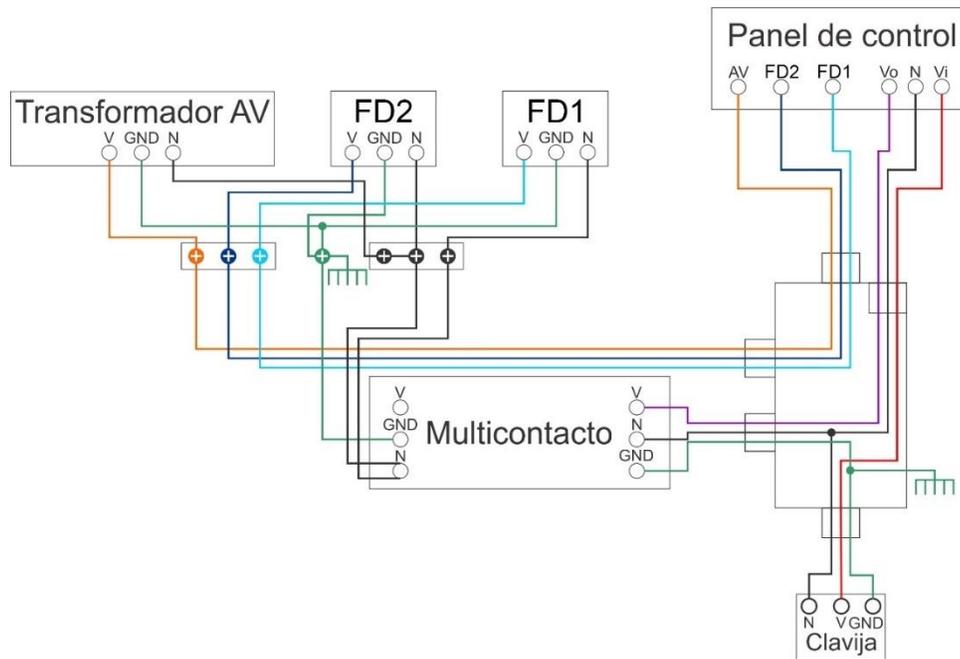


**Fig. 2.23 Circuito del panel de control del GET.**

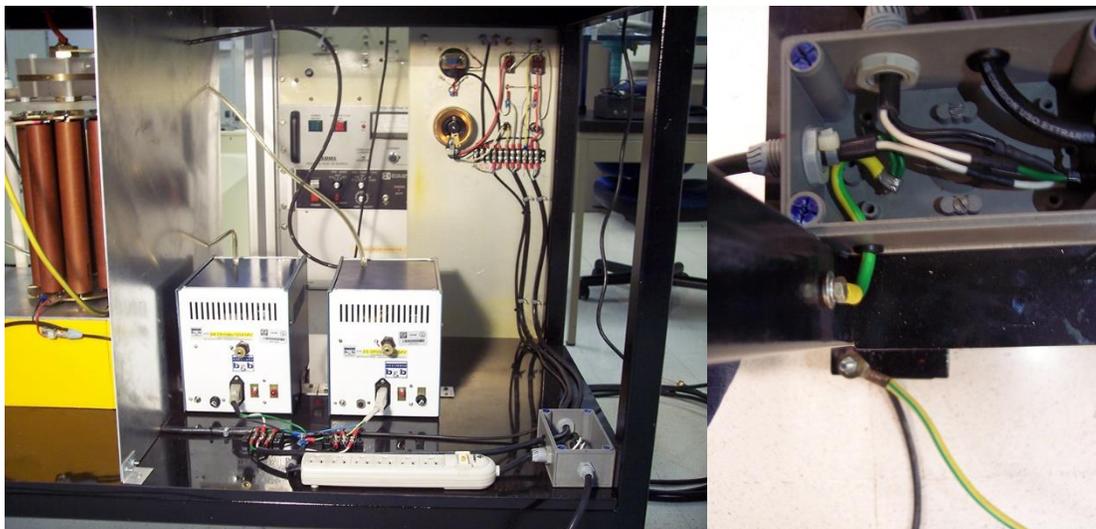


**Fig. 2.24 Panel de control, vista trasera.**

Después se determinó el cableado de alimentación a las fuentes de descarga y a la fuente de alto voltaje (que se describe en la sección siguiente), el cual se ilustra en la Fig. 2.25. Para ello se utilizó cable calibre 14 AWG y diversas terminales de conexión repartidas a lo largo de la plataforma inferior del GET, además de utilizar la estructura metálica como conexión a tierra física. La Fig. 2.26 ilustra el cableado terminado.



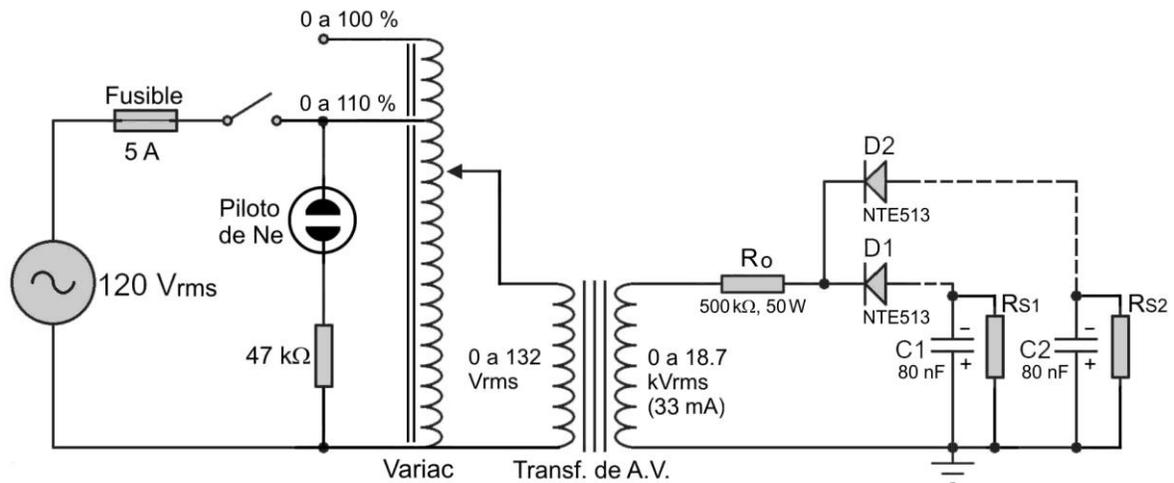
**Fig. 2.25 Cableado de la plataforma inferior del GET**



**Fig. 2.26 Vista de la plataforma inferior con cables y componentes. En la imagen de la derecha se observa la conexión principal de la estructura metálica a tierra física.**

### 2.3.4 Fuente de alto voltaje

La fuente de alto voltaje de c.d. contemplada para el GET fue de tipo variable y no regulada, ya que su función es sólo la carga -relativamente lenta- de los condensadores de alto voltaje, a un valor preestablecido entre 15 y 30 kV (ver sección 1.2.1). Para su implementación, ya se contaba con un transformador para encendido de anuncios luminosos en tubos de gas neón (de voltaje de línea a 17 kVrms, 30 mA), cuya amplitud de salida nominal es de 24.04 kVpico; es decir, prácticamente 20 % menos del máximo deseado. Por otra parte, como la variabilidad del alto voltaje se tenía contemplada por control de amplitud en el primario del transformador mediante un variac (Powerstat, tipo 10C), este último se configuró para salida en 110 %, dado el uso no continuo de la fuente. Con ello el máximo alto voltaje esperado resultó de 26.4 kVpico, considerado suficiente para la operación inicial del GET y a reserva de usar posteriormente un transformador más adecuado. En la Fig. 2.27 se muestra el diagrama de la fuente diseñada, donde se utilizó rectificación a media onda en la conversión c.a./c.d. mediante los diodos NTE513 (45 kV, 200 mA), además de las resistencias  $R_o$ ,  $R_{s1}$  y  $R_{s2}$  que se justifican a continuación.



**Fig. 2.27 Fuente de alto voltaje de c.d., planeada para el GET.**

La resistencia limitadora de corriente ( $R_o$ ) fue calculada en base a la disponibilidad de corriente del transformador y el tiempo de carga de ambos condensadores (con capacidad

equivalente:  $C = 0.16 \mu\text{F}$ ), que a su vez depende de la máxima frecuencia de repetibilidad de eventos a utilizar, la cual es de 3 Hz por el diseño previo del generador de pulsos con retardo variable (sección 2.2.3). Así, el período correspondiente a dicha frecuencia ( $\frac{1}{3}$  s) es el tiempo máximo ( $t$ ) para que el voltaje ( $V_c(t)$ ) de ambos condensadores (C) alcance el voltaje pico ( $V_o$ ) establecido en el secundario del transformador de A.V. (despreciando la caída de voltaje en los diodos), lo cual ocurre de acuerdo a la expresión (2), si se considera que el paralelo de las resistencias  $R_{S1}$  y  $R_{S2}$  es mucho mayor que R y en esta última se contempla la resistencia óhmica ( $R_i$ ) del devanado secundario del transformador de A.V. (i.e.,  $R = R_o + R_i$ ).

$$V_c(t) = V_o(1 - e^{-t/RC}) \quad \dots (2)$$

Estrictamente, la expresión anterior predice un tiempo infinito para  $V_c(t) \equiv V_o$ , por lo que se acostumbra el uso de la constante de tiempo del circuito ( $\tau \equiv RC$ ) para valorar la carga del condensador; es decir, para  $t = \tau$  se tiene  $V_c(t) = V_o (0.632)$  que se considera la mínima cantidad de carga aceptable (el 63.2% de la ideal). En este diseño se utilizó  $t = 4\tau$ , con lo que la transferencia de voltaje es mayor al 98%. Así, al establecer  $\frac{1}{3}$  s =  $4R$  ( $0.16 \mu\text{F}$ ), se obtuvo  $R = 520 \text{ k}\Omega$ , habiendo usado  $R_o = 500 \text{ k}\Omega \pm 2\%$  ya que la resistencia  $R_i$  fue medida directamente y resultó de  $19 \text{ k}\Omega \approx 20 \text{ k}\Omega$ .

El valor de R también debe satisfacer la limitación de corriente de carga ( $V_o/R$ ) involucrada en la expresión:

$$I_c(t) = \frac{V_o}{R} e^{-t/RC} \quad \dots (3)$$

la cual a máximo voltaje resulta de  $I_c(0) = 26.4 \text{ kVp}/520 \text{ k}\Omega = 50.7 \text{ mA}_{\text{pico}}$ , que comparada con la disponibilidad nominal del transformador ( $33 \text{ mA}_{\text{rms}} = 46,7 \text{ mA}_{\text{pico}}$ ), se tiene un exceso de 8.5 % que no fue preocupante, ya este sólo ocurre al inicio de cada carga y durante un tiempo muy corto (menor a  $0.1\tau$ ).

La disipación de potencia de la resistencia  $R_0$  mereció atención especial, ya que el más alto valor disponible fue de 50 watts, que fue el utilizado a costa de incrementar el período de carga de los condensadores, lo que en consecuencia limitó la frecuencia de repetibilidad de las descargas. Es decir, dicha potencia se analizó partiendo de la expresión de Joule al respecto:

$$P_R = (I_{rms})^2 R \quad \dots (4)$$

donde:

$$(I_{rms})^2 \equiv \frac{1}{T} \int_0^T (I_c(t))^2 dt = \frac{1}{T} \int_0^T \left(\frac{V_0}{R}\right)^2 e^{-2t/RC} dt \quad \dots (5)$$

habiendo usado la expresión (3). Al resolver la integral anterior se obtiene:

$$(I_{rms})^2 = \left(\frac{V_0^2 C}{2TR}\right) (1 - e^{-2T/RC}) \quad \dots (6)$$

Si en la ec. anterior se establece el período como  $T = N\tau = NRC$ , considerando  $N \geq 4$  ( $N = 4$  corresponde al período antes usado), entonces la exponencial de la expresión anterior puede despreciarse ( $e^{-2N} \approx 0$ ) y la ec. (6) se reduce a  $(I_{rms})^2 = \left(\frac{V_0^2}{2NR^2}\right)$ , con lo que la ec. (4) de la potencia buscada queda finalmente como:

$$P_R = \left(\frac{V_0^2}{2NR}\right) \quad \dots (7)$$

Nótese que si en la expresión anterior se sustituyen los valores antes mencionados ( $V_0 = 26.4$  kV,  $R = 520$  k $\Omega$  y  $N = 4$ ), la potencia a disipar resulta:  $P_R = 167.5$  W, lo que sobrepasa mucho los 50 W utilizados para  $R_0$ , ya que  $P_R \approx P_{R0}$ . Si en la misma expresión anterior se acota  $P_R = 50$  W para obtener un nuevo factor  $N^*$ , este resulta de  $N^* = 13.4$ , lo que a su vez implica el nuevo período:  $T^* = 1.11$  s y frecuencia respectiva:  $f^* = 0.9$  Hz. También se puede reducir el valor límite del voltaje de carga ( $V_0$ ) para disminuir dicha potencia, lo cual reduce el intervalo de energías para el GET (ec. (1), sección 1.2). Después de considerar tales aspectos, se

determinó usar 25 kV como máximo voltaje de operación ( $V_o$ ), con lo que el período mínimo resulta de 1 segundo y la frecuencia máxima de operación de 1 Hz.

