



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

TEMPORALIDAD DE LOS FENÓMENOS
FÍSICOS INVOLUCRADOS EN LA
GENERACIÓN ELECTROHIDRÁULICA DE
ONDAS DE CHOQUE

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
F Í S I C O
P R E S E N T A:
EDUARDO FERNÁNDEZ DOMÍNGUEZ



TUTOR

DR. ACHIM MAX LOSKE MEHLING

2012



Universidad Nacional
Autónoma de México



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 padre, Francisco Fernández Escobar,
porque si bien en mi educación he tenido muchos maestros,
él es el más sabio,
es y ha sido mi gran maestro de vida.

A mi madre, Yolanda R. Domínguez García,
porque me ha sabido guiar a lo largo de los años,
y siempre ha estado ahí en los momentos difíciles.

A mis hermanos...

A Francisco, por compartir grandes intereses conmigo, por los videojuegos, la retórica y las historias.

A Gilberto, por su espontaneidad y su chispa en cualquier aspecto de la vida.

A Liliana, porque jamás la he visto dar un paso atrás.

A Cesar, por acompañarme desde el principio en todo el camino, simplemente no había otra forma de terminar lo que empezamos.

A Jimena, mi segundo mejor amigo, por soportar mis desvaríos y compartir otros tantos.

A Nila, por las fiestas y los desvelos, por las pláticas y el apoyo incondicional ante todo.

A Hibraim, por compartir su cultura y sus consejos.

A Carlos, por su determinación ante todo y su confianza.

Y gracias a todos por formar una parte importante de mi vida.

Agradecimientos:

Al Dr. Achim Max Loske Mehling, por su asesoría en la realización de esta tesis y porque lejos de sólo haber sido mi director es un gran compañero de trabajo.

Al M. en C. Francisco Fernández Escobar, por su paciencia y su inigualable forma de trabajar, y por instruirme en cada aspecto de esta tesis.

Al Sr. René Preza Cortéz, jefe del taller mecánico del CFATA, por su instrucción en el uso de maquinaria del taller y por las pláticas extraoficiales.

Agradezco también a mis sinodales:

M. en C. Raúl Wayne Gómez González

Dr. Miguel de Icaza Herrera

Dr. José Roberto Zenit Camacho

Dr. Naser Qureshi

Por sus consejos y observaciones en la realización de este trabajo y por brindarme todo su apoyo para terminarlo cuanto antes.

Finalmente agradezco a DGAPA-UNAM por permitirme llevar a cabo mi tesis mediante el proyecto: IN108410

Índice:

Página:

Introducción. 6

Capítulo I

Ondas mecánicas y frentes de choque.	9
I.1.- Conceptos sobre fenómenos ondulatorios.	9
I.2.- Ondas de choque.	13
I.3.- Reflectores y funcionamiento del generador de tipo electrohidráulico.	23
I.4.- Interacción de las ondas de choque con la materia.	31
I.5.- Presentación del trabajo.	35

Capítulo II

Instrumentos y métodos de la experimentación.	38
II.1.- Cámara de video de alta velocidad.	40
II.2.- Circuito de sincronía.	43
II.3.- Sistema de adquisición de datos.	45
II.4.- Variabilidad de los parámetros de interés (capacidad y voltaje).	46
II.5.- Desgaste de bujías y planeación de la experimentación.	51
II.7.- Implementación del modo tándem en el generador electrohidráulico.	53

Capítulo III

Resultados y discusión.	57
III.1.- Fotogramas de la generación electrohidráulica de un frente de choque.	58
III.2.- Temporalidad en función del voltaje y la capacidad.	63
III.3.- Temporalidad en función de la conductividad eléctrica del agua y consideraciones sobre el desgaste de la bujía del generador.	72

III.4.- Pruebas del sistema tándem en el generador electrohidráulico.	76
Conclusiones.	83
Apéndice I.	86
Bibliografía.	92

Introducción

Se conoce como urolitiasis al padecimiento clínico que consiste en la formación de cálculos en la uretra o los riñones, ocurre cuando cristales poco solubles en la orina quedan atrapados y se acumulan formando piedras que pueden crecer hasta provocar daños y disfunciones al organismo. La litotricia extracorpórea es una técnica médica no invasiva para tratar dicho padecimiento, mediante ondas de choque se puede dar tratamiento a pacientes con cálculos renales y uretrales e incluso biliares, pancreáticos y salivales.

Un generador de ondas de choque mejor conocido como litotritor extracorpóreo (por su aplicación a este tratamiento), genera dichas ondas de choque en agua y fuera del cuerpo, y hace pasar las ondas a través del cuerpo del paciente para concentrar la energía en el cálculo. Cientos de ondas de choque concentradas sobre un cálculo terminan por fragmentarlo en pedazos tan pequeños que pueden ser eliminados del cuerpo por sus propios mecanismos naturales. Desde hace apenas tres décadas que se descubrió dicha técnica, esta ha sido tema de investigación hasta la fecha, incluso a principios de este siglo se desarrolló en la UNAM un innovador sistema llamado *tándem* que mejora la eficiencia de los litotritores en más de un 20%. El éxito de tal sistema radica en el tiempo en que se genera una segunda onda de choque para reforzar un efecto que contribuye parcialmente a la desintegración del cálculo; la cavitación acústica, de la cual se habla en el primer capítulo y que consiste básicamente en la expansión de burbujas disueltas en los fluidos ante el paso del pulso de rarefacción, el cual acompaña y viene detrás del pulso de presión en una onda de choque. Una vez que la onda de choque ha pasado por completo, las burbujas colapsan abruptamente dando origen a microchorros de agua a presión que contribuyen fuertemente a la desintegración del cálculo. La parte clave del sistema *tándem* radica en que el pulso de presión de la segunda onda de choque coincida en lugar y tiempo con el colapso de las burbujas de cavitación.

Si bien la generación de ondas de choque es un proceso sumamente rápido, resulta determinante para fines del sistema *tándem* el tiempo que el litotritor tarda en regresar a sus

condiciones iniciales para generar la segunda onda de choque, así mismo dicho lapso de tiempo depende del principio físico con que el litotritor genera las ondas. Así por ejemplo dicho sistema se ha implementado ya en litotritores piezoeléctricos, los cuales usan cristales del mismo nombre para producir las ondas de choque, estos se deforman comprimiendo el medio a su alrededor ante la presencia de una diferencia potencial eléctrico, la gran ventaja de estos equipos es que el tiempo de reacción de dichos cristales es sumamente rápido en comparación al tiempo en que debe emitirse la segunda onda de choque, permitiendo que esta última se genere en las mismas condiciones que la primera. Otro tipo de litotritor en torno al cual se desarrolla este trabajo, es el electrohidráulico, llamado así debido a que genera las ondas de choque mediante el arco voltaico de una bujía inmersa en agua.

Es motivo de estudio del presente trabajo determinar experimentalmente el tiempo mínimo para generar una segunda onda de choque mediante un litotritor electrohidráulico, en la misma región, con la misma bujía después de haber emitido la primera onda y bajo condiciones similares a esta. Así mismo pretende encontrar la forma de la dependencia de dicho tiempo con las principales variables que dan lugar a la energía que transporta la onda de choque (voltaje y capacidad eléctricas), ya que de poder controlar mediante dichas variables el tiempo en la generación de ondas de choque de este tipo, sería posible ajustarlo a los valores óptimos para operar el litotritor en la modalidad *tándem*.

En el primer capítulo se presenta un marco teórico para dar a conocer mejor las características y propiedades físicas de las ondas de choque que se emplean, así mismo se describe brevemente el funcionamiento de los distintos tipos de litotritores haciendo hincapié en el de tipo electrohidráulico. Se describe el mecanismo mediante el cual este tipo de litotritor genera las ondas de choque en agua y fuera del cuerpo, y cómo es que las concentra hacia el interior del organismo, finalmente se describe a detalle la lógica de operación del sistema *tándem* en un generador piezoeléctrico para comprender mejor su posible adaptación a equipos electrohidráulicos.

En el capítulo consecuente se busca ubicar al lector en la parte experimental de este trabajo, dando a conocer la metodología completa y el planeamiento de los distintos tipos de experimentos, se da una breve pero suficiente explicación del funcionamiento de los instrumentos utilizados y la respectiva justificación de su empleo en esta tesis.

Los resultados encontrados se resumen en el capítulo 3 junto con una amplia discusión de los mismos y de otros factores que se vieron reflejados en dichos resultados, que si bien no se contemplaron previamente, se hicieron presentes en la experimentación afectando notablemente las mediciones. Independientemente de los tiempos medidos se procedió a modificar y operar un litotritor electrohidráulico en el sistema *tándem* para complementar la parte anterior y hallar posibles efectos secundarios, estas mediciones se resumen también al final del tercer capítulo para posteriormente concluir acerca de la posibilidad de implementar exitosamente dicho sistema a los generadores electrohidráulicos.

Capítulo I

Ondas mecánicas y frentes de choque

I.1 Conceptos sobre fenómenos ondulatorios

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 forzosamente requieren de un medio material para su propagación (ya sea sólido, líquido ó gaseoso, e inclusive plasma). En estos casos, las partículas del medio oscilan alrededor de un punto fijo sin desplazarse en la dirección de propagación de la onda y sin transportar la materia que compone el medio. Las ondas electromagnéticas no necesariamente requieren de medio alguno para su propagación, como es el caso de la luz que puede propagarse aún en el vacío interestelar.

También se pueden definir las ondas mecánicas como “las perturbaciones que viajan” de un lugar a otro a través de un medio material, originando una vibración temporal en dicho medio, sin que éste a su vez se transporte de un lugar a otro (sólo vibra). Es un hecho que en los fenómenos ondulatorios, aun cuando no hay transporte de materia, si hay transporte de energía, lo cual se aplica también a las ondas electromagnéticas. En este trabajo, los fenómenos ondulatorios electromagnéticos quedaron fuera del contexto del mismo, por lo que en lo sucesivo todo lo que se menciona de ondas es con referencia a las de tipo mecánico.

Una onda siempre se propaga alejándose de su fuente y se acostumbra considerar fenómenos ondulatorios en una, dos y tres dimensiones del espacio, dependiendo de la complejidad de los mismos. Como ejemplo de una onda en una dimensión se puede mencionar la perturbación en una cuerda tensa que se agita transversalmente, según se muestra en la figura I.1. En la parte inferior de tal figura se ilustra el momento en que la perturbación llega a la pared rígida y la onda se refleja para regresar en la misma dirección, pero en sentido contrario y con fase invertida. Esto último se alude más adelante para explicar algunos efectos de las ondas de choque.

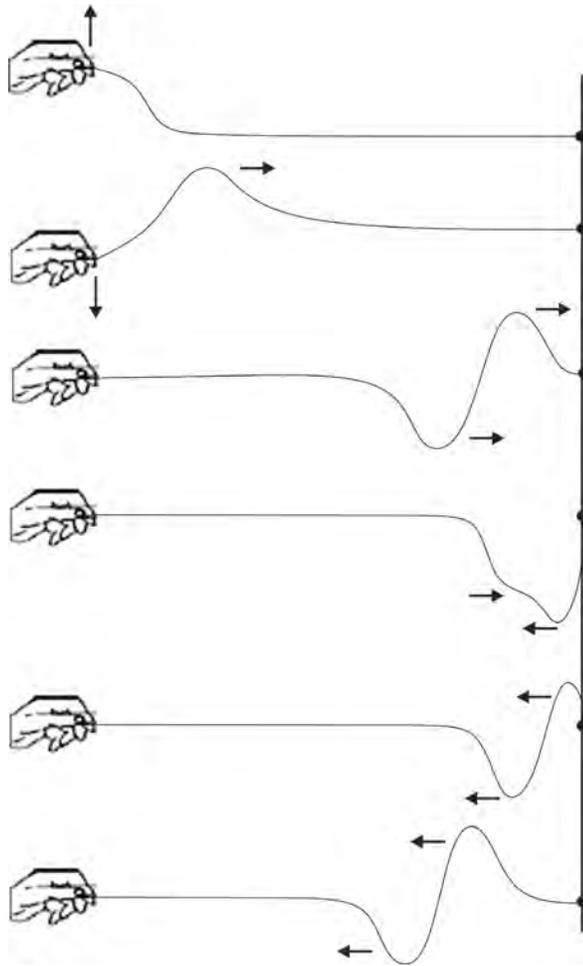


Figura I.1 Onda producida en una cuerda mediante movimientos transversales.

Un ejemplo común de fenómeno ondulatorio en dos dimensiones, es el que ocurre en la superficie de un estanque de agua cuando esta es perturbada por la caída de una piedra (figura I.2). En este ejemplo, similarmente al caso de la cuerda, los desplazamientos oscilatorios de las partículas de la superficie del agua son perpendiculares a dicha superficie y propagan la perturbación alejándola en forma radial del lugar de origen. Cuando la vibración es perpendicular a la dirección de propagación, se dice que la onda es de tipo transversal. Un objeto que flote sobre la superficie del estanque sólo sufre oscilaciones “hacia arriba y hacia abajo” con el paso de las ondas; es decir, no se aleja ni se acerca de la fuente puesto que las ondas no transportan materia consigo. El transporte de energía es lo que hace oscilar a dicho objeto.