Las resistencias  $R_{S1}$  y  $R_{S2}$  conectadas en paralelo a los respectivos condensadores  $C1$  y  $C2$ , se incluyeron tanto para drenar una pequeña corriente de sangrado a los mismos, como para medir el alto voltaje en todo momento de operación del GET. Para esto último, se tenía destinado un medidor analógico (tipo D'Arsonval) fabricado como voltímetro de 0 a 15 Vcd (ver Fig. 2.22, parte superior derecha), el cual fue analizado para conocer su corriente de máxima deflexión ( $I_m = 1$  mA) y su resistencia interna ( $15$  k $\Omega$ ). Con estos datos y tomando en cuenta que el máximo voltaje a medir es de 30 kV (con un transformador de A.V. más adecuado que el descrito anteriormente), se diseñó e incorporó el arreglo de resistencias  $R_d$ ,  $R_1$  y  $R_s$  mostradas en la Fig. 2.28, para uno de los condensadores, ya que el otro tiene las mismas resistencias  $R_s$  y  $R_1$  y comparte el medidor mediante el selector también mostrado en la figura.

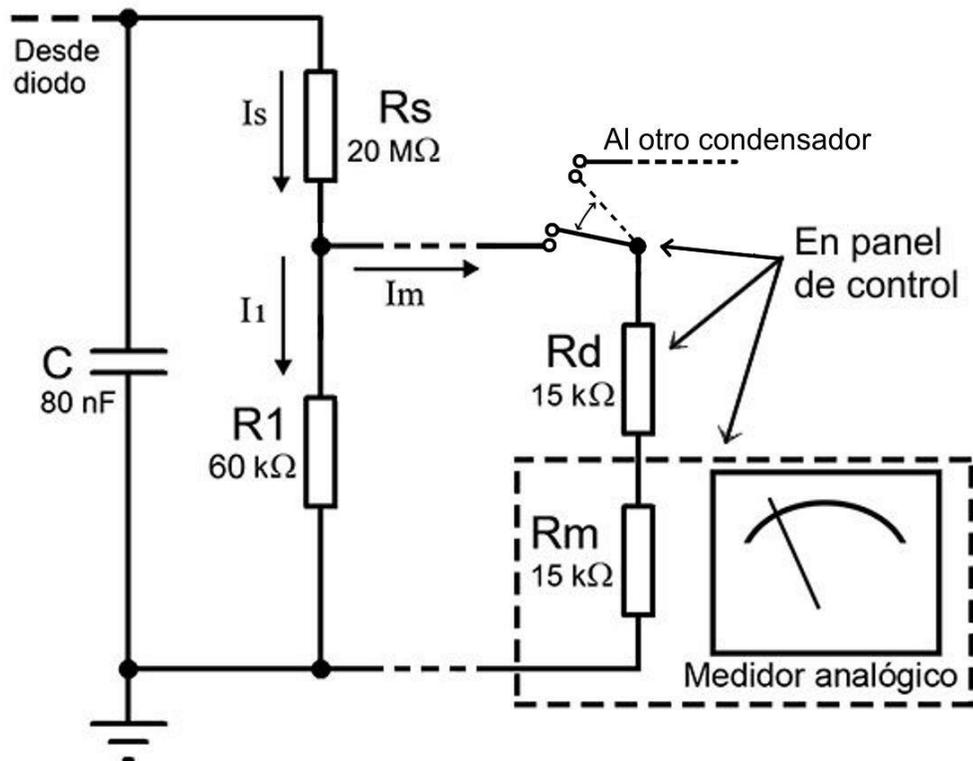
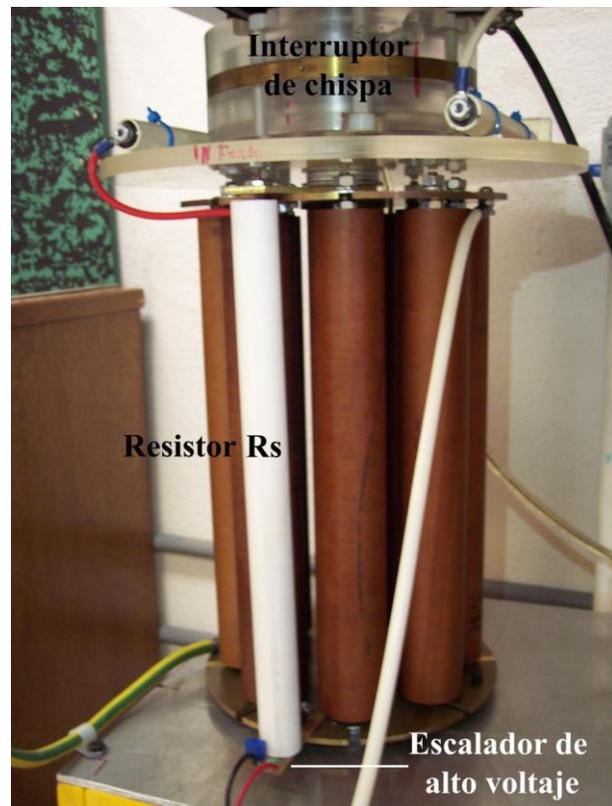


Fig. 2.28 Medición (escalada 1000:1) del alto voltaje de c.d.

La primera resistencia incorporada fue  $R_d$ , que se formó por la serie de  $12\text{ k}\Omega \pm 5\%$  y un trim-preset de  $5\text{ k}\Omega$  en 20 vueltas, a fin de duplicar con precisión la entrada de máxima deflexión del voltímetro (hasta  $30\text{ V}$ ), así como su resistencia interna (hasta  $30\text{ k}\Omega$ ). Posteriormente se calculó  $R_1$ , considerando que la corriente a través de esta ( $I_1$ ) fuese comparable y menor a  $I_m$  ( $1\text{ mA}$ ), habiendo escogido  $I_1 = 0.5\text{ mA}$ , con lo que su valor es de  $60\text{ k}\Omega$ , el cual fue logrado en forma similar al de  $R_d$  ( $56\text{ k}\Omega \pm 5\%$  en serie con trim-preset de  $10\text{ k}\Omega$ ) para garantizar la precisión de los  $30\text{ V}$  para el voltímetro, que bajo la escala  $1000:1$  correspondieran al máximo valor del alto voltaje a medir ( $30\text{ kV}$ ).

Con lo anterior, la corriente de sangrado ( $I_s$ ) quedó determinada a  $1.5\text{ mA}$  y consecuentemente el valor de  $R_s$  -la principal resistencia divisora del alto voltaje- debería ser prácticamente de  $20\text{ M}\Omega$ , pero a una potencia de  $(1.5 \times 10^{-3}\text{ A})^2 (20 \times 10^6\ \Omega) = 45\text{ W}$ . Por esto último, cada una de las dos resistencias  $R_s$  fue construida mediante la serie de 12 arreglos de resistencias de  $1.64\text{ M}\Omega$  a  $5\text{ W}$ , ya que cada arreglo consistió de 5 resistencias de  $8.2\text{ M}\Omega$  a  $1\text{ W}$  conectadas en paralelo. Así, el equivalente nominalmente esperado sería de  $19.68\text{ M}\Omega$  a  $60\text{ W}$  y la diferencia con respecto a los  $20\text{ M}\Omega$  del cálculo podría compensarse mediante los trim-presets antes mencionados. El acabado final de las dos resistencias  $R_s$  fue en tubos de PVC de  $\frac{1}{2}$ " de diámetro y  $27.5\text{ cm}$  de longitud, con resina epóxica tipo EPO-200®; y una de ellas se puede notar ya montada en la unidad de carga y descarga de A.V. que se muestra en la Fig. 2.29.

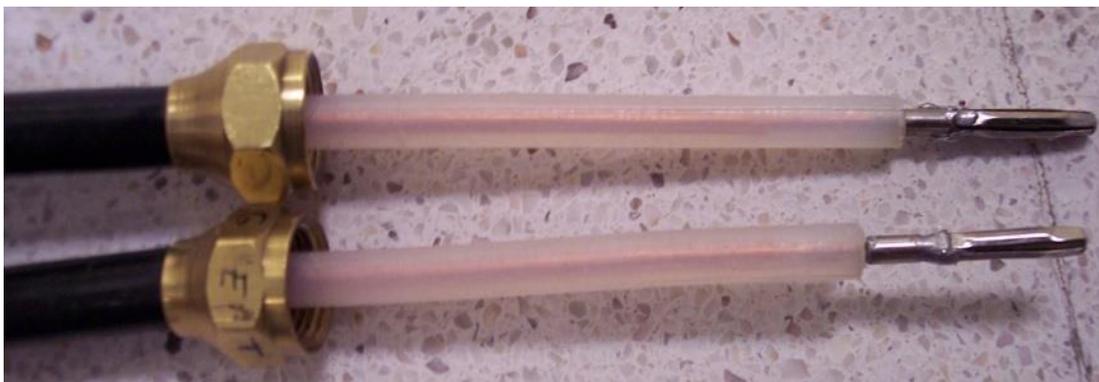


**Fig. 2.29** Unidad de carga y descarga de A.V. con resistencias para medición con escala  $1000:1$ .

Ya con lo anterior, la fuente de alto voltaje fue probada en una de las mesas de trabajo del laboratorio, con ambas unidades de carga y descarga de alto voltaje, e inclusive con el medidor conectado provisionalmente, encontrando su funcionamiento conforme a lo diseñado. Sin embargo, al montar el conjunto dentro de la estructura del GET y tratar de confirmar su buen funcionamiento, ocurría una sobrecarga que abría el fusible del panel de control (Fig. 2.22) contemplado para tan remota situación. Después de indagar al respecto, se encontró que el transformador de alto voltaje tenía aislamiento eléctrico deficiente entre sus terminales de salida y la cubierta metálica, la cual por seguridad en el montaje definitivo fue conectada a tierra física (y no durante las pruebas de laboratorio). Ante la imposibilidad de conseguir a corto plazo otro transformador similar en buen estado (o más adecuado, según lo antes descrito), fue necesario retirar el transformador y desarrollar lo siguiente.

### **2.3.5 Conexión al alto voltaje del generador Mexilit**

Debido a dicho imprevisto, se propuso como solución temporal crear una conexión a la fuente de alto voltaje del generador de ondas de choque Mexilit (marca Gamma, High Voltage Research Co.) para obtener el voltaje necesario al funcionamiento el GET. Para ello se elaboró una extensión para alto voltaje, con cable adecuado y terminales suficientemente separadas para evitar efectos de corona o arco, utilizando conectores de gas LP en los polos de tierra y “plugs” tipo banana en los polos de A.V., los cuales pueden observarse en la Fig. 2.30.



**Fig. 2.30 Terminales de alto voltaje para la extensión del Mexilit al GET.**

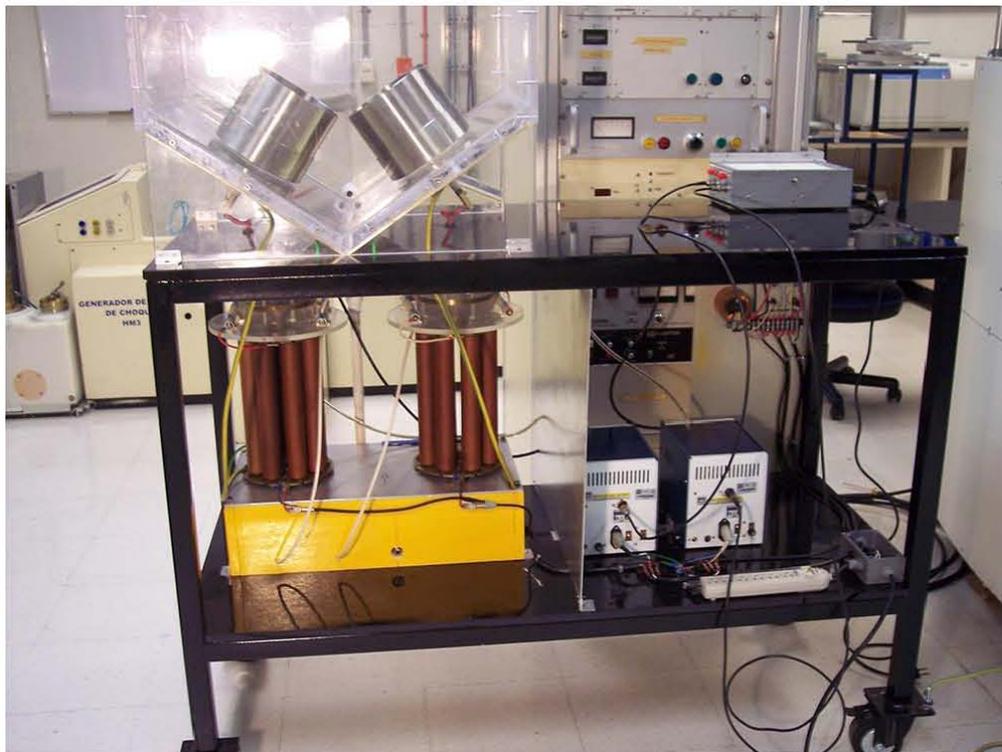
En forma análoga, se crearon sus respectivas entradas utilizando las contrapartes correspondientes a dichas terminales, las cuales se ubicaron tanto en la caja del GET donde se encontraba el transformador defectuoso (con conexión a los diodos de alto voltaje) como en el interior del Generador Mexilit donde está la conexión a dicha fuente comercial de A.V., la cual usualmente está montada en un “rack” cercano al mismo. Cabe mencionar que esto último fue para evitar -en lo posible- alteraciones al uso rutinario del Mexilit. Ambas conexiones se ilustran en la figura 2.31.



**Fig. 2.31 Conectores del alto voltaje tanto en el GET (izq.) como en el MEXILIT (der.).**

### **2.3.6 Acabado final del GET**

Después de comprobar el buen funcionamiento de la “extensión para alto voltaje” tanto en el generador Mexilit como en el GET (completa ausencia de posibles efectos de arco o corona), se llenó la tina de este último con 64 litros de agua del tanque de reciclado (hasta el nivel de uso, a 4 cm por encima del plano focal), haciendo varias descargas de prueba con sus consecuentes emisiones de ondas de choque, sin detectar anomalías. Con ello, se dio por concluido el ensamblado del GET, según se muestra en las imágenes de la figura siguiente, donde todavía no están las cubiertas laterales tanto para apreciar su interior como para facilitar las evaluaciones del mismo que se describen en el capítulo siguiente.