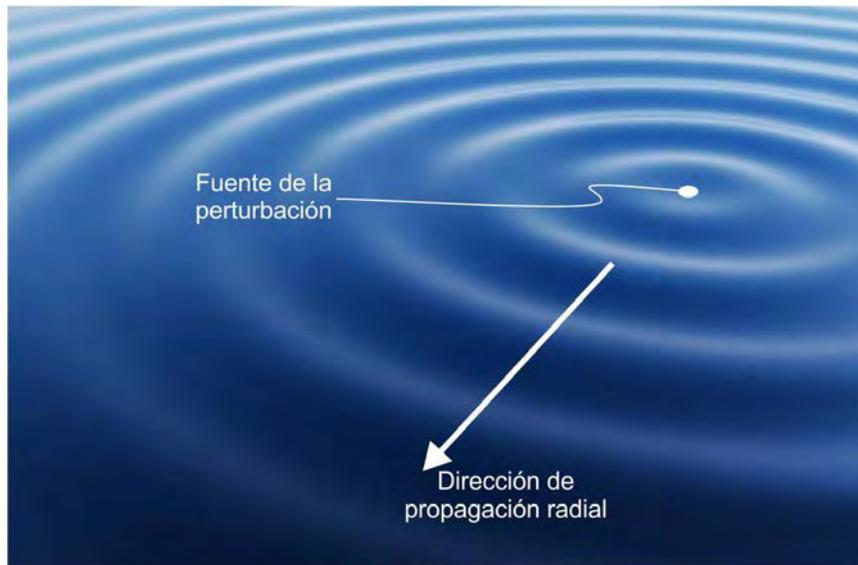


Figura I.2 Ondas transversales en la superficie del agua.

La propagación del sonido en el aire es un ejemplo típico de movimiento ondulatorio en tres dimensiones. Se caracteriza por vibraciones de las partículas del aire a frecuencias específicas (en un intervalo promedio de 20 Hz a 20 kHz), cuyo efecto macroscópico son zonas de compresión y rarefacción en dicho medio. En este caso, a diferencia de los ejemplos anteriores, la dirección de propagación de la onda coincide con la dirección de su movimiento vibratorio, por lo que en estos casos se dice que la onda es de tipo longitudinal.

Las ondas mecánicas longitudinales pueden propagarse a través de medios sólidos, líquidos y gaseosos, pero las transversales sólo pueden propagarse a través de sólidos. Esto es así porque los puntos de una onda transversal oscilan paralelos a un plano, lo cual requiere que el medio ejerza fuerzas paralelas al plano. Un medio sólido puede ejercer tales fuerzas, pero un fluido no.^[1] Por consiguiente, solo las ondas longitudinales -como el sonido- se pueden propagar en medios fluidos como el aire o el agua. Así pues, el caso de las ondas transversales en la superficie del agua es un caso especial, ya que la tensión superficial si bien no es un sólido, presenta cierta rigidez de la que carece el resto del fluido.

La particularidad en las direcciones de propagación de las ondas, es lo que permite considerar a estas como unidimensionales o bidimensionales, ya que estrictamente todo fenómeno físico ocurre en tres dimensiones. Es decir, el considerar fenómenos ondulatorios en una o dos dimensiones, sólo es por simplicidad de su tratamiento o estudio. En el ejemplo de la cuerda, únicamente hay una dirección de propagación y basta un grado de libertad para determinar la posición de cualquier partícula de la cuerda. Para el caso de la superficie del agua, todas las direcciones de propagación se encuentran en el plano de la misma y por ello son necesarios dos grados de libertad para su descripción. Para el sonido en aire o la propagación de un sismo en una región del planeta, se requieren los tres grados de libertad para una descripción adecuada.

Una descripción puramente espacial de dichos fenómenos ondulatorios, obviamente sería incompleta ya que el tiempo transcurre invariablemente en toda la naturaleza. Por ello, toda función de onda depende tanto de la posición como del tiempo. La dependencia temporal permite considerar los muy conocidos parámetros ondulatorios tales como período, frecuencia, frecuencia angular y velocidad de propagación de la onda, además del concepto *frente de onda*. Este último se define como la superficie formada por todos los puntos de una onda, que en determinado instante se encuentran en el mismo estado de movimiento. 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*. El concepto de rayo es útil para tratar la propagación de ondas de cualquier tipo, pues simplifica mucho el entendimiento de fenómenos físicos como la reflexión y la refracción.

En general, cuando las perturbaciones que conforman un frente de onda viajan en una sola dirección, se tiene una onda plana, la cual se caracteriza porque en un determinado instante las condiciones mecánicas del medio son las mismas en todas las partes de un plano cualquiera, perpendicular a la dirección de propagación (ver figura 1.3-a). En el caso de las

ondas esféricas, generadas por una fuente puntual, el movimiento se propaga de forma radial, como se muestra en la figura I.3-b. ^[2]

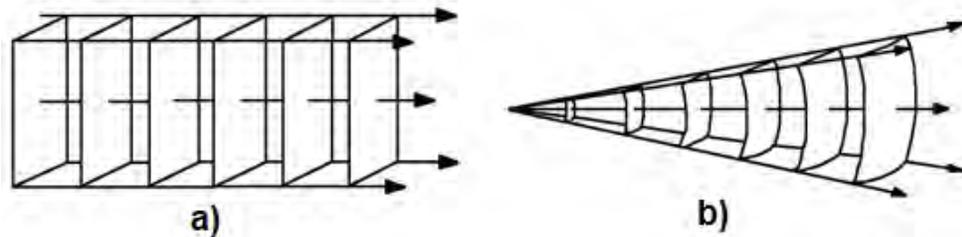


Figura I.3 (a) Onda plana: los rayos son paralelos a la dirección de propagación y perpendiculares a los frentes de onda. (b) Onda esférica: la propagación ocurre en forma radial como lo indican los rayos.

I.2 Ondas de choque

Dentro de la física y particularmente en la mecánica, la expresión “onda de choque”, lejos de aludir fenómenos ondulatorios continuos, realmente se utiliza para definir la propagación de un *frente de choque* en un medio material que puede ser sólido, líquido o gaseoso. La generación de un frente de choque ocurre por un cambio súbito en el estado termodinámico del medio (variación abrupta de temperatura, densidad, presión, etc.).^[3] Un ejemplo al respecto es una explosión, durante la cual se emite una gran cantidad de energía en un tiempo muy corto y un espacio relativamente reducido, ocasionando una compresión abrupta y repentina de las partículas del medio circundante, dejando una región relativamente vacía en las proximidades del punto del estallido debido a que se desplaza el medio a su alrededor. Como este estado no es estable, el medio tiende a recuperarse, mientras la compresión del medio se expande alejándose con velocidad constante, lo que propiamente conforma el frente de choque positivo (P^+). A su vez, el vacío que queda en la región del estallido es llenado rápidamente, ya que el material del medio desplazado regresa a su espacio original, creando ahora una región de descompresión o rarefacción (P^-) en el medio, la cual viaja y se propaga atrás del pulso P^+ .

Este tipo de perturbaciones, aun cuando sus propiedades son diferentes a las de los fenómenos estrictamente ondulatorios (como el ultrasonido usado en imagenología), hasta cierto punto obedecen las mismas 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 la 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. Así, al pasar el frente de choque por un sitio dado, la presión en este medio aumenta repentinamente y después disminuye a valores menores de su nivel inicial, para finalmente regresar al equilibrio. La cantidad de energía propagada por el frente de choque disminuye a medida que este se aleja de la región de generación, ya que el medio material de propagación también va disipando la energía liberada. Si el volumen del medio de propagación es relativamente grande con respecto a la región de generación del frente de choque, la energía transportada por éste terminará por disiparse completamente en el medio a través de la vibración momentánea del mismo y la transferencia de calor.

Por las aplicaciones médicas a las que se enfocó este trabajo, se utiliza el agua como único 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. De esta forma, 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. La contraparte de lo anterior ocurre cuando una onda mecánica atraviesa una interfase entre dos medios de distinta densidad, ya que hay cambios en su velocidad de propagación, en su longitud de onda y en su amplitud. Dicha interfase actúa como una superficie parcialmente reflejante y parcialmente absorbente, de modo que sólo una parte de la energía es transmitida. Si se considera una onda que atraviesa una interfase plana de aire a agua (ver figura I.4-a), la forma de onda se conserva aunque con amplitud atenuada y su velocidad de propagación aumenta notablemente, así mismo la dirección de propagación se desvía según el ángulo de incidencia. Si en lugar de una interfase

plana se tiene una superficie con otra geometría, entonces surgen efectos de distorsión de la onda según sea la forma de la interfase y el ángulo de incidencia, de modo que se puede convertir una onda plana en esférica (figura I.4-b), o viceversa, con la debida interfase. A estos últimos tipos de interfases se les da el nombre de lentes acústicos, los cuales son útiles para modificar el tipo de los frentes de choque, así como su dirección de propagación.

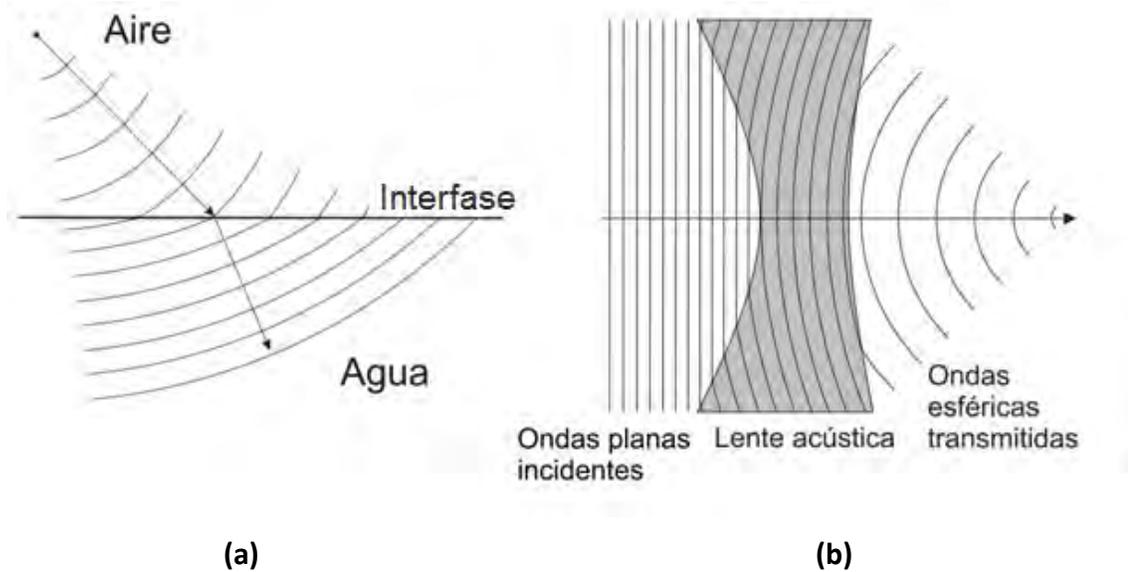


Figura I.4 (a) Onda esférica generada en aire atravesando una interfase de aire a agua. La longitud de onda se acorta y la dirección de propagación cambia. (b) Lente acústica hiperbólica actuando sobre una onda plana: el resultado es una onda esférica cóncava.

Ya se ha demostrado que si se generan frentes de choque en agua, liberando energías relativamente bajas (~ 25 Joules), y estos se concentran en una pequeña región del medio (~ 5 mm³), tal concentración de energía permite obtener presiones “puntuales” muy elevadas (~ 150 Mpa), capaces de pulverizar piedras.^[4] Fuera de la pequeña zona de concentración, la presión es relativamente baja y la energía no tiene efectos destructivos considerables. Esto es análogo a concentrar luz solar con una lupa, mediante lo cual se obtiene mucho calor sólo en el punto de enfoque (capaz de encender un papel). Fuera de éste la temperatura no difiere mucho de la ambiental. En esta analogía la comparación es sólo desde el punto de vista energético, ya que la luz solar es una onda electromagnética y no mecánica.

De acuerdo a lo anterior, entre las múltiples aplicaciones de los frentes de choque se encuentra la *litotricia extracorpórea*, la cual es una técnica médica que por métodos físicos permite remover cálculos renales y vesicales sin necesidad de cirugía.^[5] Se conoce como *litotritador extracorpóreo* al aparato clínico mediante el cual se aplica dicho tratamiento, cuyo funcionamiento básico consiste en generar frentes de choque en agua, fuera del cuerpo, hacerlos pasar por el paciente y concentrar sobre el cálculo la energía liberada. La aplicación de cientos de frentes de choque enfocados sobre el cálculo, crea esfuerzos que terminan por fragmentarlo hasta convertirlo en arenilla que puede ser orinada por el paciente en los días subsecuentes. A la generación y propagación repetida de dichos frentes de choque se le ha llamado “ondas de choque”, porque -entre otros- ello permite asignar periodicidad o frecuencia a tal aplicación. En lo sucesivo se usarán indistintamente los términos “frentes de choque” u “ondas de choque” para referirse a lo mismo.

Los litotritores extracorpóreos, además del sistema de generación y concentración de las ondas de choque, poseen sistemas de imagenología (ultrasonido o fluoroscopia) acoplados a una camilla de tratamiento, para la localización precisa del cálculo, que debe hacerse coincidir con el punto de concentración de las ondas de choque. Un enfoque deficiente no sólo deja al cálculo sin desintegrar, sino que puede causar severos daños a los tejidos circundantes. En el mejor de los casos de un mal enfoque, el cálculo se pulveriza con un número de ondas de choque mucho mayor al necesario (dependiendo del tamaño, localización, etc.), pero con daños considerables a los tejidos circundantes y el consecuente mayor tiempo de recuperación del paciente. Por ello, los litotritores clínicos también cuentan con sistemas motorizados para el movimiento, ya sea del generador y concentrador de las ondas de choque con respecto al paciente, o bien camilla y paciente se pueden ubicar con respecto al punto de concentración de las ondas de choque. En ambos casos, los desplazamientos son al menos en tres grados de libertad (X, Y, Z) y con resolución de décimas de milímetro.

Hay varios tipos de litotritores extracorpóreos, dependiendo de las formas en que se generan y concentran las ondas de choque. A continuación se da una breve descripción de los

métodos de generación más conocidos y posteriormente se describe con mayor detalle el generador de tipo electrohidráulico, que fue el utilizado en este trabajo.