**Fig. 2.32 De arriba abajo, vista frontal y trasera del GET completamente ensamblado.**

## CAPÍTULO 3

### EVALUACIÓN DEL GENERADOR DE ONDAS DE CHOQUE GET

#### 3.1 Caracterización de parámetros de operación y control

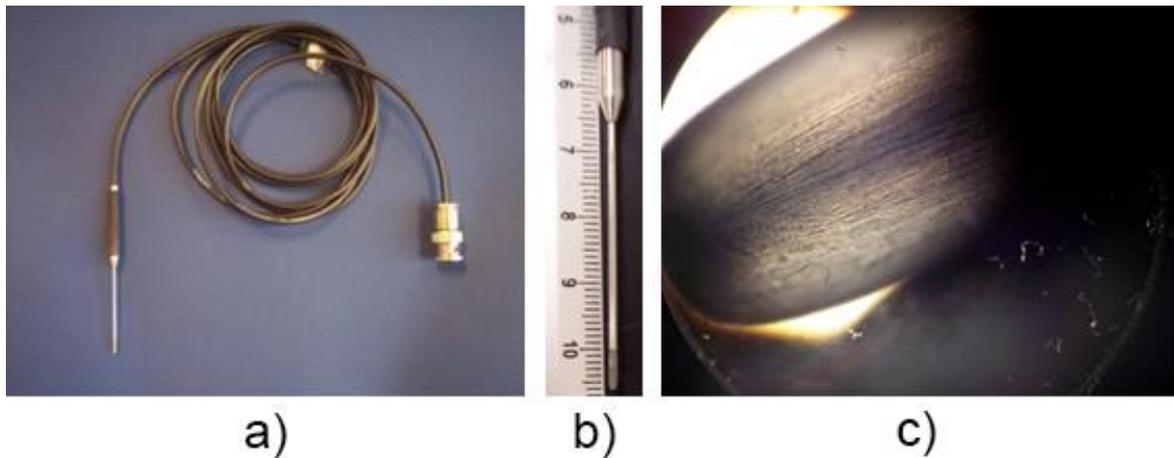
Una vez ensamblado el generador electrohidráulico *tándem*, la primera prueba consistió en comprobar los rangos de alto voltaje bajo los cuales es posible la descarga en el electrodo que genera la onda de choque. Para este fin se conectó el equipo y se llenó la tina solamente hasta que el agua cubriera por completo los reflectores sin llegar necesariamente al plano focal, ya que el objetivo era solamente observar la chispa.

Se descubrió que el rango se encuentra entre 14.5 kV y 30 kV. De aquí, basados en la expresión para la energía del capacitor  $E = \frac{1}{2} CV^2$  se determinó que el rango de energía liberada por cada cabezal es de entre 8.41 J y 36 J.

La siguiente prueba fue la medición de los perfiles de presión generados en tres situaciones diferentes: disparo monopolso con el cabezal derecho, disparo monopolso con el cabezal izquierdo y disparo simultáneo. Se utilizó un transductor de presión marca Imotec GmbH, tipo 80-0.5-4.0, con sensibilidad (S) de 0.373 pC/bar y capacidad (C) de 238 pF, ilustrado en la Fig. 3.1.

Tal transductor se conectó directamente a un osciloscopio, en el cual se registró una señal de voltaje equivalente a la presión a medir. Una vez llena la tina de pruebas del generador hasta un nivel por encima del plano focal, el transductor se colocó en el foco común de los reflectores, utilizando el soporte de otro generador piezoeléctrico del LOCH. Para evitar distorsión electromagnética, la punta del sensor fue recubierta con pintura de plata, según recomendación de su fabricante, quien también especifica alinearlo con el eje focal del reflector. Esto último obviamente se refiere a generadores de tipo convencional (de un solo cabezal), por lo que en este caso se decidió mantener una orientación del transductor con la

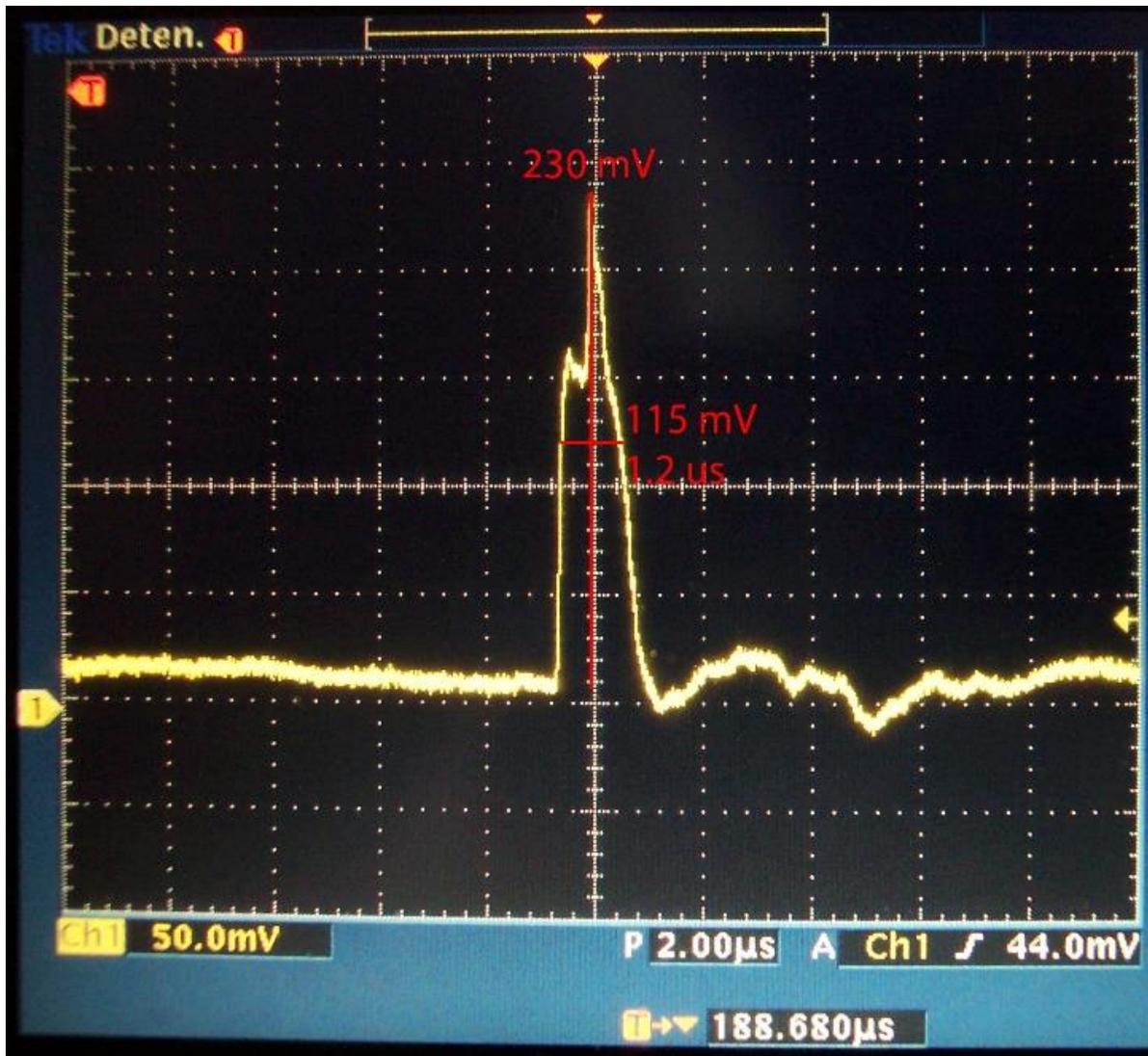
vertical (a 34° de cada eje focal), realizando disparos y ajustando la posición hasta encontrar un pico máximo y relativamente constante en la medición, lo que fue señal de que la punta del transductor se encontraba en la posición de óptima lectura.



**Fig. 3.1 a) Transductor Imotec GmbH. b) La región sensora (punta semitransparente) mide solamente 6 mm de largo. c) Punta vista bajo un microscopio óptico con un aumento de 10x. Se observa el transductor recubierto por un polímero.**

El factor de equivalencia (FE) es proporcionado por el fabricante del transductor mediante la relación:  $FE = S/C_T$ , donde S es la sensibilidad antes mencionada y  $C_T$  es la capacidad total involucrada en la medición; es decir, la del transductor más la del osciloscopio utilizado. En este caso se usa un osciloscopio Tektronix mod. TDS 3032, con capacidad de 13 PF, por lo que  $C_T$  resulta de 251 pF y el factor de equivalencia es:  $FE = (0.373 \text{ pC/bar})/251 \text{ pF} = 1.486 \text{ mV/bar}$ . Finalmente se utiliza el factor de conversión  $1 \text{ bar} = 0.1 \text{ MPa}$  para expresar el resultado en unidades del Sistema Internacional.

Se utilizaron grupos de 10 muestras para cada medición y se realizaron pruebas en distintos voltajes: 16 kV, 18 kV, 20 kV, 22 kV y 24 kV. La Fig. 3.2 ilustra un ejemplo de medición de una muestra. En cada imagen se midió el pico máximo y la anchura a media altura (FWHM: Full Width at Half Maximum) utilizando el software de edición de imagen Adobe PhotoShop.



**Fig. 3.2** Medición de presión a 20 kV en el cabezal izquierdo. En color rojo se observan las líneas usadas para medir el pico máximo y la anchura a media altura, así como la anotación de los resultados obtenidos.

Una vez analizadas todas las muestras, se obtuvo el promedio y la desviación estándar (y por consiguiente el coeficiente de variación) del pico de presión ( $P+$  [MPa]) de cada grupo, así como su correspondiente duración FWHM [ $\mu\text{s}$ ] que permitió obtener la densidad de impulso ( $I_{\sigma}$  [ $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ]) de las ondas de choque en cada caso. Este último parámetro se describe con mayor detalle al inicio del capítulo siguiente. Tales datos se colocaron en 5 tablas contiguas (una para cada voltaje utilizado) para compararlas entre sí y con las medidas de presión realizadas previamente en el MEXILIT. Los resultados se muestran en la Fig. 3.3.

16 kV				
Onda de choque	P+ [MPa]	C. variación [%]	FWHM [ $\mu$ s]	$I\sigma$ [Pa*s]
Mexilit	23.59	23.15	0.394	9.29
GET izquierdo	11.04	15.53	1.200	13.25
GET derecho	5.96	5.36	2.090	12.46
GET simultáneo	6.93	28.60	1.980	13.72
18 kV				
Onda de choque	P+ [MPa]	C. variación [%]	FWHM [ $\mu$ s]	$I\sigma$ [Pa*s]
Mexilit	22.88	30.70	0.348	7.96
GET izquierdo	12.21	11.10	1.240	15.14
GET derecho	6.09	5.49	2.350	14.31
GET simultáneo	10.83	35.55	1.440	15.60
20 kV				
Onda de choque	P+ [MPa]	C. variación [%]	FWHM [ $\mu$ s]	$I\sigma$ [Pa*s]
Mexilit	19.22	20.05	0.688	13.22
GET izquierdo	12.69	17.42	1.260	15.99
GET derecho	6.19	3.8	2.240	13.87
GET simultáneo	8.51	31.68	1.520	12.94
22 kV				
Onda de choque	P+ [MPa]	C. variación [%]	FWHM [ $\mu$ s]	$I\sigma$ [Pa*s]
Mexilit	20.46	15.96	0.604	12.36
GET izquierdo	14.03	11.42	1.180	16.56
GET derecho	6.70	5.00	2.380	15.95
GET simultáneo	10.43	34.31	1.390	14.50
24 kV				
Onda de choque	P+ [MPa]	C. variación [%]	FWHM [ $\mu$ s]	$I\sigma$ [Pa*s]
Mexilit	20.03	11.25	0.432	8.65
GET izquierdo	14.03	12.49	1.230	17.26
GET derecho	7.27	6.62	2.190	15.92
GET simultáneo	7.10	13.49	2.100	14.91

**Fig. 3.3 Resultados de las mediciones de presión a distintos voltajes.**

### 3.2 Estandarizado de modelos de cálculos renales

Para realizar pruebas de fragmentación in vitro con dicho generador, se requirieron muestras estandarizadas en cuanto a composición, forma y tamaño, las cuales fueron expuestas a la acción de ondas de choque generadas con diversos parámetros (energía, cantidad de impactos, tiempos de retardo, etc.). Se utilizó un mínimo de 10 muestras para cada caso de interés, a fin de obtener promedio, desviación estándar y coeficiente de variación en cada uno de ellos, dado que la variabilidad típica en ese tipo de experimentos es relativamente alta (30 a 40 %).

Para efectos de lo anterior, se dispuso de material estandarizado en la composición de los cálculos renales (tipo HMT: High Medical Technologies, Kreuzlingen, Suiza), que venía en bloques de 30x30x15 mm. De cada uno de estos bloques se cortaron 8 segmentos iguales de 7.5x7.5x30 mm, para después torneado muestras cilíndricas con un diámetro de 5 mm y una longitud entre 7 y 8 mm. De esta forma fue posible obtener 3 muestras por división, dando un total de 24 muestras por cada bloque, las cuales finalmente se acabaron con 7 mm de longitud mediante lijado sobre una superficie de vidrio. En resumen, en esta parte se estandarizó dicho material a forma cilíndrica recta de 5 mm de diámetro y 7 mm de longitud.



**Fig. 3.4 Torneado de muestras cilíndricas**

### 3.3 Pruebas de fragmentación

Para las pruebas de fragmentación, cada muestra fue pesada en seco (Pi) con una balanza analítica y posteriormente colocada dentro de una bolsa de polietileno con agua destilada y sellada para simular el medio acuoso dentro de un riñón. La hidratación se mantuvo durante dos horas y a su término fue suspendida en el foco de la tina de pruebas y sometida a una serie de ondas de choque predefinida (p.ej. 60 impactos monopolso, 30 impactos tándem, etc.), fragmentando parcialmente la muestra. Una vez fragmentada, la muestra se pasó por un colador de malla calibrada (1.8 x 1.8 mm) de manera que sólo quedara lo que no sería fácil de expulsar por vías urinarias. Estos residuos se secaron durante dos horas en un horno de temperatura controlada (50 °C) y finalmente se pesaron (Pf) con la balanza analítica. El coeficiente de fragmentación (CF) se calculó por diferencia de pesos en cada muestra ( $CF = [Pi - Pf]/Pi$ ), usando en cada caso analizado la estadística de al menos 10 muestras sometidas al mismo tratamiento. Un ejemplo de dicha prueba se muestra a continuación:

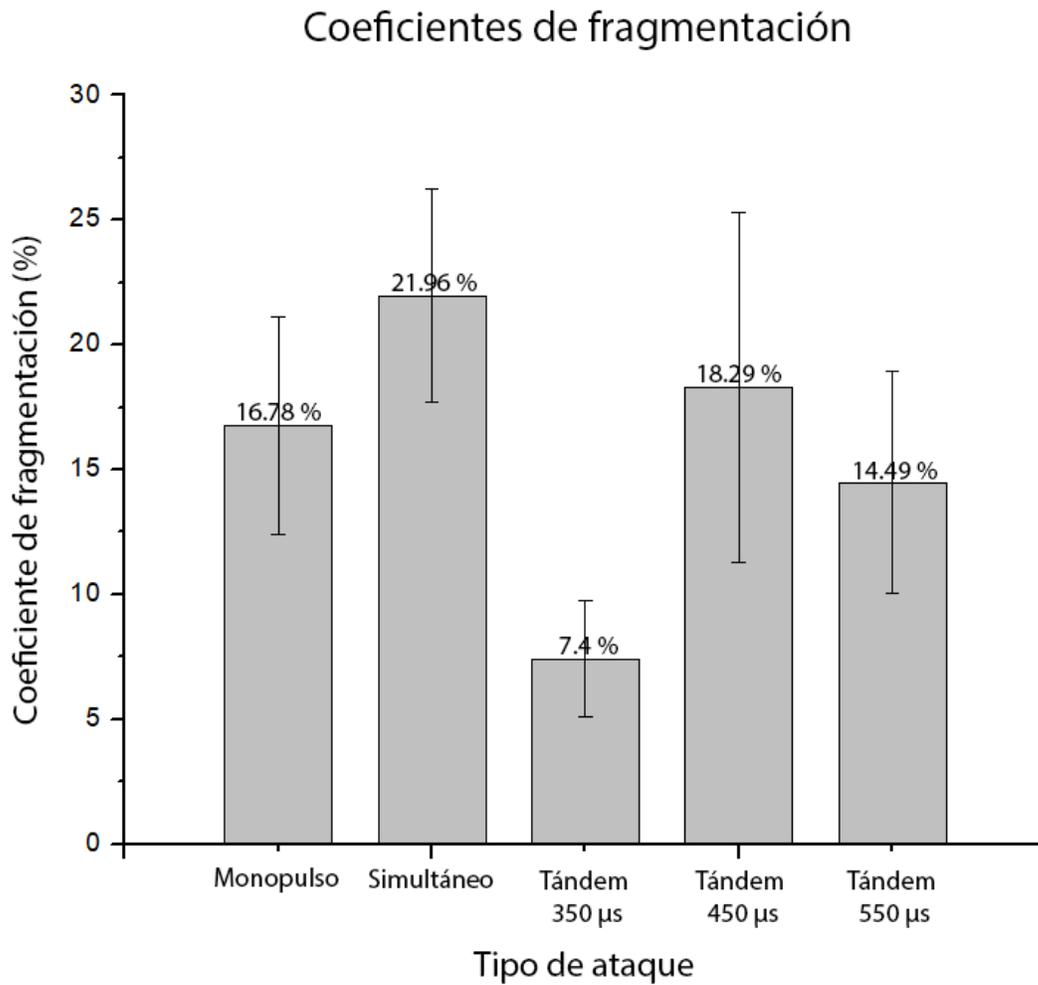
HOJA DE DATOS_1_DE 1							Fecha de la sesión: 16 de febrero del 2017	
Proyecto: Fracturas simultánea GET							Generador: GET	
Etapa: Fractura de modelos							Modo de ataque: Simultáneo	
Responsable(s): José Germán Cortés González / Francisco Fernandez							Alto voltaje: 18 kV	
Colaboradore(s): Paula Bernardino							Unidad(es): 1 y 2	
Modelos: HMT cilíndricos, $\Phi = 5$ mm, long = 7 mm							Delay(s): N.P.	
Temp. del agua: ambiental, con registro al inicio y fin de cada sesión (por lo menos)							Dial(es): N.P.	
							No. de eventos: 30	
							Frecuencia: 0.5 Hz (1 c/2 seg)	
							Total de O-CH's: 60	
No. de Exp.	Peso inicial (g)	Hora de hidratado	Hora de ataque	Tiempo de hidratado	No. de frags.	Peso final (g)	CF [%]	Observaciones (Temp. agua, etc.)
1	0.1221	12:10	14:10	02:00	9	0.0977	19.98	Temperatura inicial = 20°C
2	0.1178	12:20	14:20	02:00	6	0.0867	26.40	Temperatura final = 20°C
3	0.1258	12:30	14:30	02:00	6	0.0935	25.68	
4	0.1185	12:40	14:40	02:00	7	0.0847	28.52	
5	0.1225	12:50	14:50	02:00	6	0.0966	21.14	
6	0.1216	13:00	15:00	02:00	3	0.0928	23.68	
7	0.1275	13:10	15:10	02:00	12	0.1017	20.24	
8	0.1166	13:20	15:20	02:00	8	0.0905	22.38	
9	0.1221	13:30	15:30	02:00	4	0.1033	15.40	
10	0.1218	13:40	15:40	02:00	3	0.1021	16.17	
Promedio:	0.1216			2.000	6.4000	0.0950	21.9601	
Desv. Std.:	0.0034			0.000	2.7968	0.0065	4.2668	
C.V. [%]:	2.78			0.00	43.70	6.81	19.43	

Fig. 3.5 Ejemplo de una hoja de registro correspondiente a una prueba de fragmentación de cálculo renal artificial.

Se realizaron cinco pruebas de fragmentación solamente con el generador electrohidráulico *tándem*:

- 60 ondas monopolso.
- 30 ondas simultáneas.
- 30 ondas *tándem* con una separación de 350  $\mu$ s.
- 30 ondas *tándem* con una separación de 450  $\mu$ s.
- 30 ondas *tándem* con una separación de 550  $\mu$ s.

Los resultados se muestran en la Fig. 3.6.



**Fig. 3.6** Coeficientes de fragmentación obtenidos para cada tipo de ataque.

## Capítulo 4

### DISCUSIÓN DE RESULTADOS

#### 4.1 Caracterización de parámetros de operación y control

Como se menciona en la sección 3.1 del capítulo anterior, los datos registrados de las mediciones de presión fueron básicamente el pico máximo ( $P_+$ [MPa]) y la anchura a media altura de la onda resultante (FWHM[ $\mu$ s]); esto con el objetivo de aproximar la medición a una curva gaussiana tal que el producto de estos dos parámetros equivalga aproximadamente a la densidad de impulso ( $I_\sigma$  [Pa\*s]) generada por cada onda de choque. Es decir, se facilita calcular la presión aplicada por la onda de choque en la región focal, durante el tiempo de aplicación de la misma, lo que resulta en un impulso por unidad de área en dicha zona y tiene relación con la transferencia de energía a la misma región. De manera elemental, lo anterior puede comprenderse fácilmente al considerar que la presión es una fuerza ( $F$ ) por unidad de área ( $A$ ), que al multiplicar por el tiempo de su aplicación ( $t = \text{FWHM}$ ) se tiene:

$$P t = \frac{F}{A} t = \frac{I}{A} = I_\sigma \quad (4.1)$$

donde  $I = F t$  es el conocido impulso en la mecánica clásica e  $I_\sigma$  lo que se ha denominado densidad de impulso.

Así, los valores de ambos parámetros ( $P_+$ ,  $I_\sigma$ ) fueron resumidos en las tablas de la Fig. 3.3, para diversas emisiones del GET (e inclusive del Mexilit utilizado como referencia) y a varios voltajes de descarga, a fin de comparar tanto las características inherentes a los diversos casos para un mismo voltaje, como su comportamiento al incrementar este último. A continuación, en las Fig. 4.1 a 4.5 se muestran gráficas correspondientes a las tablas de la Fig. 3.3., para posteriormente discutir lo pertinente.