I.2.1 Generación con microexplosivos

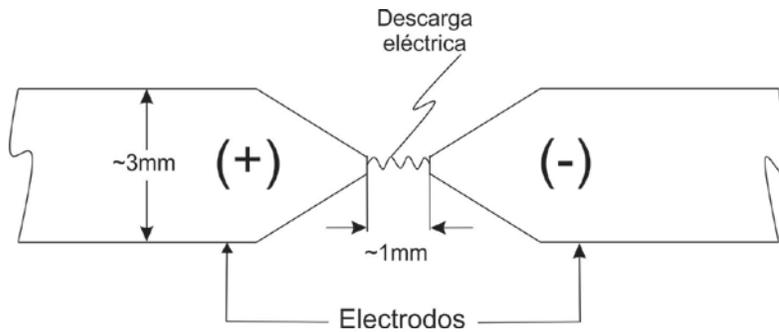
Este método básicamente consiste en detonar en agua una pequeña carga explosiva (10 mg de ázida de plata), de apenas unos cuantos milímetros de diámetro. La explosión aumenta abruptamente la temperatura, por lo que el volumen de agua en esa región se evapora “al instante” generando una pequeña burbuja de plasma que al expandirse de forma tan precipitada comprime el agua a sus alrededores y crea un pulso de presión que propiamente conforma el frente de choque.

En los inicios de la litotricia extracorpórea, esta carga se encontraba fuera del paciente, sumergida en agua dentro de un reflector especial (que se describe posteriormente) para dirigir y concentrar el frente de choque en un punto específico del espacio donde estaba situado el cálculo a desintegrar. Cada carga explosiva se colocaba sobre la punta de un tubo metálico de 3 mm de diámetro por 300 mm de largo y era detonada eléctricamente por medio de un sistema de ignición de chispa que operaba con 30 volts. Este sistema tuvo costos de construcción y operación muy bajos, pero era sumamente ruidoso y con la gran desventaja de tener que reemplazar la carga explosiva después de cada frente de choque generado. Para un tratamiento se requerían varios cientos de microexplosivos, haciendo de este tipo de generador un sistema poco práctico por tener que almacenar grandes cantidades de microexplosivos, lo que ocasionó que este método no tuviera aceptación en aplicaciones clínicas.^[5]

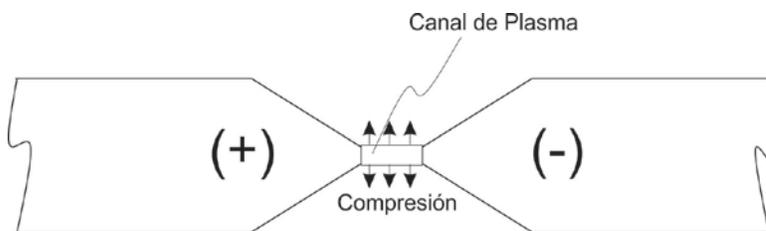
I.2.2 Generación con descargas eléctricas

Fue el primer método usado clínicamente en la generación de frentes de choque para la litotricia extracorpórea, también denominado método electrohidráulico. Consiste en la descarga eléctrica y abrupta de alto voltaje entre dos terminales metálicas denominadas electrodos, que se encuentran inmersas en agua (ver figura I.5-a). La energía eléctrica descargada entre los electrodos es tal que se forma un pequeño canal de plasma entre ellos (figura I.5-b).

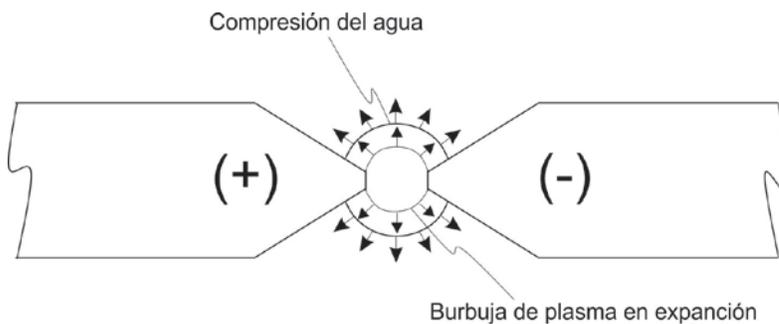
Posteriormente el canal de plasma se expande tanto que se convierte en una burbuja esférica de plasma que se sigue expandiendo, comprimiendo el agua circundante (figura 1.5-c).



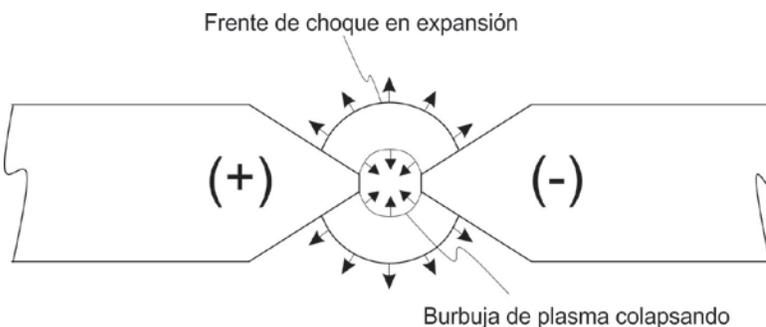
(a) Descarga eléctrica entre dos electrodos debido a una alta diferencia de potencial entre los mismos.



(b) Se crea un canal de plasma que se expande súbitamente y comprime el agua circundante.



(c) El canal de plasma se convierte en una burbuja esférica que se sigue expandiendo comprimiendo el agua circundante.



(d) La burbuja de plasma pierde velocidad y se desprende del frente de choque. Posteriormente la burbuja colapsa y el frente de choque continúa expandiéndose.

Figura 1.15 Secuencia (a, b, c y d) de la generación de un frente de choque por el método electrohidráulico.

La compresión del agua tan súbita es lo que conforma propiamente un frente de choque esférico, el cual se propaga alejándose del punto de la descarga con una velocidad ligeramente mayor a la velocidad del sonido en agua (1500 m/s).^[5] Llega un momento en que la burbuja de plasma pierde velocidad de expansión hasta que se despega del frente de choque y posteriormente colapsa.

Al inicio de la descarga se produce un rápido incremento en la diferencia de potencial entre los electrodos, debido a la resistencia eléctrica del agua entre los mismos y fluye una pequeña corriente entre los electrodos, que forma un canal de plasma de fracciones de milímetros. Este canal de agua ionizada baja la resistencia entre los electrodos permitiendo que fluya una corriente eléctrica cada vez más grande, lo que provoca que el canal de plasma se expanda rápidamente y con gran fuerza. La densidad de partículas dentro del canal es sumamente elevada, su valor es equivalente a un 10 % de la densidad en un sólido y las fuerzas entre dichas partículas en ese instante son elevadas. La pared del canal de plasma no es una interfase gas-líquido, más bien se trata de una región de transición con cierto espesor muy pequeño, en la cual las características físicas varían en forma continua desde agua líquida a temperatura ambiente hasta plasma a varios miles de grados Celsius.

Este método, al igual que el de microexplosivos, usa reflectores especiales (elipsoides de revolución) para concentrar los frentes de choque sobre un punto o foco donde debe estar situado el cálculo. La presión en el punto de máxima concentración usualmente tiene valores entre 300 y 1500 bars (30 y 150 Mpa). Al igual que en los demás generadores, la producción de frentes de choque se realiza centenares de veces por tratamiento. Las principales ventajas de este generador son su bajo costo de producción, su diseño relativamente sencillo así como el hecho de que genera un frente de choque con un tiempo de ascenso sumamente corto (nanosegundos). Entre sus desventajas está el desgaste que sufren los electrodos, los cuales tienen que ser reemplazados después de unos cuantos miles de descargas. Su principal desventaja es la gran variación de presión (~35%) entre un frente de choque y otro. El perfil de

presión (variación de la presión respecto al tiempo) de un frente de choque generado con este método, o con el microexplosivo, es como el que se muestra en la figura I.6.^[5]

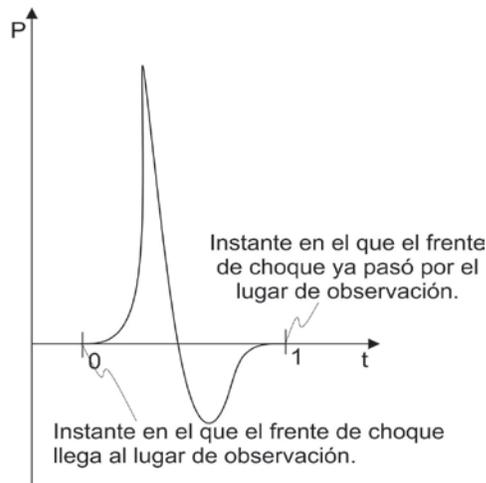


Figura I.6 Perfil del pulso de presión de un frente de choque generado ya sea por el método electrohidráulico o el microexplosivo.

I.2.3 Generación con sistemas electromagnéticos

La forma en que los frentes de choque son producidos con este método, es similar a la producción de sonido con una bocina. Al hacer pasar corriente por un electroimán, este genera un campo magnético muy intenso que repele una membrana metálica plana y altamente conductora. Como el electroimán está fijo, la membrana se desplaza súbitamente alejándose del electroimán cada vez que se hace pasar un pulso eléctrico por la bobina del mismo. Una vez que deja de pasar corriente por la bobina desaparecen los campos magnéticos y la membrana regresa a su posición original. Así como la membrana de una bocina comprime el aire delante de ella para producir las ondas sonoras, la membrana metálica del generador comprime el agua produciendo un frente de choque plano. Una lente acústica bicóncava hecha de poliestireno concentra el frente de choque sobre el blanco, según se muestra en la figura I.7. Otros generadores del mismo tipo implementan una bobina cilíndrica produciendo una onda de choque con la misma simetría, al reflejarse la onda en una superficie parabólica se transforma en esférica. Un tercer tipo de generador electromagnético ni siquiera usa lente acústica, se llama de auto-enfoque porque usa una bobina en espiral montada sobre un cascarón esférico

que análogamente al generador piezoeléctrico genera la onda de choque ya con simetría esférica.^[4]

El perfil del pulso de presión que producen estos generadores es altamente reproducible, comparado con el de tipo electrohidráulico. Las variaciones en el pico de presión, entre una descarga y otra, son de 1% aproximadamente.

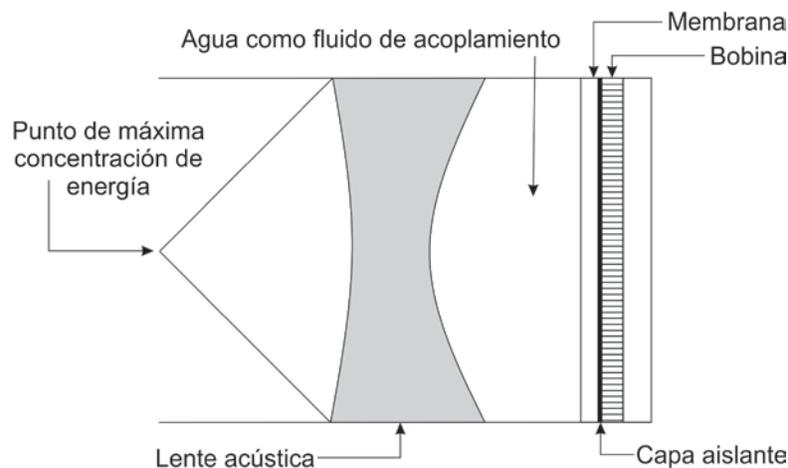


Figura I.7: Generador de frentes de choque del tipo electromagnético.

Su principal desventaja para aplicaciones clínicas es que la componente de rarefacción del frente de choque es relativamente grande (aproximadamente el doble de un frente de choque generado electrohidráulicamente), ya que se ha comprobado que una componente de rarefacción elevada puede provocar lesiones en el tejido del paciente. Otra desventaja es que el tiempo de ascenso del pulso de presión que genera es relativamente lento.^[5]

I.2.4 Generación con cristales piezoeléctricos

El método piezoeléctrico, como su nombre lo indica, funciona en base a propiedades físicas de los cristales piezoeléctricos, que son materiales de cerámica policristalinos capaces de convertir la energía mecánica en energía eléctrica, lo cual se conoce como el efecto piezoeléctrico. Entre las aplicaciones más conocidas de este efecto, para cambios abruptos de

presión, están los encendedores de estufas como el mostrado en la figura I.8. Este tipo de utensilio, además del gas comburente, posee en su interior una especie de martillo pequeño y un cristal piezoeléctrico (mostrado superpuesto en la figura) cuyos cables sujetos en sus extremos van conectados a dos electrodos ubicados en la punta del encendedor, los cuales están separados alrededor de 3 mm. Cuando se libera el gas, el martillo es accionado y golpea al cristal piezoeléctrico produciéndose un voltaje momentáneo de aproximadamente 4 kV (a muy baja corriente), que da por resultado el arco voltaico (chispa) que enciende el gas.

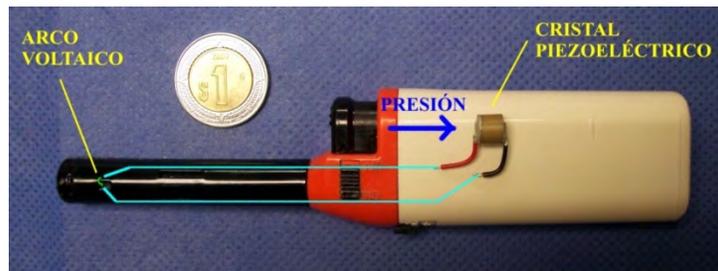


Figura I.8: Un encendedor de estufa usa un cristal piezoeléctrico para generar una chispa que enciende el gas. (La moneda es una referencia de escala.)