### Voltaje de descarga: 16 kV

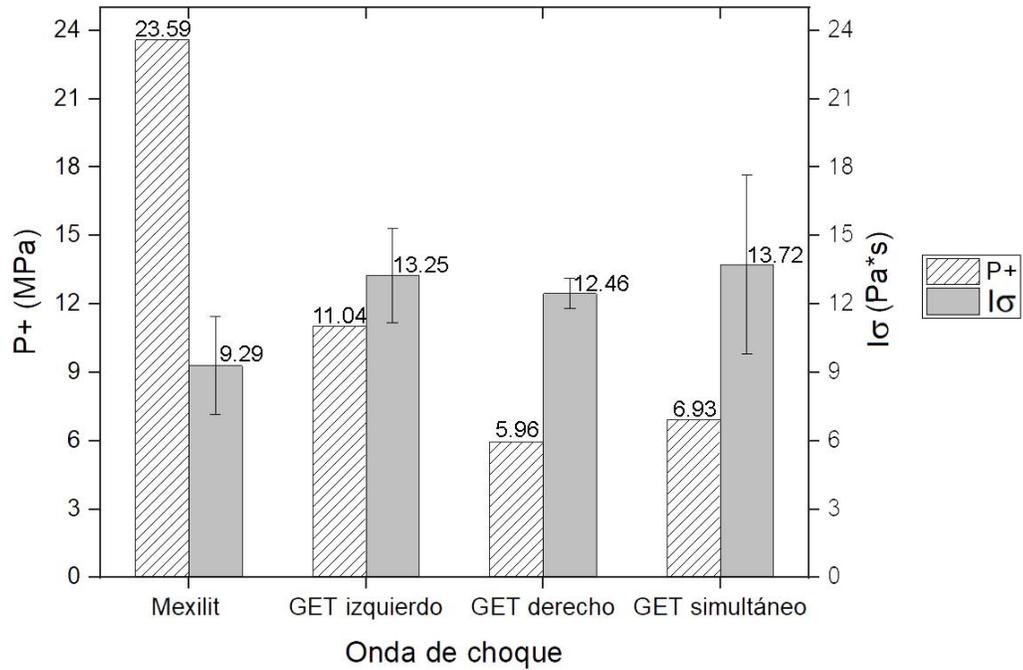


Fig. 4.1. Densidades de impulso y picos de presión a 16 kV

### Voltaje de descarga: 18 kV

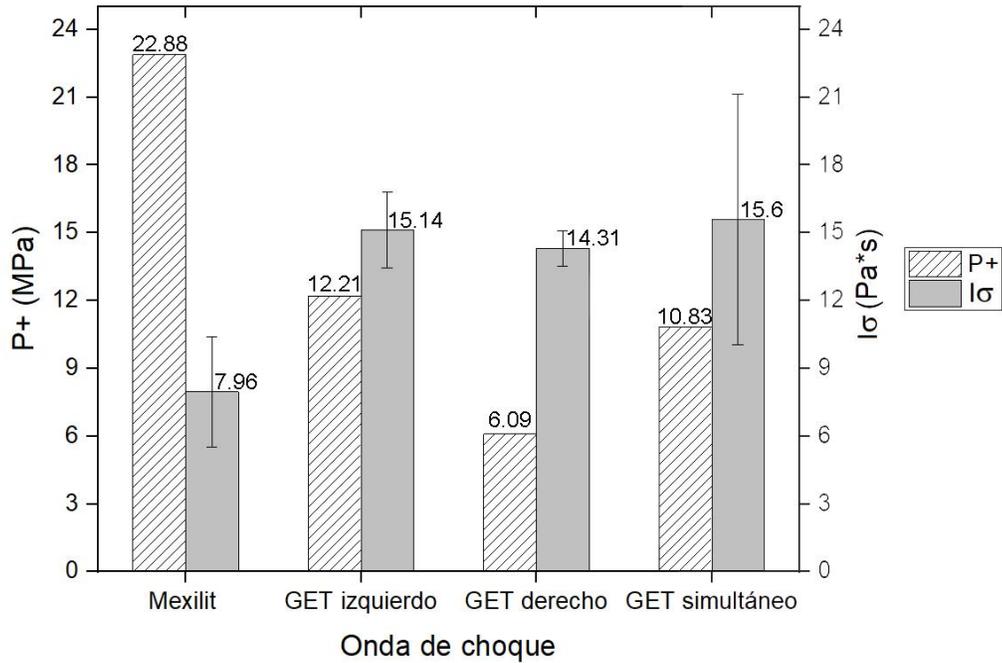
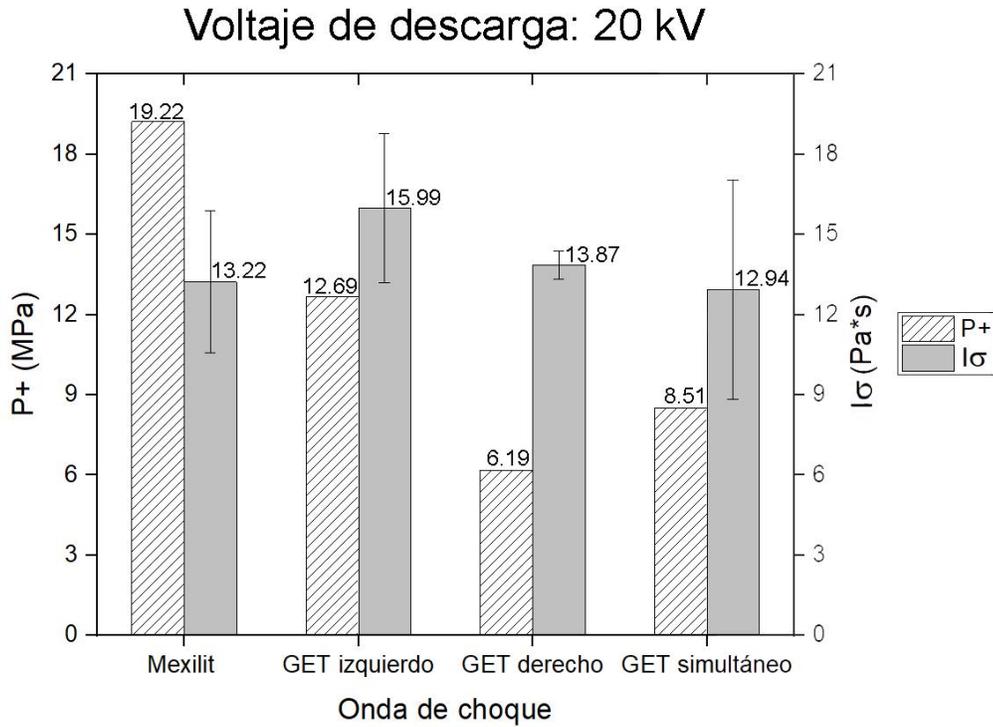
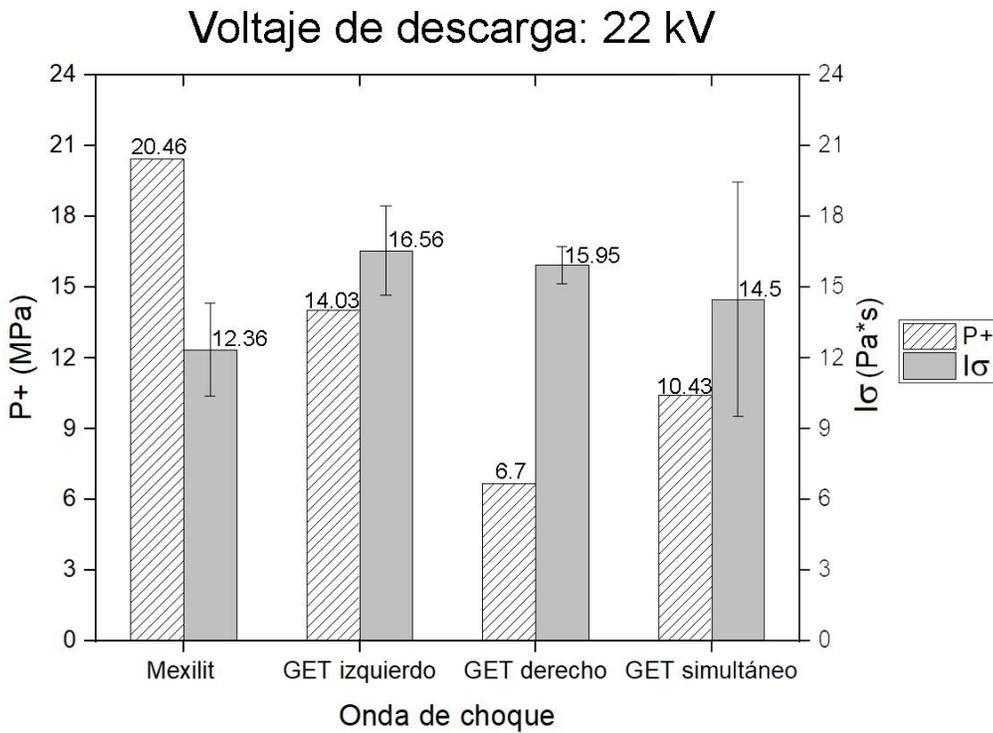


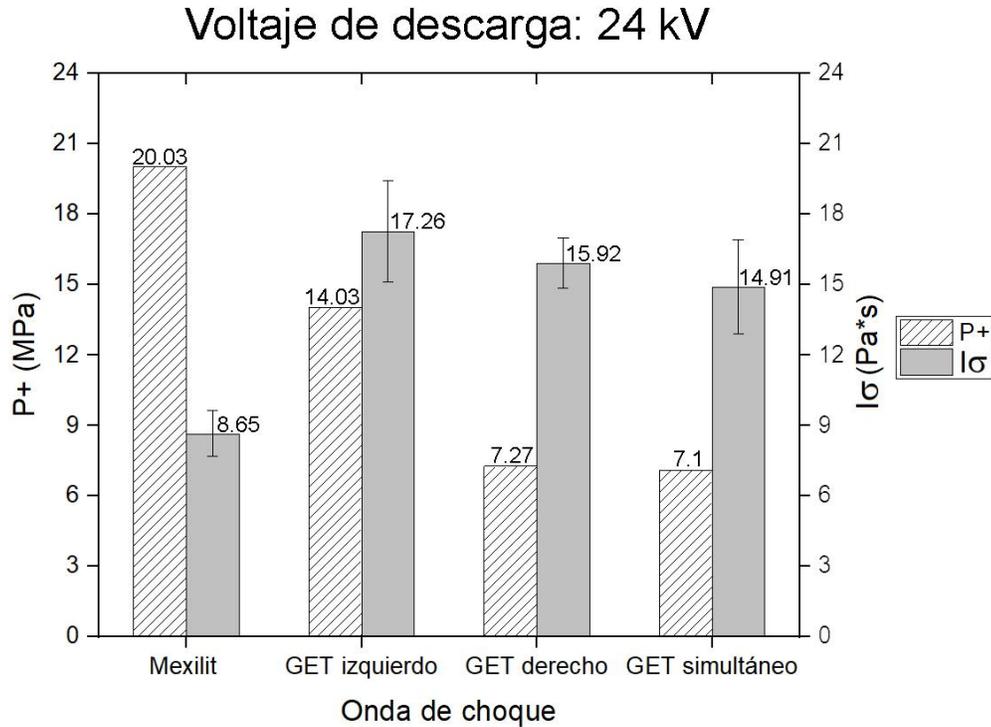
Fig. 4.2. Densidades de impulso y picos de presión a 18 kV



**Fig. 4.3. Densidades de impulso y picos de presión a 20 kV**

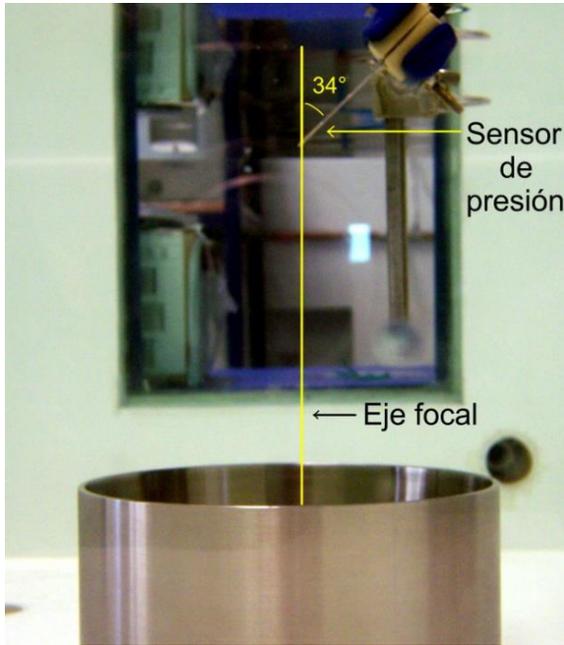


**Fig. 4.4. Densidades de impulso y picos de presión a 22 kV**



**Fig. 4.5. Densidades de impulso y picos de presión a 24 kV**

En las gráficas anteriores se observa en primer lugar que para cualquiera de los cinco casos de voltaje de descarga, el generador Mexilit entrega un pico de presión mayor y una densidad de impulso menor a los parámetros respectivos en todas las emisiones generadas con el GET, tanto en modo equivalente (monopulso, ya sea con el cabezal izquierdo ó el derecho) como en modo simultáneo. Cabe recordar que en el Mexilit el sensor de presión fue alineado con eje focal mientras que en GET se ubicó verticalmente (a 34° de inclinación con respecto al eje focal de cada cabezal del GET), lo cual podría influir en la comparación. Para disipar dudas sobre esto último, se hicieron nuevas pruebas de presión en el Mexilit, pero con el sensor de presión inclinado 34° de su eje focal (según se muestra en la figura 4.6), con resultados que sólo mostraron una atenuación máxima de 15.5 % en el pico de presión (P+), sin cambios significativos en la duración de los frentes de choque; lo cual aún considerándolo en las gráficas anteriores no modifica la observación sobre la superioridad de los picos de presión del Mexilit con respecto a los del GET, así como la inferioridad análogamente relativa de las densidades de impulso.



**Fig. 4.6. Nuevas mediciones de presión en el Mexilit, con el sensor de presión inclinado.**

Al buscar otras causas atribuibles a dichas diferencias, se analizaron más detenidamente las tablas de la Fig. 3.3, encontrando que la duración de los frentes del choque del Mexilit (valores FWHM), fueron significativamente menores a los del GET en todas sus modalidades y para todos los voltajes probados. A saber, en el Mexilit los valores encontrados están en el intervalo (0.34, 0.69)  $\mu\text{s}$ , mientras que para las diversas emisiones del GET los intervalos encontrados fueron (1.18, 1.26)  $\mu\text{s}$ , (2.09, 2.38)  $\mu\text{s}$  y (1.39, 1.98)  $\mu\text{s}$  para el cabezal izquierdo, derecho y modo simultáneo, respectivamente. Así, la causa

más probable de tan marcadas diferencias temporales, podrían ser efectos inductivos parásitos en los circuitos de descarga del GET, ya que las conexiones de los polos de salida de sus interruptores de chispa a los electrodos de descarga (bujías) son mediante cables relativamente largos con respecto a las conexiones empleadas en el Mexilit, donde se utilizaron barras conductoras (rígidas) muy cortas (i.e., la bujía está prácticamente pegada al interruptor de chispa).

Otro aspecto notable en las gráficas de las Fig. 4.1 a 4.5, es que el cabezal izquierdo del GET siempre proporciona picos de presión mayores que el cabezal derecho (aproximadamente en razón 2:1), mientras que sus densidades de impulso son más similares. Esto podría justificarse por diferencias en dichas inductancias parásitas, ya que los intervalos de duración de los frentes de choque antes mencionados presentan la razón recíproca; es decir, en el cabezal izquierdo los tiempos son alrededor de 1.22  $\mu\text{s}$ , mientras que en el derecho el promedio burdo del intervalo es de 2.24  $\mu\text{s}$ . También son de observar las amplitudes de dichos intervalos: 0.08  $\mu\text{s}$  para el cabezal izquierdo y 0.29  $\mu\text{s}$  para el derecho; lo que sugiere

mayor estabilidad de funcionamiento del izquierdo con respecto al derecho, aún cuando ambas unidades de carga y descarga comparten la misma fuente de alto voltaje, prácticamente tienen los mismos condensadores, reflectores, bujías y mordazas; y aparte de las posibles diferencias en sus cableados de descarga sólo existe el hecho de que para la unidad derecha se utilizó un interruptor de chispa existente en el laboratorio (ya usado, fabricado en U.S.A), mientras que en la unidad izquierda se montó el nuevo interruptor de chispa (descrito en la sección 2.2.2) que fue fabricado en el taller mecánico del CFATA. En resumen, la mejor estabilidad de la unidad izquierda podría atribuirse a menor inductancia parásita, a las partes nuevas del interruptor de chispa e inclusive a la dedicación del Sr. René Preza en su fabricación.

Por último, al analizar el modo de emisión simultánea en dichas gráficas, se puede ver que la densidad de impulso es parecida a los modos de emisión en monopolso (GET izquierdo y derecho) aunque con mayor incertidumbre, mientras que los valores de los picos de presión fueron generalmente menores al del GET izquierdo y mayores que el del GET derecho. Sólo en la última gráfica (a 24 kV de descarga), la incertidumbre de la densidad de impulso disminuyó apreciablemente y el pico de presión fue ligeramente menor que el del GET derecho.

A priori, se podrían haber esperado valores mayores de dichos parámetros en la emisión simultánea, con respecto a los modos en monopolso, por simple superposición de efectos. Sin embargo, los parámetros analizados en estas mediciones fueron las presiones, que involucran fuerzas e impulsos (vectores) y hay que tomar en cuenta las regiones focales<sup>[4, 5]</sup> de cada uno de los cabezales, cuya intersección realmente no es un punto sino un pequeño volumen que podría aproximarse a forma esférica (con diámetro aproximado de 12 mm), en cuyo interior se ubicó el sensor de presión (de forma cilíndrica recta con 1 mm de diámetro y 6 mm de longitud). Es decir, si el sensor de presión quedó completamente contenido en la región focal del GET, existe la posibilidad de que al llegar los frentes de choque a la frontera de la región focal (antes de alcanzar al sensor), ocurran cancelaciones de fuerzas por la

simetría de las direcciones de propagación de los frentes de choque. Esta deducción es meramente hipotética y obviamente habría que ratificarla o rectificarla mediante más pruebas al respecto.

#### 4.2. Pruebas de fragmentación

Los resultados de las pruebas de fragmentación sintetizados en la gráfica de la figura 3.6, demostraron una eficiencia de 16.78% en el modo monopolso, que era de esperarse y es comparable a la eficiencia de otros dispositivos como el Mexilit. También demostraron que la generación de ondas de choque *tándem* proporciona resultados muy diferentes según el retardo utilizado, siendo más eficiente el de 450  $\mu\text{s}$  (con un coeficiente de 18.29 %) y menos eficiente el correspondiente al retardo de 350  $\mu\text{s}$ , cuyo coeficiente de fragmentación resultó de 7.4 %. Para el retardo de 550  $\mu\text{s}$  se obtuvo un coeficiente de 14.49 %, que al parecer tiende al valor del modo monopolso; i.e., el retardo más largo en modo *tándem* con 30 eventos (dobles) sugiere un comportamiento similar al modo monopolso con 60 emisiones, lo cual habría que probar mediante más fragmentaciones en *tándem* con retardos mayores a dichos 550  $\mu\text{s}$ .

Lo más interesante de estas pruebas fue que el uso de ondas de choque simultáneas mostró la mayor eficiencia de los casos analizados, ya que el coeficiente de fragmentación obtenido (con 30 eventos dobles) resultó de 21.96%. Se cree que esto se debe a un tercer efecto de las ondas de choque sobre la muestra, conocido como *squeezing* <sup>[4,5]</sup>, el cual se vuelve relevante al aplicar la misma densidad de impulso desde dos direcciones distintas. Es decir, la interferencia constructiva de los frentes de choque gracias al disparo simultáneo provoca la fuerza suficiente para fragmentar un poco más el objeto sometido al tratamiento.

### 4.3 Conclusiones y perspectivas de mejoras

Después de enfrentarse a los problemas encontrados durante las pruebas preliminares del generador electrohidráulico *tándem*, se comprendió la importancia de los blindajes al trabajar con descargas abruptas de alto voltaje, ya que sin ellos el dispositivo no funcionaba de forma adecuada por la presencia de radiaciones electromagnéticas indeseables.

Se demostró que en cualquiera de los tres tipos de emisiones que puede proveer el generador novedoso (derecha, izquierda o simultánea), se obtienen presiones y densidades de impulso similares a las del generador Mexilit, pero con diferencias significativas en los tiempos FWHM atribuibles a inductancias parásitas. Esto podría convertirse en una ventaja si en uno de los cabezales se reduce dicho efecto y en el otro se refuerza de manera controlada, a fin de que en operación en modo *tándem* el primer pulso se emita “normalmente” y el segundo con mayor duración -después de un retardo óptimo-, según predicciones teóricas recientes al respecto <sup>[18]</sup>.

Las pruebas de fragmentación demostraron que el uso de ondas de choque simultáneas otorga una mayor eficiencia que cualquiera de los otros tipos de ataque utilizados y se ha propuesto que el efecto de *squeezing* podría ser la causa. Sin embargo, serán necesarias más pruebas con ondas de choque simultáneas para determinar la veracidad de este argumento.

En resumen, se demostró el funcionamiento adecuado del nuevo generador de ondas de choque con doble cabezal y su capacidad para realizar distintos tipos de pruebas en el LOCH.

Por último, es importante mencionar que se han adquirido un sinnúmero de habilidades para el desarrollo profesional, tales como el manejo de diversas herramientas de electrónica y de taller mecánico, el diseño de piezas y maquinaria completa, entre otros. Además, la participación en un proyecto de esta magnitud ha resultado en un valioso aprendizaje sobre el desarrollo de nuevas tecnologías para la investigación científica.

En lo referente a perspectivas de mejoras, el generador requiere todavía algo de trabajo para consolidarlo como equipo de trabajo para el LOCH. Varias acciones se requieren para volverlo un sistema independiente del generador Mexilit:

- Proveer al generador de su propia fuente de alto voltaje.
- Reconectar el panel de control.
- Conectar resistencias de descarga a cada banco de capacitores para evitar la rutina de descargar los capacitores de alto voltaje manualmente.
- Fijar el generador de pulsos TTL a la estructura del generador.
- Terminar la colocación de los blindajes/cubiertas externas.
- Construir un posicionador con al menos tres grados de libertad, para colocar y mover adecuadamente las muestras en la tina de pruebas.
- Colocar apuntadores láser en la tina de pruebas para facilitar el centrado de muestras en el punto focal.
- Agregar una bomba de agua al desagüe del generador, para regresar el agua al tanque de reciclado de la misma.
- Construir más bujías (electrodos de descarga) como repuestos.
- Preparar un manual del usuario para quienes necesiten complementar su preparación en el uso el equipo.

## Referencias bibliográficas

1. García-Colín L., Mendoza A., Sandoval A., Santillán A., Soto G., Camacho C., Dehonor M. *Ondas Mecánicas, Notas para el curso de Física Universitaria*. Universidad Iberoamericana, México, 2001.
2. Loske, A. M., *Generación de ondas de choque débiles en agua por rompimiento eléctrico*, Tesis de Maestría, Facultad de Ciencias, UNAM, 1990. Director: Fernando E. Prieto C.
3. In: Ben-Dor G., Elperin T., Igra O. (eds): *Application of shock waves in medicine*. Handbook of Shock Waves. Loske A. M. New York: Academic Press, 2001; 2: 415-440. (ISBN 0-12-086432-2).
4. Loske A. M. *Shock Wave Physics for Urologists*. Ed. Universidad Nacional Autónoma de México, México 2007 (ISBN 978-970-32-4377-8).
5. Loske, A. M. *Medical and Biomedical Applications of Shock Waves*. Shock Wave and High Pressure Phenomena. Springer International Publishing, 2017 (ISBN 978-3-319-47570-7)
6. Loske A. M., Prieto F. E. *Fundamentos Técnicos de Litotripsia Extracorporeal*. Mexico: JGH Editores, 1999 (ISBN 970-681-001-3).
7. De Icaza, M., Renero, C., Prieto, F. E. *Influence of the propellant flow on the performance of diaphragm operated gas guns*, Rev. Sci. Instrum., 62, pp. 431, (1991).
8. Chaussy C., Schmidt E., Jocham D., Brendel W., Forrsman B., Walther V. *First clinical experience with extracorporeally induced destruction of kidney stones by shock waves*. Journal of Urology, 1982; 127: 417-20.

9. Loske, A. M., Prieto F. E., Zavala M. L., Santana A. D., Armenta E. *Repeated application of shock waves as a possible method for food preservation*, Shock Waves (1999), vol.9, pp. 49-55.
10. Prieto, F. E., Loske, A. M., Yarger, F., *An Underwater Shockwave Research Device*, Rev. Sci. Instrum. 62 (7), pp. 1849-1854, Julio 1991.
11. Fernández F., Loske A. M., van Cauwelaert J., Prieto F. E. *Electronic device to improve the efficiency of extracorporeal lithotripters*. Journal of Applied Research and Technology, 2004; 2:170-178
12. Loske, A. M. *Interacción de Ondas de Choque Débiles en Agua con la Materia: Diseño de Electrodo y Reflectores Novedosos para Litotriptores Electrohidráulicos*, Tesis de Doctorado, Instituto de Física, UNAM, 1994. Director: Fernando E. Prieto C.
13. Francisco Fernández, Gilberto Fernández, Achim M. Loske. *The importance of an expansion chamber during standard and tandem extracorporeal shock wave lithotripsy*. Journal of Endourology, 2009; 23: 693-697.
14. Francisco Fernández, Achim M. Loske, Horacio Zendejas, Eduardo Castaño, Miguel Paredes. *Desarrollo de un litotriptor extracorporal más eficiente*. Revista Mexicana de Ingeniería Biomédica 21, 1 (2005), 7-15.
15. Eduardo Fernández Domínguez. *Temporalidad de los fenómenos físicos involucrados en la generación electrohidráulica de ondas de choque*. Tesis de licenciatura en Física, Fac. de Ciencias, UNAM, agosto del 2012. Director: Achim M. Loske Mehling.
16. Cortés, J. G., Fernández, F. *Desarrollo de un generador de ondas de choque tándem de tipo electrohidráulico*. Memorias del XII Coloquio de Tecnología, UNAM, 2014

17. Erik Armando Prieto Serratos. *Diseño y construcción de una fuente de alto voltaje (30 kV) basada en un autotransformador automotriz modificado*. Tesis de licenciatura en Tecnología, CFATA-UNAM, junio del 2012. Director: Francisco Fernández Escobar.

18. Miguel de Icaza Herrera, Francisco Fernández, Achim M. Loske. *Combined short and long-delay tandem shock waves to improve shock wave lithotripsy according to the Gilmore–Akulichev theory*. *Ultrasonics*, 2015; 58: 53-59.

## **APÉNDICE 1**

Reportes bimestrales de servicio social



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
CENTRO DE FÍSICA APLICADA Y TECNOLOGÍA AVANZADA  
LICENCIATURA EN TECNOLOGÍA



Juriquilla Qro., 29 de abril de 2016

**Asunto:** Primer reporte bimestral de servicio social

Coordinador(a) de Servicio Social  
Licenciatura en Tecnología, Centro de Física Aplicada y  
Tecnología Avanzada de la UNAM, campus Juriquilla Qro.  
P r e s e n t e

El suscrito: **José Germán Cortés González**, alumno de la Licenciatura en Tecnología que se imparte en este campus, con número de cuenta **41301399-2**; presenta a Ud. el primer reporte bimestral de actividades correspondientes al programa de Servicio Social: **Tecnologías para investigaciones con ondas de choque**, con clave: **2016-12/7-901**, las cuales fueron desarrolladas del 15 de febrero al 15 de abril del actual y se describen a continuación.

1. Recibí capacitación en el manejo de software para elaborar circuitos impresos, mediante lo cual llevé a cabo la construcción de dos tabletas y el ensamblado de componentes hasta obtener dos fuentes pulsadas de 3 volts, destinadas a alimentar los apuntadores láser del generador de ondas de choque piezoeléctrico del Laboratorio de Ondas de Choque.

2. También fui capacitado en el manejo y medidas de seguridad de la maquinaria del taller mecánico del CFATA (torno, taladro, fresadora, sierra, etc.), con lo cual pude fabricar piezas específicas necesarias a la construcción de un nuevo generador de ondas de choque *tándem* de tipo electrohidráulico. Dichas piezas son las siguientes:

- 15 tornillos de plástico de 8 mm de diámetro por 50 mm de largo, con cuerda de 8-1.25 en los primeros 30 mm de longitud del mismo y cabeza cilíndrica con ranura para destornillador plano de 7 mm de grosor y 12 mm de diámetro (Fig. 1.).
- 2 bases de latón para electrodos de interruptor de chispa con un cabezal cilíndrico de 51 mm de diámetro y 6 mm de espesor, con soporte cilíndrico de 29 mm de largo, 1" de diámetro y cuerda de 1-14. Además se hicieron dos perforaciones con cuerda interior en cada porta-electrodo, una en el soporte cilíndrico a 21 mm de profundidad y cuerda 8-1.25; y la otra en el cabezal a 10 mm de profundidad y con cuerda 4-40 (Fig. 2.).



- 3 cilindros de aluminio con forma de batería AA; es decir, de 12 mm de diámetro, 49 mm de largo y una protuberancia cilíndrica de 6 mm de diámetro y 1.5 mm de profundidad (Fig. 3.).

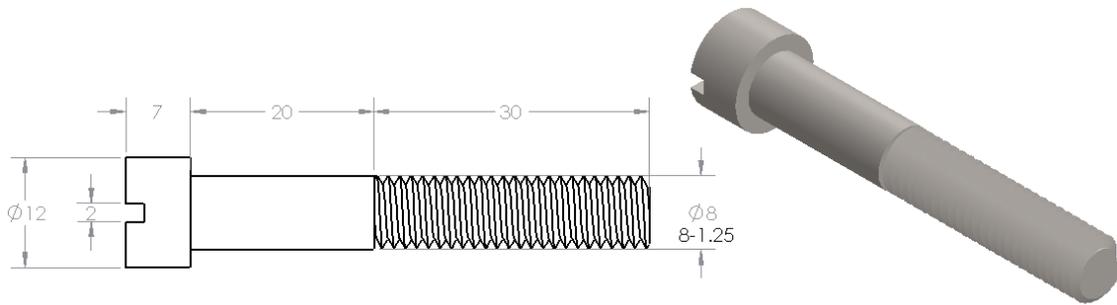


Fig. 1. Plano de los tornillos de plástico. Medidas en mm

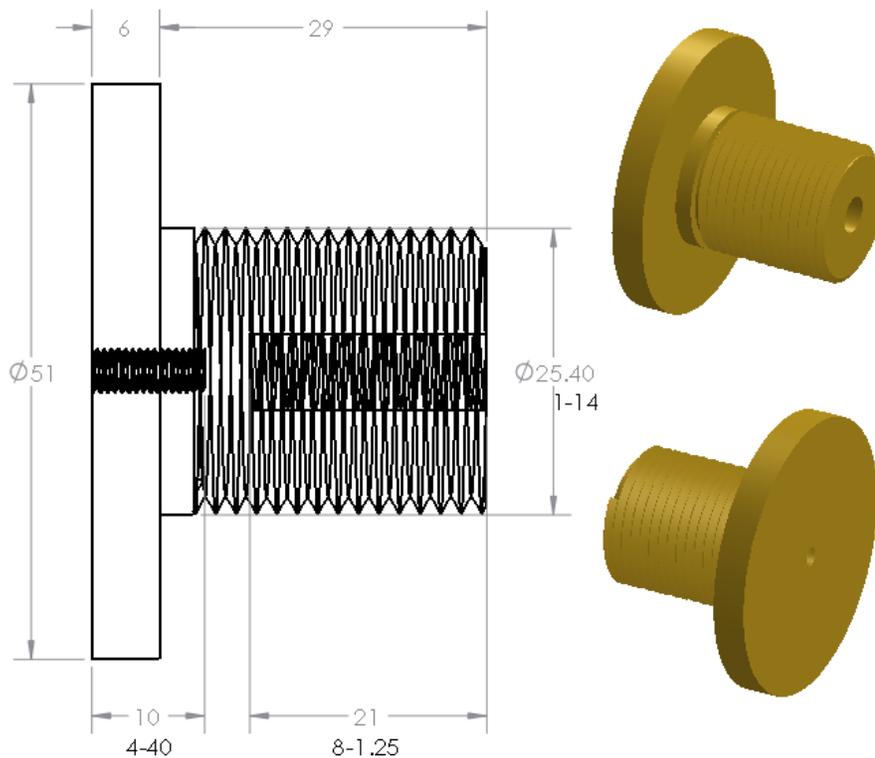


Fig. 2. Plano de la base del porta-electrodo. Medidas en mm.