Dicho efecto es reversible, ya que estos cristales son capaces de cambiar su tamaño al aplicarles una diferencia de potencial entre sus extremos. De este modo, un cristal puede comprimir el medio a su alrededor creando una compresión local del medio. En los generadores de este tipo, se monta un arreglo de cientos o miles de cristales piezoeléctricos, todos de la misma forma y dimensiones, sobre una superficie esférica cóncava. Al conectar en paralelo todos los cristales a una fuente de alto voltaje, se les puede suministrar un pulso eléctrico simultáneo para deformar todos los cristales al mismo tiempo produciendo miles de impulsos individuales que al acercarse al foco se superponen y forman un solo frente de choque. Dichos cristales están colocados sobre una superficie esférica y dispuestos de manera radial, es decir que una de sus dimensiones (por lo general la más larga) coincide con la dirección en que se propagará la onda y es a lo largo de esta dirección que se les aplica la diferencia de potencial, así pues cada impulso individual es dirigido al centro de la esfera, y en conjunto se tiene un frente de choque esférico que converge el centro de la misma (figura I.9).

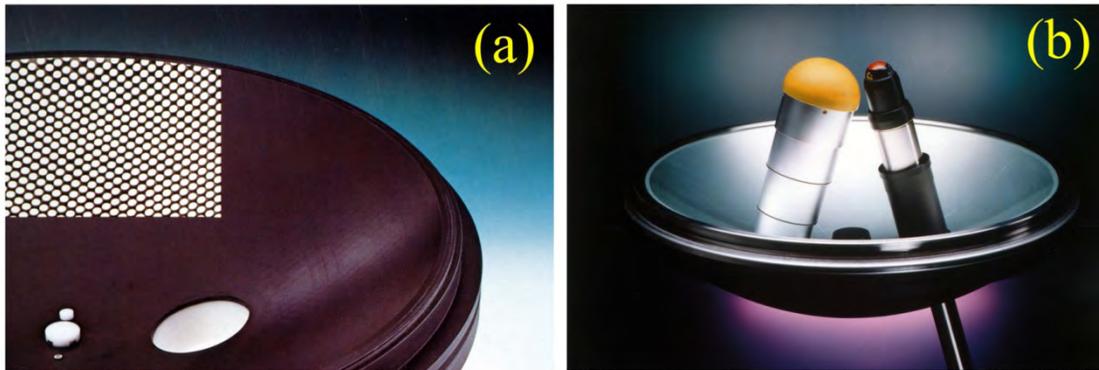


Figura 1.9 Generador de ondas de choque piezoeléctrico de un litotritor marca Richard Wolf GmbH, modelo Piezolith 2500. (a) Montaje de cristales y polímero aislante. (b) Dispositivo completo, incluyendo sistemas de monitoreo (izquierda: rayos X; derecha: ultrasonido). (Fotos de catálogo).

En los litotritores clínicos de este tipo, como el mostrado en la figura anterior, existen en el mismo cascarón esférico dos brazos con sistemas de ultrasonido y fluoroscopia para vigilar en todo momento el área de enfoque en el interior del cuerpo humano. Este sistema fue desarrollado en Alemania en la década de los 80 y surgió como alternativa para los sistemas electrohidráulico y electromagnético. Entre sus ventajas está el bajo desgaste de sus componentes, lo cual reduce los gastos de operación. Debido a que el tiempo de respuesta de los cristales es sumamente rápido, la frecuencia de las descargas puede ser muy alta (hasta 100 veces por segundo) y se puede aplicar un gran número de frentes de choque en un tiempo muy corto, aunque en un tratamiento no se usa a frecuencias tan altas debido a que aparecen algunos efectos que reducen su eficiencia.^[5]

I.3 Reflectores y funcionamiento del generador de tipo electrohidráulico

En las formas de generación de ondas de choque antes descritas, se puede notar que el sistema piezoeléctrico es de auto-enfoque, es decir, por su diseño no requiere de lentes o reflectores a fin de producir las altas presiones puntuales capaces de desintegrar cálculos. En aquellos sistemas electromagnéticos que no son de auto-enfoque se requieren de lentes acústicas o de reflectores para dicha concentración y en los generadores por descargas eléctricas o mediante microexplosivos (que producen frentes de choque esféricos divergentes)

se mencionó la necesidad de reflectores especiales para la concentración deseada, sin embargo, no se describieron. Por ello, en esta sección se describen tales reflectores, así como el funcionamiento más detallado del generador de tipo electrohidráulico, que fue el utilizado en este trabajo.

Tales generadores, al igual que los de microexplosivos, se consideran “puntuales” porque provocan una perturbación en el medio en una región tan pequeña que se puede aproximar como un punto matemático. La realidad no es así, ya que para el caso del generador electrohidráulico -como se describe en la sección 1.2.2- la perturbación del medio se da por la descarga eléctrica entre los electrodos que es una trayectoria en 3 dimensiones, que en escala milimétrica no se asemeja a un punto. En el caso del microexplosivo, la explosión no parte de un punto sino de una región delimitada físicamente por las dimensiones de la carga explosiva. Además, una descarga eléctrica entre dos electrodos nunca es igual a la anterior y tampoco se puede predecir fácilmente hacia qué lado detonará con mayor fuerza un cartucho explosivo, de modo que ambos fenómenos no son estrictamente puntuales. A pesar de lo anterior, la aproximación puntual es válida ya que al expandirse los frentes de choque generados, resultan despreciables las dimensiones del cartucho o de la trayectoria de la descarga eléctrica, comparados con las dimensiones del propio frente. El mayor inconveniente que se tiene en tal aproximación es que, al concentrar el frente de choque, no se puede enfocar con certeza en una región más pequeña de la que se originó. Aun así no existe mucho problema, pues los cálculos a desintegrar por esta técnica generalmente abarcan zonas de más de 3 mm^3 , que es el volumen máximo de un sólido para que pueda ser orinado naturalmente, según los urólogos.

Una perturbación puntual del medio genera en un frente de choque con simetría esférica, que se expande radialmente hacia afuera y aunque gran parte de la energía se pierde en forma de radiación, buena parte de la energía se invierte en generar el frente y se disipa conforme se expande en razón inversa del cuadrado de la distancia. Es decir, mientras más se expande el frente de choque, se vuelve menos energético. Un frente de choque generado con un litotritor electrohidráulico y sin concentrar puede atravesar tejido vivo sin causar mayor

daño que una vibración moderada. Lo anterior es ventajoso al introducir el frente de choque al cuerpo del paciente, pues se desea que el daño incida sobre el cálculo sin afectar el tejido circundante. Así pues el frente de choque se genera fuera del cuerpo y mediante reflectores elipsoidales de revolución se refleja buena parte del frente para ser concentrado en el punto donde se debe ubicar el cálculo a desintegrar. Las dimensiones internas del reflector son suficientemente grandes para permitir que el frente se expanda lo necesario para causar un daño mínimo (reversible) al tejido en el momento en que entra al cuerpo del paciente.

I.3.1 Reflexión de frentes de choque mediante elipsoides de revolución truncados

Como es bien sabido, la ecuación cartesiana de una elipse centrada en el origen es:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1 \quad \text{con la condición} \quad a^2 = b^2 + c^2 \quad \dots\dots (I.1)$$

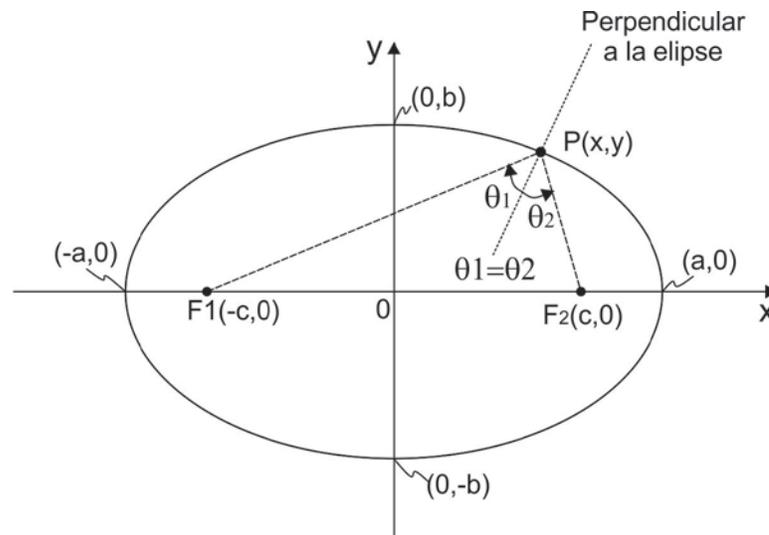


Figura I.10: Diagrama de una elipse en coordenadas cartesianas.

Una característica muy importante de la elipse es la excentricidad, que se define como la razón entre la distancia del origen a un foco y la distancia del origen a un vértice:

$$e = \frac{c}{a} = \frac{1}{a} \sqrt{a^2 - b^2} \quad \dots\dots (1.2)$$

En la ecuación anterior, si $e=0$ (es decir $c=0$), ambos focos coinciden en el centro de la elipse y se trata de un círculo. En cambio si $e=1$ (o sea si $c=a$), entonces los focos coinciden con los vértices y la elipse se transforma en un segmento de línea recta. Debido a que “ c ” no puede ser mayor que “ a ”, la excentricidad únicamente puede tomar valores entre cero y uno. Una elipse con una excentricidad cercana a cero será más redonda y con los focos más cercanos entre sí, mientras que una elipse con excentricidad cercana a uno será más alargada y con los focos más distanciados.^[5] Dicha excentricidad es importante al construir un reflector de frentes de choque y de hecho existe un intervalo limitado de valores con los que se construyen para la aplicación en la litotricia extracorpórea.

Un rayo que se emite de uno de los focos de la elipse -llámese foco 1 (F1)- viaja en línea recta, en una sola dirección, hasta incidir en la superficie interna de la elipse, donde se refleja. Por la ley de Snell, el ángulo del rayo reflejado es igual al ángulo del rayo incidente, medidos a partir de la perpendicular a la elipse en el punto de incidencia. La geometría de la elipse es tal que todo rayo que parta del foco 1 (F1) es reflejado por la elipse para incidir en el foco 2 (F2) y viceversa. Para el caso de ondas mecánicas en dos dimensiones ocurre lo mismo, ya que según lo descrito en la sección I.1, una onda viajando en una dirección puede ser tratada como un rayo para fines de propagación. Si se genera una onda en F1 mediante cualquier fuente puntual, esta se expande a velocidad constante en todas direcciones hasta la superficie interna de la elipse y todos los rayos son reflejados para llegar al mismo tiempo a F2. En otras palabras, una onda circular generada en un punto puede viajar cierta distancia y luego volver a ser concentrada en otro punto distinto y alejado del punto fuente. Este es el principio de la concentración de los frentes de choque usados en la litotricia extracorpórea, aunque en lugar de ondas circulares reflejadas en una elipse, se trata de frentes de choque esféricos que se reflejan en una superficie en 3 dimensiones llamada elipsoide de revolución, según se muestra en la figura I.11.

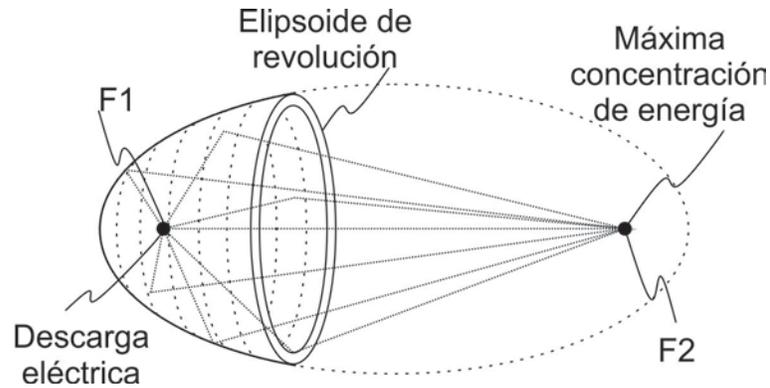


Figura I.11: Elipsoide de revolución truncado como concentrador de los frentes de choque aplicados a la litotricia extracorpórea.

Cuando una figura plana gira alrededor de una recta del plano se genera una superficie de revolución. Llamamos “elipsoide de revolución” a la superficie obtenida al girar una elipse alrededor de su eje mayor, las dimensiones originales de la elipse y todas sus propiedades se extrapolan a las del elipsoide. Un frente de choque esférico que se genere en el foco F1 del elipsoide de revolución se expande en todas direcciones a velocidad constante. Al llegar a la superficie interna del elipsoide es reflejado hacia F2, en donde idealmente se concentra toda la energía invertida en la generación. En la práctica, siempre hay pérdidas de energía las cuales se pueden agrupar en dos grupos:

El primero y más relevante es el que corresponde a la disipación en forma de calor y luz. Para el caso de un litotritor electrohidráulico, sólo entre el 2% y 5% de la energía liberada se emplea en suministrar energía cinética a las moléculas de agua para crear propiamente el frente de compresión; es decir, un 95% a 98% se pierde en forma de luz y calor.^[5] El segundo grupo de pérdidas de energía está conectado con el hecho de que el reflector elipsoidal no es una superficie cerrada sino un elipsoide truncado, ya que el foco F2 debe coincidir con el cálculo renal dentro del paciente. Sólo un porcentaje del frente de choque será reflejado y por consiguiente concentrado en el punto focal F2, mientras el resto se expande y disipa su energía en el medio acuoso.

Por otra parte, la distancia entre los focos del elipsoide es la misma que debe existir entre el foco F1 y el cálculo del paciente, y debe ser tal que en ella queden comprendidas dos distancias; la del cálculo a la piel del paciente y la longitud de F1 a la piel. Aquí también debe tomarse en cuenta el elemento de acoplamiento entre el reflector y el paciente. Como ya se ha mencionado, el frente de choque debe ser generado en agua para acoplar los medios en los que viaja la onda. Antiguamente se sumergía al paciente en una tina con agua junto con el conjunto de electrodos y reflector, lo que resultaba incómodo durante el tratamiento. Actualmente se recubre el reflector con un capuchón de hule y se llena con agua el interior. El capuchón, a través de un gel de acoplamiento, es el que está en contacto con la piel del paciente, asegurando con ello que el frente de choque viaje prácticamente por medios acuosos.

I.3.2 Funcionamiento del generador de ondas de choque electrohidráulico

Como se mencionó en la sección I.2.2, los frentes de choque electrohidráulicos se forman mediante la súbita compresión del medio producida por una descarga eléctrica, que debe ser bien controlada. Para ello se emplea el circuito eléctrico mostrado en la figura I.12, de manera que la fuente de alto voltaje carga lentamente (~ 0.5 seg) el capacitor C (80 nF), a través de la resistencia R (3.3 M Ω), hasta una diferencia de potencial entre 15 y 30 kV. Con esto se conoce la energía (E) a liberar en cada descarga, según la expresión siguiente^[6], donde V es el voltaje preestablecido.

$$E = \frac{1}{2} CV^2 \quad \dots \dots (I.3)$$

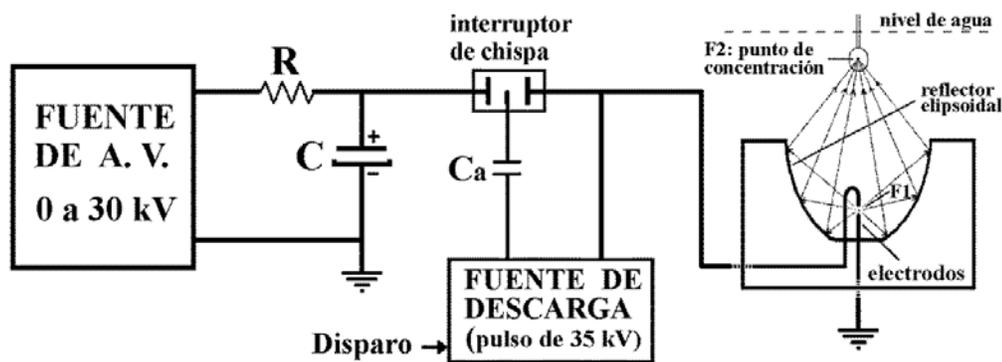


Figura I.12: Esquema del sistema eléctrico de un generador electrohidráulico.

La descarga abrupta de la energía así almacenada en C (y por consiguiente la generación de la onda de choque), se produce posteriormente entre los dos electrodos separados alrededor de 1 mm, inmersos en agua y situados en el primer foco (F_1) del reflector elipsoidal antes descrito. Note que uno de los electrodos está aterrizado y que el medio acuoso es prácticamente conductor. Para provocar la descarga se utiliza un interruptor de chispa, también conocido como interruptor por ionización o “spark gap”, que cierra el circuito ya que funciona como un conmutador muy rápido (tiempo de respuesta menor a 10^{-7} s) que a pesar de manejar altas diferencias de potencial controla de manera precisa el instante en el que se lleva a cabo la descarga. Cabe mencionar que el cierre del circuito de descarga, dada la gran diferencia de potencial y el pico de corriente, superior a 100 A, no puede efectuarse mediante interruptores mecánicos o electromecánicos, debido a los efectos de corona y arco, además de que no soportarían la potencia eléctrica involucrada.

El interruptor de chispa se muestra esquemáticamente en la parte central superior de la figura I.12. Está formado por tres electrodos sumergidos en aire, los dos más separados se encuentran a más de 3 cm (32 mm), para que al aplicar una diferencia de potencial de hasta 30 kV entre ellos (voltaje máximo en el capacitor C) no exista ionización del aire intermedio. Esto se debe a que la constante de rompimiento dieléctrico de este último es de aproximadamente 10 kV/cm. El tercer electrodo del interruptor de chispa está ubicado entre los electrodos extremos, en la parte media o central, y es el electrodo de control. Si en este último se aplica un pulso de 35 kV o más (a muy baja corriente) con respecto al electrodo extremo de salida (que en la figura está ubicado a la derecha), se produce un canal de conducción en el aire existente entre las terminales central y de salida, lo que reduce la región de aire no ionizado entre los electrodos extremos, dicha región finalmente sufre ruptura dieléctrica por la diferencia de potencial previamente establecida en el capacitor C.

Así, la energía almacenada en C es liberada abruptamente mediante la aplicación de un pulso de descarga, el cual proviene de una fuente de alto voltaje pulsado también conocida como fuente de descarga o controladora de descarga (ver parte central inferior de la figura

I.12), cuyo principio de funcionamiento es similar al sistema de encendido de bujías en los motores de gasolina.

En síntesis, la fuente de alto voltaje se encarga de cargar el capacitor a través de la resistencia R, mientras que el interruptor de chispa con su controlador determinan el instante en el que la energía almacenada es liberada a través de los electrodos ubicados en el reflector e inmersos en agua, también conocidos como bujía por la analogía anterior. Una vez que se ha descargado el condensador, la fuente vuelve a cargarlo de la misma forma, para repetir el proceso de descarga.

Las características y componentes antes descritas corresponden al equipo electrohidráulico experimental Mexilit II, que se diseñó y construyó en un 95% en el Instituto de Física de la UNAM hace ya un par de décadas, con el fin de poder realizar investigaciones en el campo de la aplicación de los frentes de choque a la medicina.^[7] Tal equipo se muestra en la figura I.13 y actualmente continúa operando en el Centro de Física Aplicada y Tecnología Avanzada (CFATA) de la UNAM, campus Juriquilla Qro., lugar donde se desarrolló este trabajo.



Figura 1.13: Generador de ondas de choque de tipo electrohidráulico, Mexilit II.

I.4 Interacción de las ondas de choque con la materia

Además de la compresión directa ocasionada por un frente de choque, existen otros dos mecanismos involucrados en la desintegración de los cálculos renales, que son el efecto Hopkinson y la cavitación acústica [5], detallados a continuación. La cavitación acústica es el mecanismo que permitió desarrollar una nueva modalidad en la operación de los litotritores y en torno a la cual se hizo este trabajo.

La llegada por la derecha de un frente de choque a un cálculo se ilustra en la figura I.14.a. El efecto de la compresión directa se debe a que el pulso P^+ (presión máxima) se transmite inicialmente al cálculo y viaja por su interior a mayor velocidad que en el agua, existiendo momentáneamente una presión muy elevada en 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 rarefacción P^- (presión mínima). Tal diferencia de presiones ocasiona esfuerzos considerables en esa zona (figura I.14.b) y mediante la acción repetitiva de los frentes de choque se logra fracturar al cálculo en la región de incidencia de los mismos.

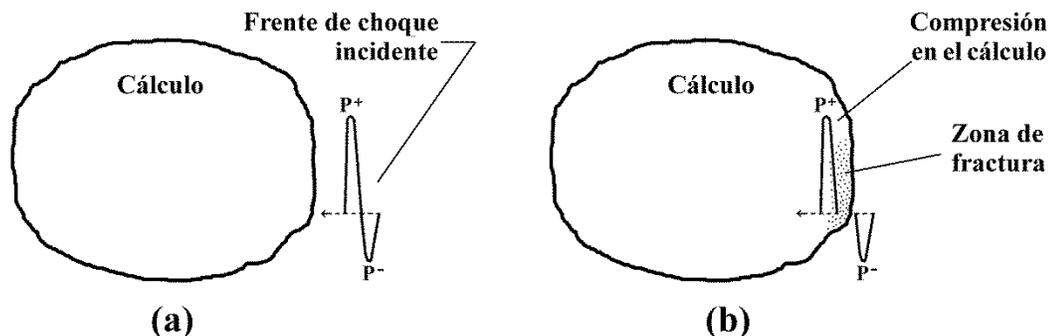


Figura I.14 Efecto de la compresión directa: (a) Frente de choque llegando al cálculo. (b) Pulso de compresión transmitido al cálculo.

Después que cada frente de choque penetra al cálculo, este continúa viajando por su interior hasta llegar a la cara opuesta a la de incidencia (figura I.15.a) para después salir de la materia sólida y regresar al medio líquido. Como en esta interface el cambio es de menor a mayor impedancia acústica, una parte del pulso de compresión es transmitido y otra parte es

reflejada con un cambio de fase (como pulso de rarefacción) según se ilustra en la figura I.15.b. 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.

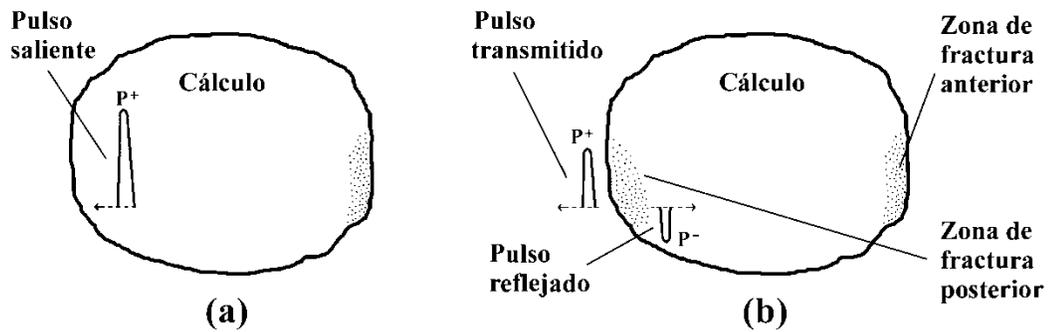


Fig. I.15 Efecto Hopkinson: (a) Pulso de compresión por salir del cálculo. (b) La transmisión de la compresión y su reflexión con cambio de fase (rarefacción) originan la fractura del cálculo en la cara posterior.

En experimentos *in vitro* con cálculos artificiales sometidos a la aplicación de ondas de choque concentradas, es común observar que el cálculo se pulveriza tanto en la cara en la que inciden las ondas de choque, como en la parte opuesta a la misma. Lo primero se debe a la compresión directa, mientras que lo segundo ocurre por el efecto Hopkinson.

El tercer mecanismo importante en la fractura de los cálculos es la cavitación acústica. Generalmente los fluidos como la solución salina, la sangre y la orina -circundantes a un cálculo- poseen gases disueltos y burbujas microscópicas. En la figura I.16 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^+) y un instante después, por el pulso de rarefacción (P^-), la presión disminuye drásticamente ocasionando que aumenten cientos de veces su volumen, para posteriormente permanecer estables un tiempo relativamente corto (200 a 400 μ S), al cabo del cual colapsan violentamente, provocando la emisión de ondas de choque secundarias muy intensas y chorros de líquido de corto alcance pero a velocidades muy

altas (llamados micro-jets) capaces de perforar láminas metálicas de hasta 1 mm de espesor. De esta manera, las burbujas que colapsan cerca del cálculo contribuyen mucho a su desintegración.

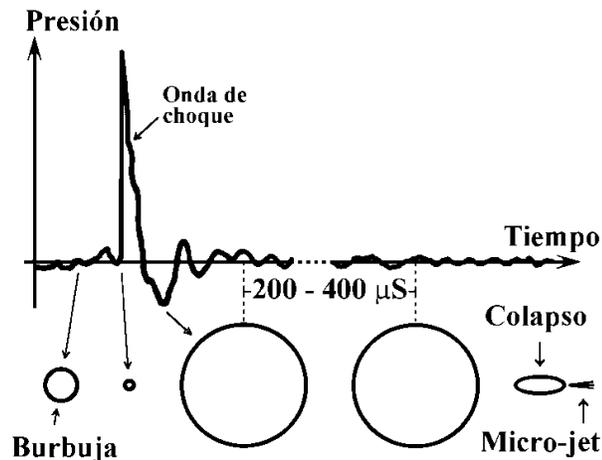


Figura I.16 Cavitación causada por una onda de choque.

Con base en este último efecto, en el Centro de Física Aplicada y Tecnología Avanzada (CFATA) de la UNAM, recientemente se terminó de desarrollar y probar con éxito una nueva modalidad para emitir frentes de choque con un generador de tipo piezoeléctrico, llamada modalidad tándem.^[8] Esta tiene como principio de funcionamiento el reforzar el colapso de burbujas de cavitación, a fin de incrementar la intensidad y el número de micro-jets, 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 (ajustable entre 50 y 950 μ S), 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 figura I.17 se ilustra este proceso en forma análoga a la de la figura I.16.

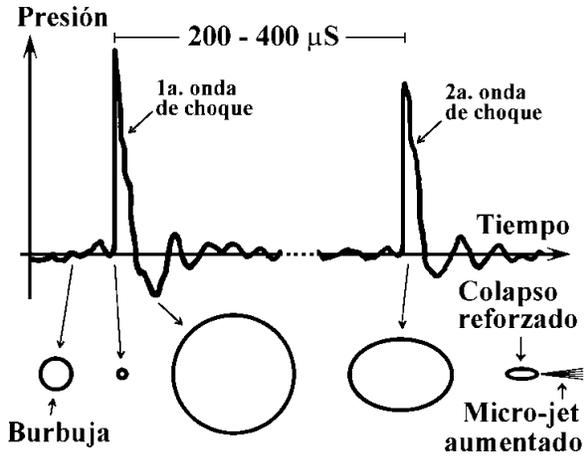


Figura I.17 Principio de funcionamiento del sistema *tándem*.