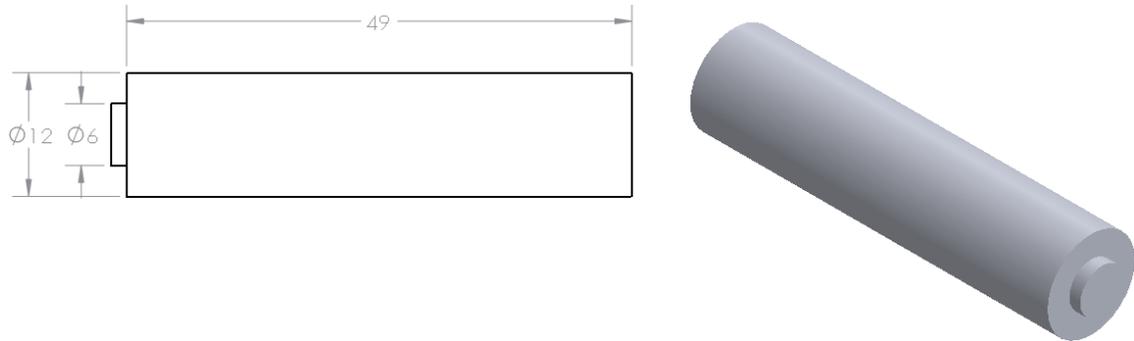


Fig. 3. Plano de los símiles de batería AA. Medidas en mm

- 8 perforaciones radiales en 2 discos de acrílico, cada una con distancia de 8 mm desde el borde del disco y separadas 45° una de otra. Para cuatro de estas perforaciones se requirió adicionalmente cuerda de 5/16-18, mientras que las restantes son solamente agujeros de 5/16".
- 8 perforaciones radiales en un disco de latón de 146 mm de diámetro y 9.5 mm de grosor. Cada perforación con distancia de 8 mm desde el borde del disco, con separación angular de 45° de la siguiente y el diámetro de todas las perforaciones es de 5/16".
- Torneado de 20 modelos artificiales de cálculos renales con forma cilíndrica recta (5 mm de diámetro y 7 mm de longitud), con material de composición estandarizada (High Medical Technologies, Kreuzlingen, Suiza), para pruebas *in vitro* de fragmentación de urolitos.

Atentamente

Vo. Bo.

---

José Germán Cortés González

---

M. en C. Francisco Fernández Escobar  
Responsable del programa y alumnos.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
CENTRO DE FÍSICA APLICADA Y TECNOLOGÍA AVANZADA  
LICENCIATURA EN TECNOLOGÍA



Juriquilla Qro., 23 de agosto del 2016.

**Asunto:** Segundo reporte bimestral de servicio social

Coordinador(a) de Servicio Social,  
Licenciatura en Tecnología, Centro de Física Aplicada y  
Tecnología Avanzada de la UNAM, campus Juriquilla Qro.  
Presente.

El que suscribe: **José Germán Cortés González**, alumno de la Licenciatura en Tecnología que se imparte en este campus, con número de cuenta **41301399-2**; presenta a Ud. el segundo reporte bimestral de actividades correspondientes al programa de Servicio Social: **Tecnologías para investigaciones con ondas de choque**, con clave: **2016-12/7-901**, las cuales fueron desarrolladas del 16 de abril al 15 de junio del actual y se describen a continuación.

1. Recibí capacitación en el manejo y medidas de seguridad de la maquinaria del taller mecánico del CFATA-UNAM (torno, taladro, fresadora, sierra, etc.), para posteriormente llevar a cabo el maquinado de las siguientes piezas, necesarias a la construcción de un nuevo generador de ondas de choque *tándem* de tipo electrohidráulico:

- Dos mordazas de cobre, cada una de ellas formada por dos piezas simétricas con grosor de 9 mm, un área base de 20 x 100 mm y una protuberancia rectangular de 15 x 15 mm redondeada en las esquinas. A cada protuberancia se le rebajó la mitad del grosor y se le hizo un agujero de 5/32" para insertar un tornillo con tuerca de la misma medida y mantener ambas piezas unidas, formando un ensamble rectangular. Una vez terminadas las piezas, se juntaron para perforar un solo agujero de 1" de diámetro en el centro del ensamble (ver figura 1), destinado al acoplamiento del porta-electrodos (bujía) de descarga de alto voltaje en la terminal de tierra. Se perforaron también pequeños agujeros de 5/32" con cuerda de 5/32-32 para insertar un tornillo y un resorte, a fin de graduar la presión y tener auto-liberación de las mordazas.



- Una barra de conexiones a partir de un bloque de cobre de 50 x 100 x 10 mm, al cual se le hicieron varias perforaciones de 1/4" para soldar cables de alta corriente (90 Amperes) necesarios a pruebas previas así como al dispositivo final.
- Un conector para la terminal de alto voltaje de la bujía, a partir de un cilindro de latón de 10 mm de diámetro y 50 mm de altura, al cual se le hizo una perforación de 13/64" de diámetro y 30 mm de profundidad, para acoplar dicha terminal y asegurarla mediante una perforación lateral de 5/32", con cuerda de la misma medida, para insertar un tornillo prisionero. El otro extremo del conector se perforó a 1/4" para soldar un cable de alta corriente (90 A).
- Un banco rectangular de madera, con altura de 22 cm y superficie de 28 x 23 cm, con un agujero central de 55 mm de diámetro en la misma, para colocar la base de la bujía, la bujía y su respectivo reflector (ver figura 2), con el fin de probar los *spark gap's* y bancos de condensadores necesarios al ensamblado final del generador de ondas de choque.

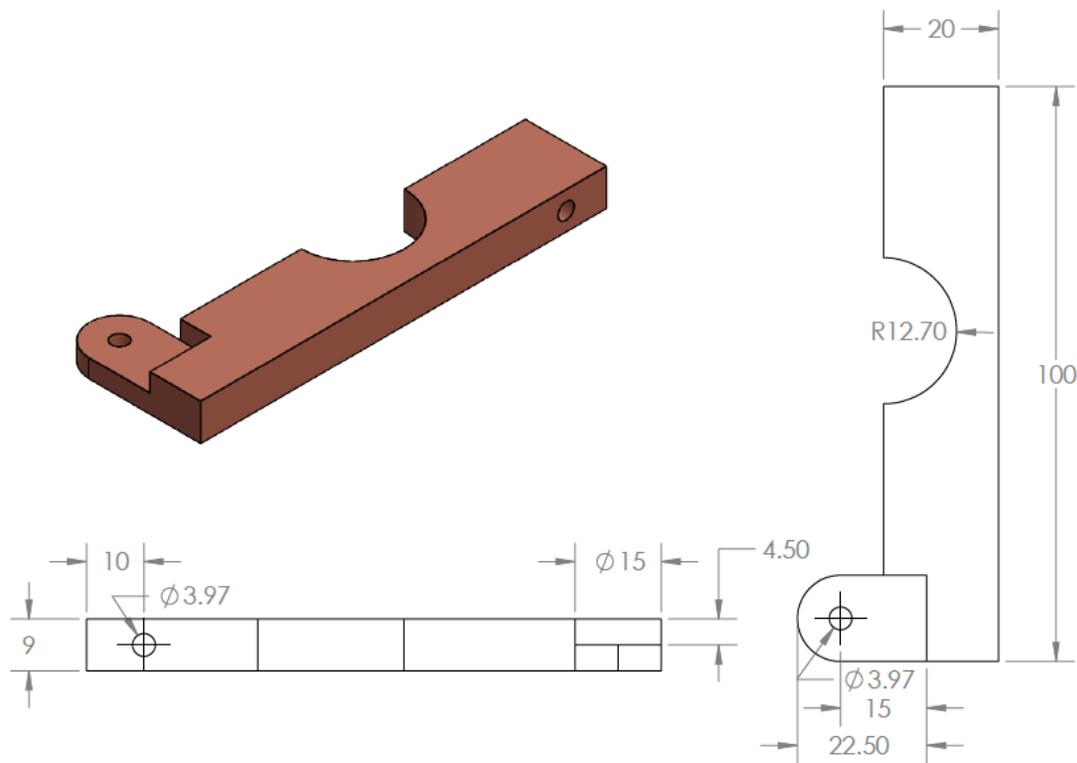
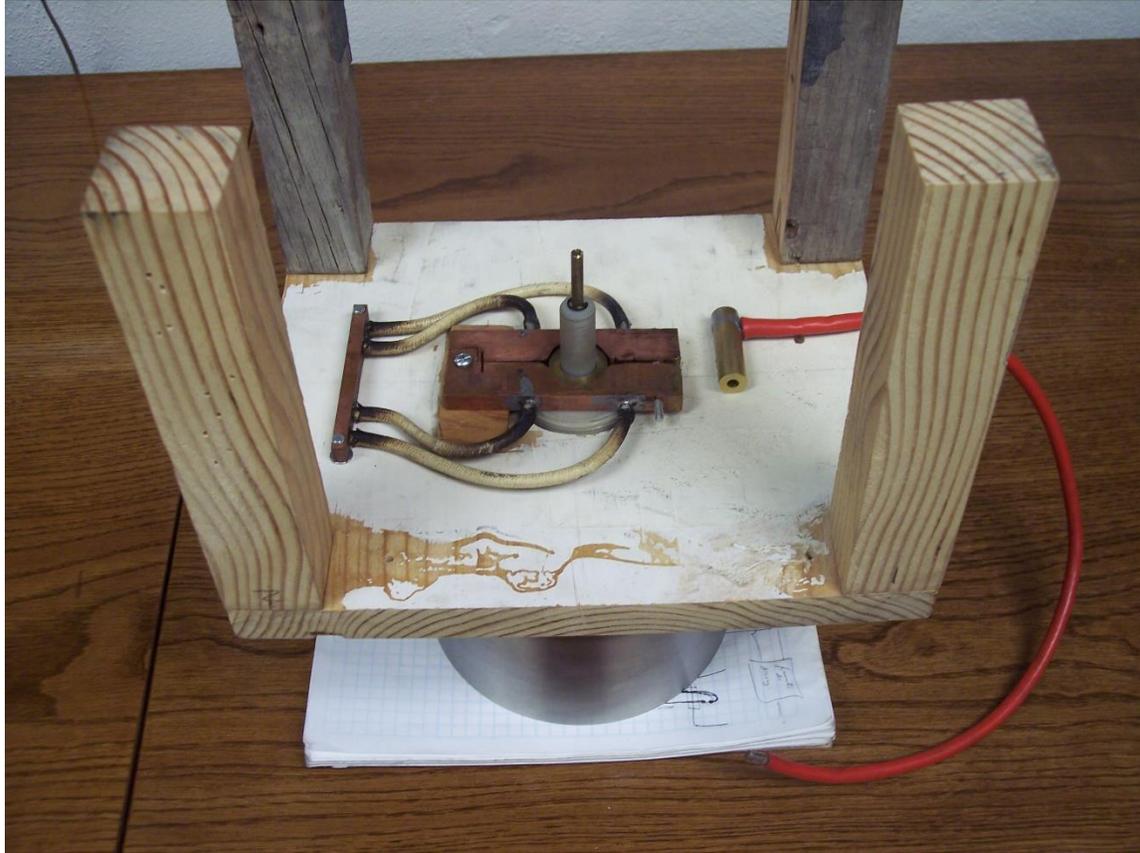


Fig. 1. Plano de una pieza de las mordazas. Medidas en mm.



**Fig. 2. Banco de madera, mordazas y conexiones a la bujía acoplada al reflector, para pruebas previas de descargas de alto voltaje en agua. El banco se muestra invertido para apreciar las partes maquinadas.**

Sin otro particular por el momento, reciba un cordial saludo.

Atentamente

Vo.Bo.

---

José Germán Cortés González

---

M. en C. Francisco Fernández Escobar  
Responsable del programa y alumnos



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
CENTRO DE FÍSICA APLICADA Y TECNOLOGÍA AVANZADA  
LICENCIATURA EN TECNOLOGÍA



Juriquilla Qro., 12 de septiembre del 2016.

**Asunto:** Reporte bimestral de servicio social

Al (a la) responsable de Servicio Social de la Licenciatura en Tecnología,  
Centro de Física Aplicada y Tecnología Avanzada.  
Presente.