Al iniciar esta tesis, el sistema *tándem* descrito ya estaba implementado en un litotritor clínico de tipo piezoeléctrico (sección I.2.4) marca Richard Wolf GMBH (Knittlingen, Alemania), modelo Piezolith 2300, al que básicamente se le duplicaron los circuitos de excitación de los cristales piezoeléctricos (ver figura I.18) y se le incluyó un generador de pulsos especial para controlar el conjunto tanto en modo convencional como en modo *tándem*. En este último caso, tal generador también permite establecer cualquier tiempo de retardo dentro del intervalo de 50 a 950 μ s, con resolución de 5 μ s, así como generar cada pareja de ondas de choque ya sea en forma manual o de manera repetitiva a una frecuencia entre 0.1 y 2 eventos por segundo.

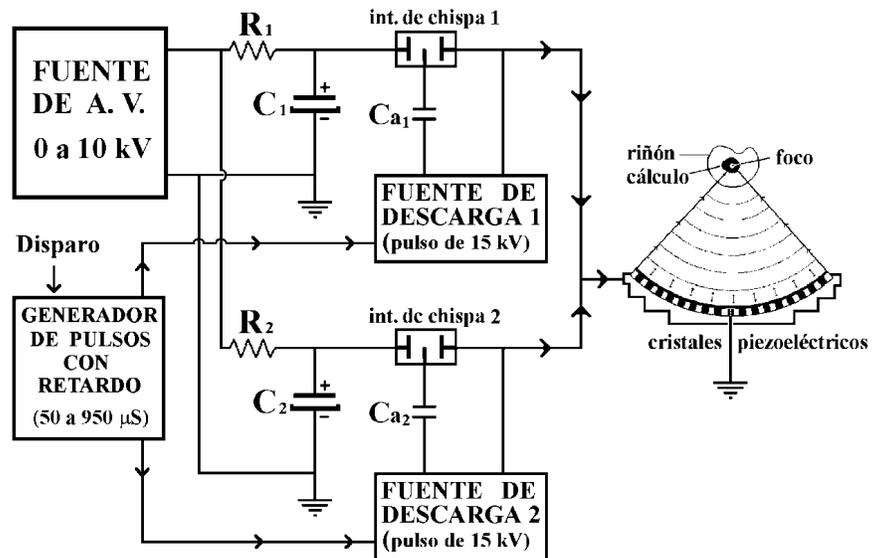


Figura I.18 Esquema básico del generador piezoeléctrico *tándem*.

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 se escucha y se siente como una descarga sencilla. Esto último es de gran beneficio pues se busca aumentar la eficiencia de los litotritores clínicos pero sin causar mayor daño a los tejidos circundantes al cálculo. De hecho, ya se han publicado ^[9] estudios tanto *in vitro* como *in vivo* en los que se demuestra 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.

I.5 Presentación del trabajo

Si bien la modalidad tándem pudo ser desarrollada para un generador de frentes de choque del tipo piezoeléctrico, un factor determinante para ello fue que el tiempo de respuesta de los cristales del mismo nombre es del orden de decenas de nanosegundos; es decir, los cristales que propiamente generan el frente de choque, sufren la deformación y regresan a su estado inicial en un tiempo máximo que es varios órdenes de magnitud menor al tiempo mínimo que requiere el retardo de frentes de choque tándem. Esta respuesta tan rápida de los cristales piezoeléctricos, asegura que el segundo frente de choque en una emisión tándem sea generado bajo las mismas condiciones que el primero.

Dado que el sistema tándem ha resultado en una mejora notable de dicho litotritor, es deseable implementar también dicha modalidad en los generadores del tipo electrohidráulico, ya que estos son de fabricación más sencilla y de menor costo que los piezoeléctricos. También, no obstante que los equipos piezoeléctricos muestran ciertas ventajas frente a los electrohidráulicos, lamentablemente los primeros por lo general se utilizan en centros de salud europeos mientras que en América y particularmente en México, la mayoría de los litotritores existentes son de tipo electrohidráulico.

Como antecedente se conocen modificaciones hechas a generadores electrohidráulicos, una de ellas inclusive se llevó a cabo en la UNAM y consistió en utilizar reflectores compuestos que constan de un solo cabezal formado de dos mitades distintas, de tal modo que integra dos elipsoides coaxiales respecto de su eje mayor, ambos elipsoides coinciden en el primer foco (F1) pero mantienen cierta distancia entre los focos F2 de cada uno, lo que resulta en un reflector bifocal.^[10] Estos reflectores fueron propiamente la primera versión del sistema *tándem* pues lograban retardar una parte del frente de choque respecto de la otra, su única desventaja era que una vez fabricado el reflector éste presenta un único tiempo de retardo entre frentes de choque. Otra modificación a equipos electrohidráulicos fue para producir pares de frentes de choque mediante la adición de un segundo cabezal; es decir, se han implementado equipos con dos bujías y dos reflectores elipsoidales orientados de modo que los focos exteriores de ambos coincidan en un mismo punto. Esto último no se ha hecho en nuestro país, ni se ha hecho con el fin de producir frentes de choque *tándem*, sino para estudiar y aprovechar otros mecanismos tales como la superposición de presiones concentradas entre otros.^[11] En estos equipos modificados resultaría relativamente sencillo implementar la modalidad *tándem*, pero si se quieren producir este tipo de frentes de choque en equipos no modificados (con un solo cabezal), la única alternativa es mediante el desfase temporal de los mismos, en forma análoga a como se hizo con el generador piezoeléctrico. La gran interrogante al respecto es sobre el tiempo de respuesta de la bujía y su entorno al generar cada frente de choque, es decir, si tal respuesta puede ser tan rápida como para producir un primer frente y regresar a sus condiciones iniciales locales en el intervalo de tiempo en que ocurre la cavitación acústica.

Por lo anterior, el objetivo primordial de esta tesis consistió en determinar el tiempo que tarda un generador electrohidráulico en producir un frente de choque y regresar a sus condiciones iniciales; es decir, en volver al estado en que el generador puede nuevamente producir un segundo frente de choque con las mismas características que el primero.

Para cumplir tal objetivo, se estableció el propósito de determinar la dependencia de dicho tiempo de recuperación en la energía que se libera con la generación de los frentes de

choque, que a su vez es función de sus variables de almacenamiento en forma eléctrica (voltaje y capacitancia). Si bien los fenómenos físicos responsables de la formación de los frentes de choque son importantes, han sido presentados en otros trabajos ^[3,7] y aquí -como objetivo secundario consecuente- sólo se planteó el obtener evidencia experimental de los mismos.

El principal instrumento de medición utilizado en este estudio es una cámara de video digital de alta velocidad (5130 a 132000 c/s), marca “Red Lake”, modelo “Motion Pro X4”. Con este instrumento se pudo registrar la formación de los frentes de choque para su posterior análisis cuadro por cuadro. Los detalles de este procedimiento se describen en el siguiente capítulo.

Como parte final del trabajo, se contempló la instalación del sistema tándem en el generador electrohidráulico Mexilit II a fin de probar la emisión de frentes de choques sucesivos, experimentando inicialmente con tiempos de retardo relativamente largos (~mseg), para después reducirlos paulatinamente y encontrar el límite de funcionalidad de los mismos en lo referente al aprovechamiento de la cavitación acústica. Esto último permitió concluir sobre la utilidad o inutilidad de implementar el sistema de descargas tándem en generadores electrohidráulicos de un único cabezal.

Capítulo II

Instrumentos y métodos de la experimentación

Como se menciona al final del capítulo anterior, este trabajo consistió en determinar experimentalmente lo que a grandes rasgos puede llamarse el tiempo de recuperación de un generador de ondas de choque de tipo electrohidráulico, con la finalidad de decidir sobre la aplicabilidad de la emisión de ondas de choque en modo tándem, cuyas ventajas ya se han demostrado en sistemas de tipo piezoeléctrico.

El equipo primordial de trabajo fue el generador Mexilit II, descrito en la sección 1.3.2, cuya selección fue por la ventaja de contar con un equipo construido para propósitos experimentales, lo que permitió modificar algunas de sus componentes con relativa facilidad, tanto para acoplar los instrumentos de medición como para variar parámetros que intervienen en dicho tiempo de recuperación.

Aún cuando en la literatura del área se explican los fenómenos inherentes a la generación de frentes de choque por el método electrohidráulico (descritos brevemente en la sección 1.2.2), no se encontraron registros sobre la temporalidad de los mismos, quizás debido en parte a la importancia de caracterizar más sus efectos y aplicaciones (ondas de choque concentradas, litotricia extracorpórea, impacto social, etc.) que sus causas desde el punto de vista básico. También se puede argumentar la existencia de algunas dificultades para realizar mediciones directas en la región de generación de las ondas de choque, dados los efectos destructivos de las mismas.

Para las mediciones relacionadas con las ondas de choque hay equipos de respuesta muy rápida como los osciloscopios, aunque estos sólo miden señales eléctricas proporcionadas por algún transductor adecuado al parámetro a medir. En el desarrollo de la litotricia extracorpórea, ha sido de interés evaluar variables como los picos de presión del frente de choque (P^+ , P^-) y la duración de los mismos. Estos datos se han logrado medir en zonas relativamente lejanas a la

región de generación y con buena precisión gracias al uso de transductores de presión o hidrófonos, entre los que se encuentran los de tipo piezoeléctrico. En particular, en el Laboratorio de Ondas de Choque del CFATA se cuenta con hidrófonos de aguja de fluoruro de polivinilideno (PVDF), polímero piezoeléctrico cuya respuesta es del orden de nanosegundos, y que consisten en una aguja con la punta cubierta de una película polarizada de PVDF entre dos electrodos, la punta de la sonda tiene un recubrimiento de plata que está en contacto eléctrico con la cubierta cilíndrica formando así uno de los electrodos, dentro de la cavidad cilíndrica del hidrófono está la aguja que conforma el segundo electrodo con la película de PVDF entre ellos.^[4]

Dada la naturaleza de tales transductores, no es conveniente usarlos en la zona donde se generan las ondas de choque, cerca del foco F1, ya que la ocurrencia abrupta de la descarga eléctrica, la formación del plasma y el consecuente frente de choque, ocasionan magnitudes muy elevadas de radiación electromagnética, temperatura y presión, que en el mejor de los casos no proporcionarían mediciones confiables, pudiéndose llegar al caso de dañar al transductor. Por ello, en este trabajo se utilizó un método de medición indirecto, basado en el uso de una cámara de video de alta velocidad, descrita en la sección siguiente, llegando a lo que propiamente fue el montaje experimental de este trabajo.

Después se mencionan los dispositivos implementados para el uso adecuado de dicha cámara y los eventos registrados, incluyendo la forma de captura de datos. Posteriormente se describen tanto los parámetros que intervienen en la generación de los frentes de choque, como la diferencia de potencial, y la capacidad de almacenamiento de energía, así como las formas en que se modificaron para constituir la metodología seguida. Se finaliza el capítulo con la implementación del sistema tándem en dicho generador Mexilit II. Los resultados obtenidos y la discusión de los mismos se presentan en el capítulo 3.

II.1.- Cámara de video de alta velocidad

El principal instrumento de medición utilizado fue una cámara de video digital marca Red Lake, modelo Motion Pro X4; cuya característica más relevante es su rapidez de captura, que si bien puede llegar a ser muy elevada, esta es a costa de la resolución (dada en pixeles) de las imágenes grabadas. En la tabla II.1 se muestran algunos datos representativos de dicha dependencia, donde se puede notar, como ejemplo, que la mayor resolución que el dispositivo maneja es de 512x512 pixeles, con lo que se pueden tener 5130 cuadros por segundo como máxima rapidez de grabación.

Cámara Red Lake Motion Pro X4	
Resolución [Píxeles ²]	Rapidez de grabación [Fotogramas/seg]
512x512	5,130
512x256	10,100
512x128	20,100
512x64	38,500
512x32	73,500
512x16	132,000

Tabla II.1: Velocidades de grabación de la cámara Motion Pro X4, según el fabricante.

De la tabla anterior se puede inferir que para mantener una densidad de resolución (No. de pixeles por unidad de área) constante y aceptable en los fotogramas, hay que reducir el área de interés que se quiera captar; es decir, mientras más pequeña sea la zona de interés, la cámara puede capturar más cuadros por unidad de tiempo. Esto resultó ventajoso pues en este trabajo sólo interesó lo que ocurría en la zona de la bujía del generador (los electrodos entre los cuales se producía la descarga eléctrica de alto voltaje), lo cual hubo que grabar con las debidas precauciones para garantizar el buen funcionamiento del instrumento. Sobre esto último, aún cuando la cámara viene con los blindajes adecuados contra radiación electromagnética al igual

que el generador Mexilit II en cuanto a emisión considerable de la misma ^[12], por mera precaución adicional se hicieron pruebas previas de videograbación con el generador funcionando, inicialmente a distancias relativamente lejanas de la bujía (3.5 m), que después se fueron reduciendo paulatinamente hasta 0.5 m (distancia final entre videocámara y bujía), vigilando en todo momento que no se presentara indicio alguno de disfunción o captura inadecuada de imágenes, por lo que dicha cámara pudo ser operada sin mayor complicación en las cercanías de la tina de pruebas del generador, según se ilustra en las figuras siguientes.

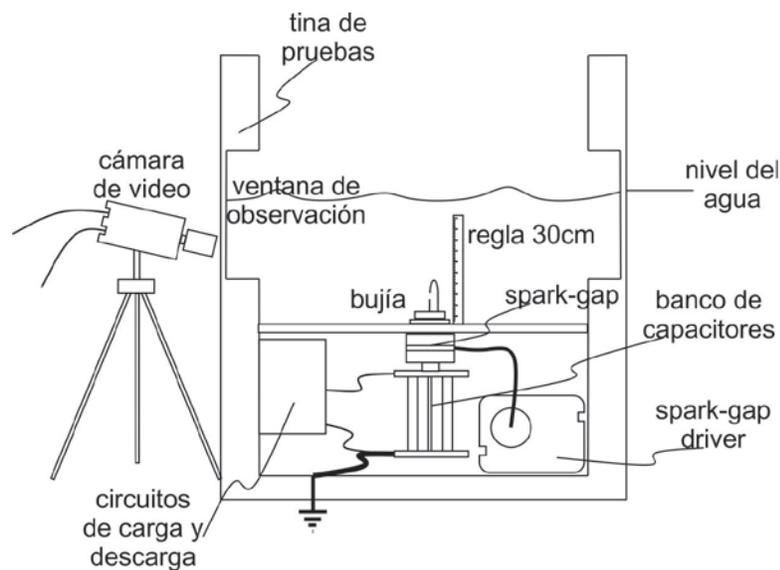


Figura II.1: Posición de la cámara en el montaje experimental.



Figura II.2: Fotografías del montaje experimental. (a) Vista general. (b) Acercamiento de la videocámara frente a la bujía del generador.

Con ayuda de una lente tipo macro y acercando la cámara de video lo más posible a la ventana de observación de la tina, se logró reducir dicha región de interés a un área de 6x6 cm en el plano de la bujía (ver figura II.3a), lo que en la cámara resultó ser de 160x160 pixeles, permitiendo aumentar la velocidad de captura hasta 21000 cuadros por segundo, la cual fue utilizada en todos los videos adquiridos y resultó más que suficiente para los propósitos de esta tesis.

Una regla convencional de 30 cm, hecha de aluminio, fue la mejor opción para mostrar una escala de referencia en los videos capturados. En un principio se intentaron montar retículas impresas en acetato para intercalar una escala fina a manera de plano cartesiano (ver figura II.3b) y así facilitar el trabajo a la hora de analizar los videos. Sin embargo, la energía mecánica propagada por la formación del frente de choque era tan grande que las retículas fijadas se deformaban demasiado dificultando el análisis, de modo que se descartaron dejando la idea original de la regla de aluminio (figuras II.3 a y c).

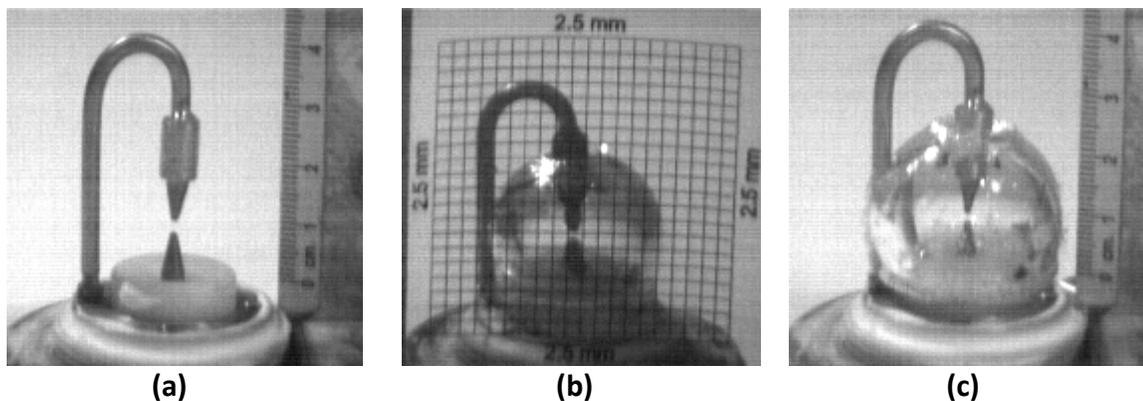


Figura II.3: Fotografías de la bujía al delimitar la zona de interés. (a) Escalamiento con regla, sin descarga eléctrica. (b) Escalamiento con retícula después de una descarga eléctrica a 16 KV y 40 nF. (c) Escalamiento con regla después de una descarga eléctrica a 16 KV y 80 nF. En las fotografías 3b y 3c se muestra la burbuja de plasma que se forma después de la descarga eléctrica de alto voltaje.

Ahora bien, como al aumentar la rapidez de videograbación, el tiempo de exposición de cada fotograma se reduce, la imagen resultante se oscurece a medida que aumentamos dicha

rapidez (figura II.3b). En otras palabras, a mayor rapidez de captura habrá menor tiempo de exposición en cada imagen y consecuentemente menor luminosidad. Este modelo de cámara controla automáticamente la cantidad de luz que percibe, con muy buena sensibilidad y ganancia de iluminación de hasta 4 veces. Aún así fue necesario usar tres reflectores de lámpara incandescente de 500 watts en cada uno, dispuestos de modo que iluminaran la región de interés tanto desde arriba como desde los costados. El tiempo de exposición usado para todos los videos capturados en este trabajo fue el máximo permitido a la velocidad mencionada y con un valor de 67 microsegundos por fotograma (figura II.3c).

El tiempo máximo de grabación de la cámara obviamente depende de la resolución y velocidad de captura utilizadas, con la limitante de la cantidad de memoria interna de la misma. Esta última es de 4 GB, lo cual permitió grabar hasta en el orden de segundos, tiempo más que suficiente, ya que un complemento indispensable a la operación de la cámara es un equipo de cómputo, ya sea de tipo escritorio (cpu y monitor) o portátil (lap top), al que se transfieren las capturas mediante un software proporcionado por el fabricante ^[13], según se describe con mayor detalle en la sección II.3.

II.2.- Circuito de sincronía

Por la rapidez y corta duración de los eventos por capturar, con los parámetros de grabación antes mencionados, fue indispensable sincronizar el momento de generación del frente de choque con el arranque de la videocámara, a través de un conector de disparo (trigger) externo disponible en la misma, que es habilitado al recibir un pulso eléctrico típico de los circuitos digitales de la familia TTL (Transistor-Transistor-Logic, 5 V de amplitud y 50 μ s de duración mínima).

Tal señal debía provenir de un fenómeno físico que, de preferencia, preceda la generación de cada frente de choque con una mínima temporalidad muy repetible. Primero se pensó en inducir la radiación electromagnética producida por la fuente de descarga (ver figura I.12 del capítulo 1) y adecuarla al tipo TTL, pero la idea fue desechada para evitar posibles

riesgos de la cámara al dispararla con una línea de transmisión normalizada. Finalmente se optó por usar la emisión de luz visible que genera el interruptor de chispa al ionizar, la cual fue conducida mediante una fibra óptica a un dispositivo electrónico -alimentado sólo con 5 V de c.d., regulados- encargado de convertir dicho pulso óptico en la señal eléctrica deseada.

El pulso TTL así obtenido se conectó directamente al receptor de disparo externo de la cámara, con la ventaja adicional de que el software de la misma permitió ajustar un sincronizador interno para controlar el tiempo total de grabación de cada evento. Sobre esto último, se aprovechó que la cámara es operable en modo de “adquisición todo el tiempo”, sobrescribiendo en la memoria de manera periódica y sólo ante la llegada de dicha señal externa de sincronía, se detiene la grabación para conservar en memoria el video correspondiente. En otras palabras, la señal antes referida como de disparo externo, fue realmente utilizada como de paro. Por conveniencia, el sincronizador interno se ajustó al 50%, de tal forma que si el tiempo de grabación por evento es de 0.3 s, por ejemplo, la grabación que se conserva en memoria es aquella comprendida en el intervalo de tiempo desde 0.15 s antes de la señal externa y hasta 0.15 s después de recibir la misma. En la figura siguiente, se muestra un esquema de la sincronía de la cámara con la ionización del interruptor de chispa que desencadena la generación del frente de choque.

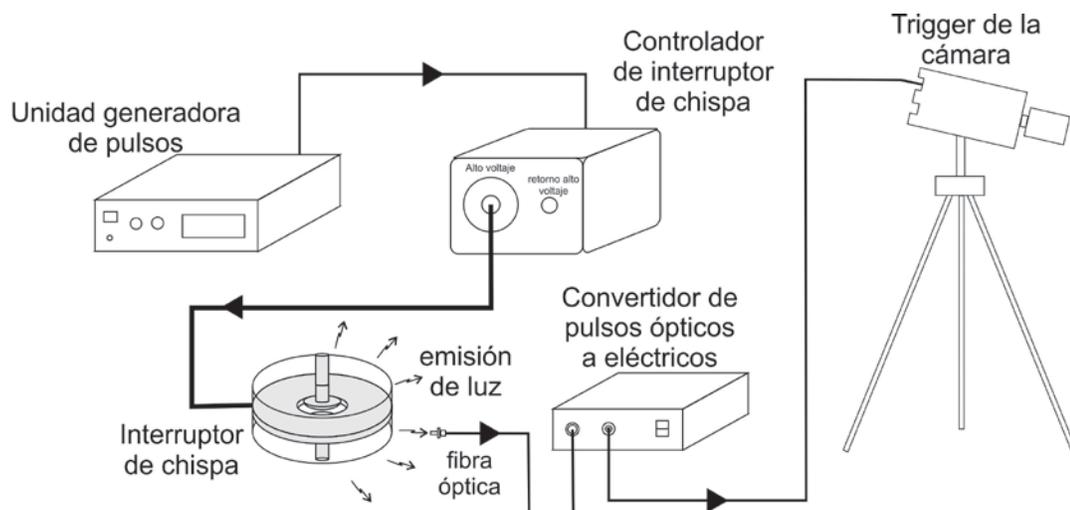


Figura II.4: Diagrama del circuito de sincronía con el *trigger* externo de la videocámara.

Tal sistema utilizado para el disparo externo o *trigger* principal de la videocámara fue bastante reproducible, ya que tuvo un error máximo inferior a 20 microsegundos, determinados experimentalmente mediante un conjunto de datos extraídos de videos previos a las grabaciones primordiales del trabajo.

II.3.- Sistema de adquisición de datos

La cámara de video puede operar en tres modos distintos de grabación: lineal, circular o periódico y por segmentos. El modo lineal es el más sencillo y consiste en comenzar a grabar continuamente ante la señal del *trigger* principal, hasta saturar la memoria disponible, que es cuando se detiene la grabación y su reinicio se hace desde el equipo de cómputo después de guardar o descartar el video obtenido.

El modo de grabación circular es similar al anterior, pero la grabación no se interrumpe cuando se llena la memoria, sino que se sobrescribe cíclicamente una y otra vez hasta que la señal del *trigger* principal detiene la grabación y la cámara retiene en memoria el intervalo de video especificado según la configuración del *trigger* interno. Esto último permite analizar el video registrado en instantes anteriores a la llegada del *trigger* principal.

Finalmente, el modo de grabación por segmentos permite dividir la memoria interna de la cámara en un número entero de particiones, donde cada una de ellas graba en modo circular y se van activando secuencialmente. Es decir, inicialmente la cámara se encuentra en modo de grabación circular pero con la memoria limitada a sólo el primer segmento. A la señal del *trigger* principal, la cámara retiene en memoria lo correspondiente a dicha partición e inmediatamente pasa a grabar en modo circular dentro de la memoria del segundo segmento y a la espera de otra señal del *trigger* principal. Tal proceso se repite sucesivamente hasta agotar todos los segmentos disponibles.

El último modo de grabación descrito fue el utilizado en este trabajo, ya que con ello se automatizó parcialmente la captura de los videos estadísticamente necesarios para la

recopilación de datos confiables, pues para poder tener medidas representativas de las ondas de choque generadas con los mismos parámetros, fue indispensable utilizar promedios con un mínimo de 10 muestras para cada caso (10 videos correspondientes a 10 frentes de choque generados bajo las mismas condiciones), dada la alta variabilidad de los mismos, según lo comentado al final de la sección 1.2.2.

II.4.- Variabilidad de los parámetros de interés (capacidad y voltaje)

Como se describió en la sección 1.3.2, el generador Mexilit II fue diseñado y construido para operar con una capacidad (C) que varía desde 10 nF hasta 80 nF en múltiplos de 10, misma en la que se pueden almacenar y descargar potenciales eléctricos entre 15 y 30 kV, aunque generalmente se utilizan valores en el intervalo de 16 a 26 kV, debido al desgaste de la bujía, según se comenta en la sección siguiente. Por ello, en lo sucesivo se usa este último intervalo de voltajes como el de operación general del equipo.

Con tal variabilidad de voltajes en el generador, la ecuación 1.3 del capítulo 1 ($E = \frac{1}{2} CV^2$) predice que las energías liberadas en cada descarga están comprendidas en el intervalo: [10.24, 27.04] Joules. Este dato fue importante en la planeación de las videograbaciones realizadas (que se detallan en la siguiente sección), ya que para analizar la dependencia del tiempo de recuperación del generador con la energía eléctrica liberada, hubo que decidir qué valores particulares de esta había que utilizar tanto en función de sus correspondientes voltajes a capacidad fija, como para la variación de capacidad a un voltaje fijo, a fin de tratar de distinguir la posible contribución de cada uno de estos parámetros por separado.