El que suscribe: **José Germán Cortés González**, alumno de la Licenciatura en Tecnología que se imparte en este campus, con número de cuenta **41301399-2**; presenta a Ud. el segundo reporte bimestral de actividades correspondientes al programa de Servicio Social: **Tecnologías para investigaciones con ondas de choque**, con clave: **2016-12/7-901**, las cuales fueron desarrolladas del 15 de junio a la fecha y se describen a continuación.

- 1) Muestreo de 75 resistencias de  $10\text{ M}\Omega$ ,  $\frac{1}{2}\text{ W}$ , 5%, para determinar las 60 más adecuada a la construcción de cuatro arreglos resistivos, cada uno con valor de  $150\text{ M}\Omega$ , 7.5 W, 2%, necesarios a la construcción de un nuevo generador de ondas de choque *tándem* de tipo electrohidráulico. Después, cada arreglo fue formado mediante 15 resistencias en serie soldadas para formar una sola línea, además de dos tornillos de  $\frac{1}{8}$ " acoplados en cada extremo para acoplar terminales. Esta estructura se introdujo en tubos de PVC de  $\frac{1}{2}$ " de diámetro y 15 cm de largo (previamente maquinados en torno), para finalmente rellenar el tubo con resina epóxica Epo-200®, lo que evita arcos de alto voltaje indeseables y fija la posición de las resistencias.
- 2) Posteriormente, cada arreglo resistivo tuvo que probarse en condiciones de alto voltaje, para lo cual fue necesaria la construcción del circuito mostrado en la figura 1. El circuito fue calculado de manera que al someter cada arreglo (RX) a 615 volts de c. a. y múltiplos del mismo valor (hasta 2460 Vca), el voltaje a medir en el voltímetro digital ( $V_M$ ), con impedancia de  $10\text{ M}\Omega$  (y en paralelo con las cuatro resistencias de  $1\text{ M}\Omega$  al 1%), resultara lo más cercano a 1.00 Vca y los correspondientes múltiplos: 2, 3 y 4 Vca, todos ellos dentro de un 2% de error. Las pruebas fueron exitosas para los cuatro arreglos construidos, tanto en lo referente a la precisión requerida de su valor óhmico, como en los aspectos de disipación de potencia y aislamiento de alto voltaje.

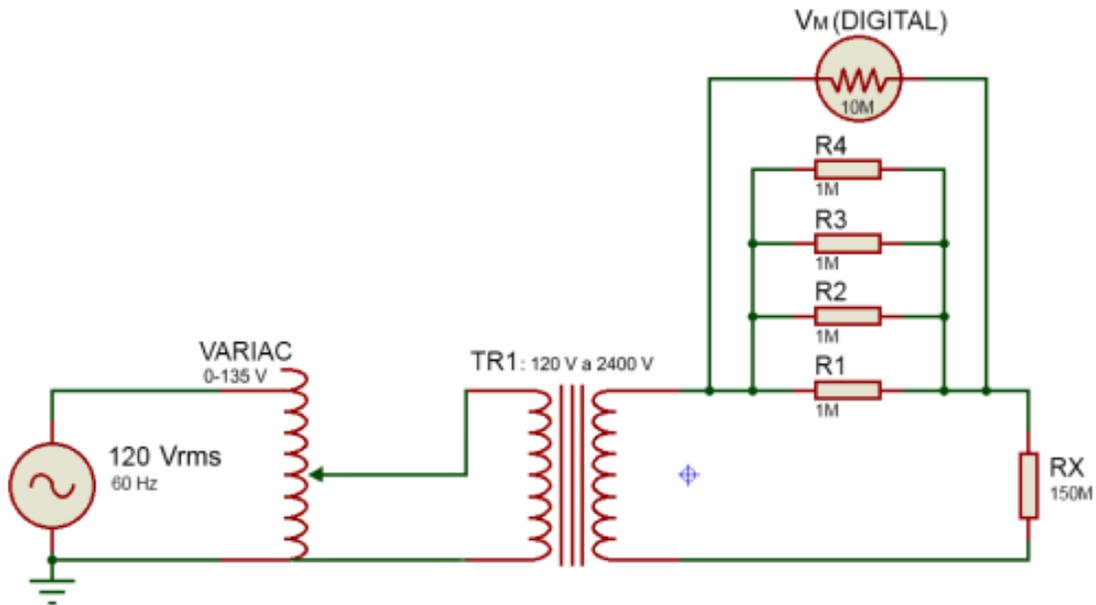


Fig. 1. Circuito de prueba de los arreglos resistivos para alto voltaje

- 3) Debido a mejoras de último momento en el diseño del generador de ondas de choque novedoso, fue necesario construir dos nuevas bases de latón para los electrodos de los interruptores de alto voltaje (“spark-gap”), manteniendo su cabezal cilíndrico de 51 mm de diámetro y 6 mm de grosor, así como su sección longitudinal, también de forma cilíndrica, de 1” de diámetro y con cuerda de 1”-14, pero ahora de 45 mm de largo en lugar de los 29 mm de las primeras versiones. Las perforaciones radiales del cabezal (7/64”) y la central con cuerda (4-40), también se mantuvieron como en las versiones anteriores. Adicionalmente, se maquinaron cuatro tuercas de latón con cuerda de 1”-14 y lados hexagonales de 6 mm de grosor para llave española de 38 mm, así como un soporte de los porta-electrodos, también de latón, destinado a facilitar la colocación de los mismos en dichos interruptores de chispa. En la figura 2 se muestran estas nuevas partes (lado izquierdo), junto con piezas antes maquinadas del “spark-gap”.
- 4) Con las piezas anteriores y otras antes elaboradas, prácticamente se completaron las componentes de las dos unidades de descarga de alto voltaje del generador, por lo que se efectuó el ensamblado de estas últimas, en las que fue necesario fabricar adicionalmente dos conectores para las resistencias de polarización (RX) de cada spark-gap

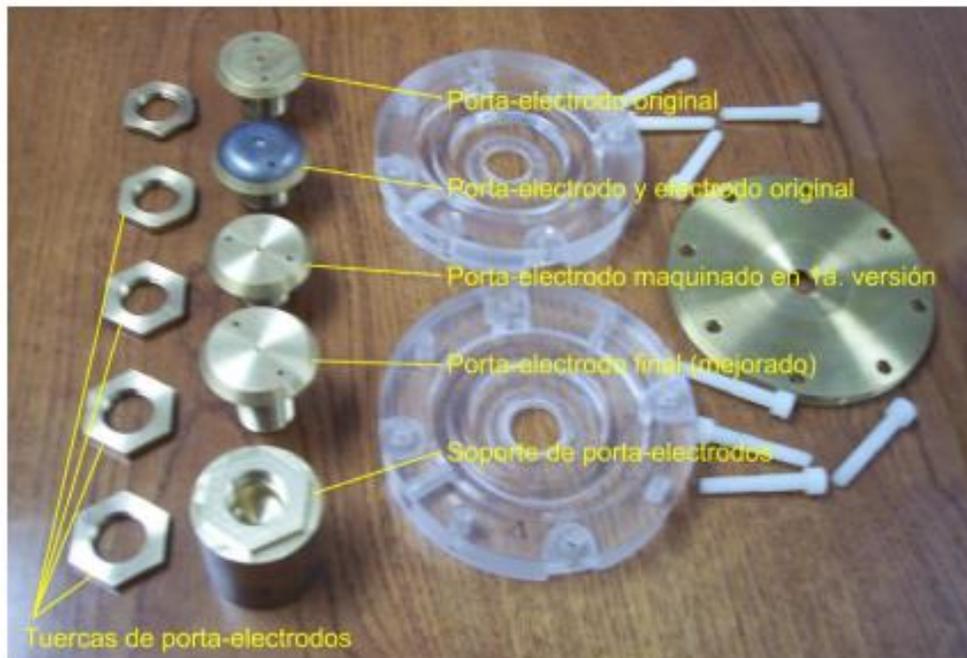


Fig. 2. Nuevos porta-electrodos, tuercas y soporte maquinados

Cada conector consistió en una placa de cobre sobre fibra de vidrio, de 1.0 x 19.5 cm, cubierta por dos placas de acrílico de 5 mm de espesor y área de 2.5 x 22.5 cm, una las cuales fue devastada con la fresadora para contener dicha placa de cobre y con las perforaciones necesarias para el acoplamiento tanto de las resistencias RX, como para el conector capacitivo de la fuente de descarga. En la figura 3 se muestra una de las unidades de descarga de alto voltaje ya ensamblada, en la que se nota dicho conector adicional.

Fig. 3. Unidad de descarga de alto voltaje ensamblada, incluyendo el conector y la polarización del spark-gap. También se muestran (a la derecha) partes del spark-gap de la otra unidad.





- 5) Finalmente, ambas unidades de descarga de alto voltaje fueron exitosamente probadas dentro de sus regímenes de operación; es decir, provocando arcos voltaicos abruptos (15 a 30 kV) entre dos electrodos (bujía) sumergidos agua. Para ello, se desconectaron líneas de seguridad y alimentación de alto voltaje del generador Mexilit II (existente en el Lab. De Ondas de Choque), acoplando extensiones al dispositivo de pruebas montado en el exterior, según se muestra en la figura 4. En las figuras 5-a y 5-b se muestran respectivamente el estado de la bujía antes y durante la descarga de alto voltaje.

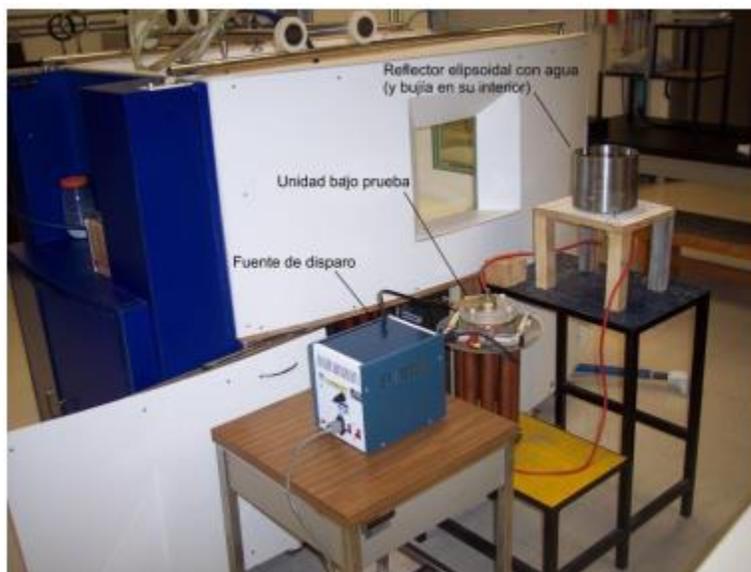


Fig. 4. Acoplamiento de las unidades de descarga de alto voltaje al generador Mexilit II, para prueba de las mismas en sus regímenes de operación.

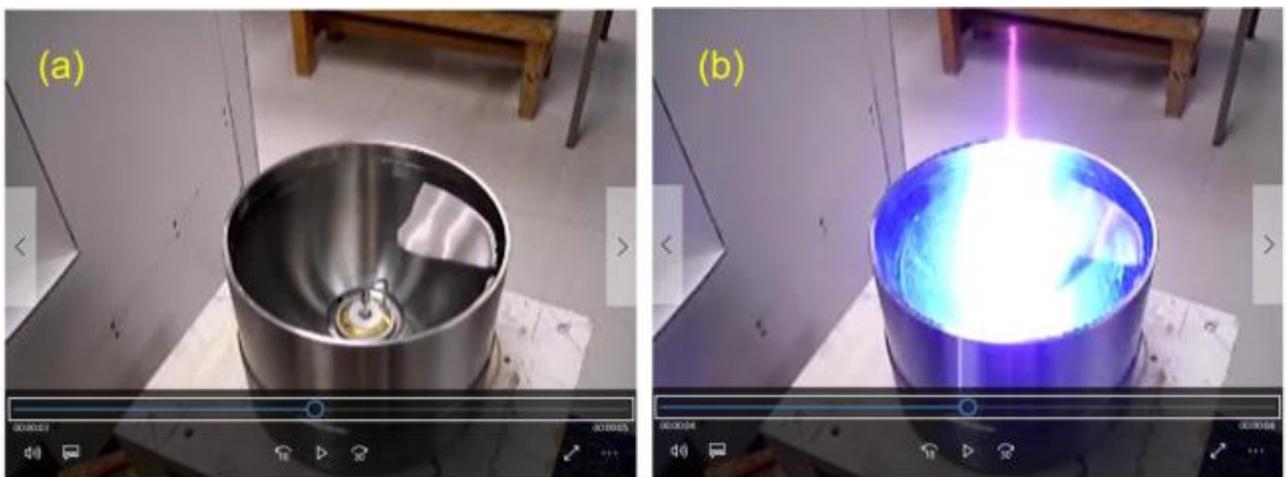


Fig. 5. Estado de la bujía inmersa en agua. (a) Antes de la descarga. (b) Durante la descarga



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
CENTRO DE FÍSICA APLICADA Y TECNOLOGÍA AVANZADA  
LICENCIATURA EN TECNOLOGÍA



Para concluir, cabe mencionar que independientemente de estos reportes se ha dejado en el Laboratorio de Ondas de Choque la bitácora de avances semanales, así como el reporte global de actividades, el cual contiene con mayor detalle todas las actividades realizadas durante la prestación del servicio social. Estas, además de interesantes en el aspecto tecnológico, me motivaron para continuar desarrollando el tema como tesis de licenciatura, donde pretendo realizar las investigaciones y aplicaciones pertinentes a este nuevo tipo de generador de ondas de choque. En breve haré llegar a la administración escolar, dicha propuesta de tesis.

Sin otro particular por el momento, reciba un cordial saludo.

Atentamente

Vo.Bo.

---

José Germán Cortés González  
Prestador del Servicio Social

---

M. en C. Francisco Fernández Escobar  
Responsable del programa y alumnos