El criterio utilizado para efectos de lo anterior, consistió en hacer la mayor cantidad de mediciones en cada intervalo de variación del parámetro de interés (voltaje o capacidad), que resultaran significativamente distintas previendo la propagación de incertidumbres sistemáticas inherentes, según se describe a continuación. Indudablemente hubo efectos estocásticos involucrados, pero como se mencionó antes, estos se trataron estadísticamente. Así, al diferenciar la ecuación de la energía, se obtiene la expresión:

$$dE = \frac{1}{2} V^2 dC + CVdV \quad \dots \dots (II.1)$$

que permite determinar la incertidumbre absoluta (dE) propagada a dicha energía (E) por las incertidumbres absolutas en la capacidad (dC) y el voltaje de operación (dV). El valor así obtenido para dE, proporciona el intervalo de incertidumbre $E \pm dE = [E_{\min}, E_{\max}]$, cuya amplitud obviamente equivale al doble de la incertidumbre calculada; es decir:

$$|E_{\max} - E_{\min}| = 2(dE) \quad \dots \dots (II.2)$$

Los extremos de dicho intervalo (i.e. los valores de E_{\min} y E_{\max}), representan el límite de la variabilidad no significativa del parámetro de interés. Es decir, para los análisis de variación de voltaje a capacidad fija ($C = C_o = \text{constante}$), cada valor extremo de la incertidumbre de energía puede suponerse debido a respectivos valores de voltaje V_{\min} , V_{\max} , involucrados en la ecuación I.3 ($E = \frac{1}{2} C_o V^2$), pero cuya distinción está en el límite de lo improcedente; esto es: $E_{\min} = \frac{1}{2} C_o V_{\min}^2$ y $E_{\max} = \frac{1}{2} C_o V_{\max}^2$, lo que al sustituir en la ecuación II.2 proporciona las igualdades:

$$\frac{1}{2} C_o |V_{\max}^2 - V_{\min}^2| = \frac{1}{2} C_o (V_{\max} + V_{\min})(V_{\max} - V_{\min}) = C_o V (V_{\max} - V_{\min}) = 2(dE)$$

donde hemos definido $V = \frac{1}{2} (V_{\max} + V_{\min})$ como el valor central de la variación de voltaje.

De la última igualdad se obtiene: $(V_{\max} - V_{\min}) = 2(dE)/(C_o V) = V(dE)/(\frac{1}{2} C_o V^2)$, que finalmente se puede expresar como:

$$\Delta V = (V_{\max} - V_{\min}) = V \left(\frac{dE}{E} \right) \quad \dots \dots (II.3)$$

donde la amplitud ΔV representa la amplitud del intervalo de voltaje: $[V_{\min}, V_{\max}]$, cuyos valores son indistinguibles entre sí por las incertidumbres sistemáticas propagadas. En otras palabras, la magnitud ΔV proporciona la mínima separación entre valores discretos de voltaje a utilizar como sistemáticamente distintos.

Análogamente a lo anterior, para la variación de una capacidad central (C) a voltaje constante (V_o), se tiene: $E_{\min} = \frac{1}{2} C_{\min} V_o^2$ y $E_{\max} = \frac{1}{2} C_{\max} V_o^2$, de donde:

$$\frac{1}{2}V_o^2|C_{m\acute{a}x} - C_{min}| = 2(dE) \rightarrow |C_{m\acute{a}x} - C_{min}| = \frac{2(dE)}{\frac{1}{2}V_o^2} = \frac{2C(dE)}{\frac{1}{2}CV_o^2} \rightarrow$$

$$\Delta C = (C_{m\acute{a}x} - C_{min}) = 2C \left(\frac{dE}{E} \right) \dots\dots (II.4)$$

donde ΔC representa la mínima separación entre valores de capacidad a utilizar como sistemáticamente distintos. Esta última ecuación como la correspondiente para ΔV , dependen de la incertidumbre relativa de la energía, la cual puede obtenerse a partir de la ecuación II.1:

$$\frac{dE}{E} = \frac{dC}{C} + 2 \left(\frac{dV}{V} \right) \dots\dots (II.5)$$

con lo que al sustituir tal equivalencia en las ecuaciones II.3 y II.4, se obtienen finalmente:

$$\Delta V = V \left(\frac{dC}{C} \right) + 2(dV) \dots\dots (II.6)$$

$$\Delta C = 2(dC) + 4C \left(\frac{dV}{V} \right) \dots\dots (II.7)$$

que son expresiones que permiten calcular la mínima separación entre los parámetros a variar discretamente, en función de la magnitud de los mismos y sus correspondientes incertidumbres.

Para los cálculos numéricos, se tomó en cuenta que la capacidad nominal del generador (80 nF) está formada por 8 condensadores de 10 nF (a 35 kV de voltaje máximo) y se contó adicionalmente con otros dos condensadores de 50 nF (también a 35 kV), para poder hacer combinaciones entre los mismos a fin de variar discretamente dicha capacidad entre 40 y 180 nF. Todos los condensadores vienen especificados de fábrica (CSI Technologies, Inc. U.S.A.) como de precisión, con una incertidumbre relativa del 2 %, por lo que el $dC/C = 0.02$. En cuanto a la incertidumbres de la diferencia de potencial, adoptamos $|dV| = 50$ Volts (= 0.05 kV), ya que aun cuando el fabricante de la fuente de alto voltaje integrada al equipo garantiza coeficientes

de regulación mejores a 0.05 %^[14], el medidor de la misma sólo permitió una resolución de 100 Volts en cada valor de voltaje manualmente preestablecido mediante un potenciómetro de 10 vueltas.

Con tales datos de incertidumbres, la ecuación II.6 toma la forma: $\Delta V = 0.02V + 0.1$, con el voltaje expresado en kV; así, el caso extremo se tiene al máximo valor del voltaje de operación ($V = 26$ kV), con el que $\Delta V = 0.620$ kV. Por seguridad y simplicidad, el incremento finalmente utilizado fue de 1 kV. Para la variación de capacidad, la expresión II.7 queda como $\Delta C = 0.04 C + 0.2 (C/V)$, donde se puede notar que ΔC se incrementa al aumentar C pero disminuye con el aumento de V , por lo que el caso extremo se tiene a máximo valor de capacidad (180 nF) y mínimo voltaje de operación (16 kV). El resultado obtenido fue $\Delta C = 9.45$ nF, lo que permitió modificar dicha capacidad en incrementos de 10 nF.

Ya que la capacitancia del generador no es tan trivial de variar como es el caso del voltaje, el procedimiento para hacer tales cambios requirió de atención especial. La capacidad nominal está formada por 8 condensadores de forma cilíndrica, de 10nF cada uno, conectados en paralelo mediante dos discos de latón y colocados justo debajo del interruptor de chispa, según se muestra en la figura II.5. Para modificar la capacidad entre 40 y 80 nF, sólo había que quitar o poner capacitores estando todo el equipo apagado y confirmando que los condensadores no tuvieran carga alguna. Sin embargo, para usar capacidades entre 90 y 180 nF fue necesario hacer adaptaciones para montar en paralelo el o los otros capacitores de 50nF, tomando en cuenta los aspectos siguientes.

Para las magnitudes de alto voltaje utilizadas, la impedancia de la bujía en agua es prácticamente nula y la corriente que fluye hacia la misma durante la descarga de los capacitores, a través del interruptor de chispa, supera momentáneamente los 100 A.

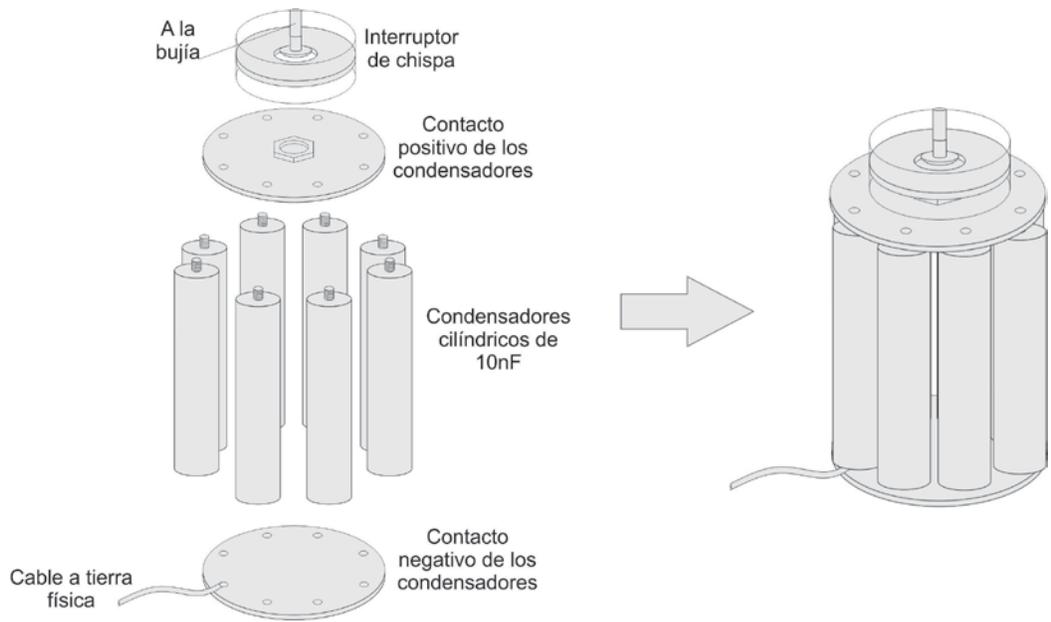


Figura II.5: Ensamblado del banco de capacitores del Mexilit II.

Las conexiones entre esos tres elementos deben soportar momentáneamente más de 1.5 MW de potencia, por lo que se tuvieron que fabricar algunos contactos a partir de solera de cobre de 3 mm de espesor y 20 mm de ancho, con la menor longitud posible (100 mm a lo más) para tratar de evitar efectos inductivos considerables. Tales conductores se atornillaron al montaje original del equipo para acoplar los otros condensadores. Se fabricó también una pequeña mesa de madera para soportar a los mismos sin riesgo de ocasionar arcos eléctricos indeseables (ver figura II.6).

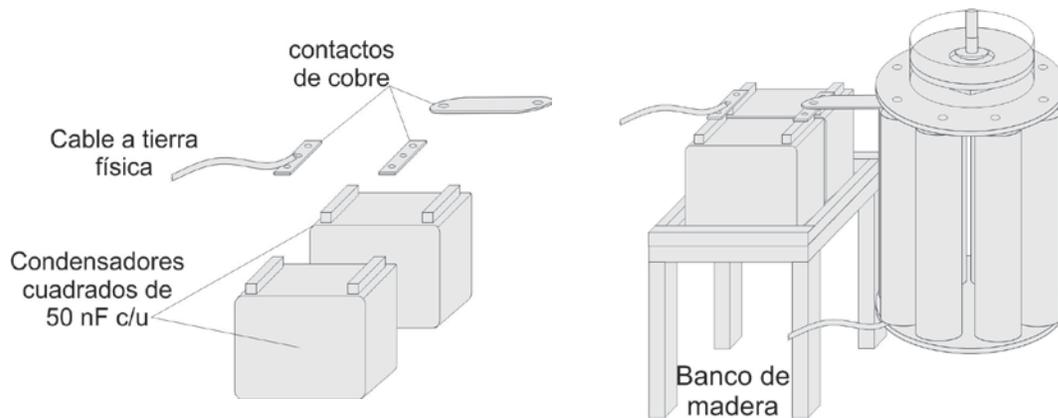


Figura II.6: Acoplamiento de 2 capacitores de 50nF (c/u), adicionales al banco original del Mexilit II.

II.5.- Desgaste de bujías y planeación de la experimentación

La bujía del generador es la componente que físicamente genera la discontinuidad de presión por el mecanismo explicado en el capítulo anterior. Existen varios de tipos y modelos de bujías para esta aplicación dependiendo del equipo y el fabricante. El Mexilit II usa dos tipos de bujías, llamadas “de capuchón” y “de gancho”, que para fines de la descarga eléctrica tienen las mismas características. La diferencia es que las primeras son más usuales para frentes de choque concentrados (mediante el uso del reflector elipsoidal), ya que poseen un pequeño platillo sobre el electrodo superior para evitar la llegada directa del frente de choque a la región focal. Por los cuatro soportes que sujetan al platillo, son más resistentes a esfuerzos mecánicos que las “de gancho”, aunque estas últimas son más versátiles. En este trabajo se usaron bujías de gancho (ver figura II.7) porque permiten apreciar mejor lo que ocurre entre sus electrodos.

Cada una de estas bujías posee una vida útil de 1500 descargas en promedio. Son hechas de latón con aislamiento de nylamid, y cuyos electrodos son de “tungsteno toriado” (tungsteno con 2 % de torio), cuya separación es de 1mm entre sus puntas achatadas y presentan una área efectiva de 0.78 mm^2 en las mismas.

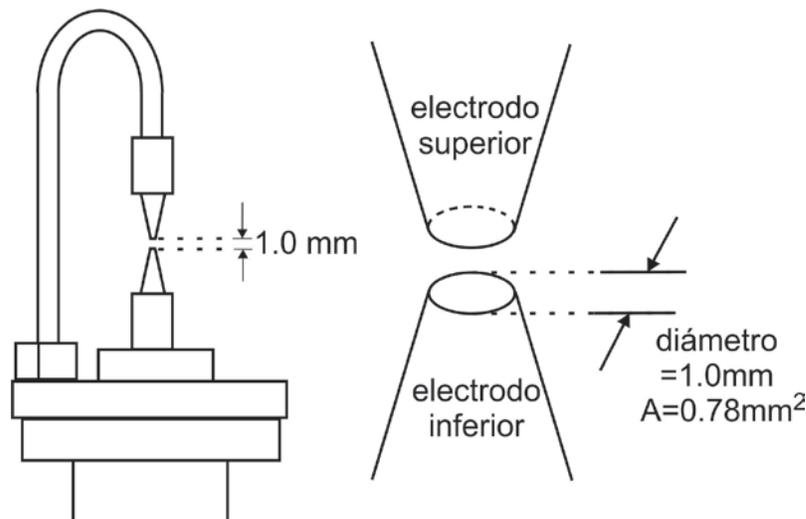


Figura II.7: Dimensiones de los electrodos en una bujía de gancho nueva.

Los electrodos se van desgastando con el uso, dependiendo de la energía liberada en cada descarga. Las puntas se separan y se redondean en los bordes, haciendo irregulares las

descargas a bajas energías (13 J, con 18 kV en 80 nF), hasta el punto en que puede no ocurrir dicha descarga y es necesario aumentar el voltaje de operación y por consiguiente la energía liberada. Mientras más desgastada se encuentra la bujía los disparos se vuelven menos reproducibles, de hecho después de generar unos 500 frentes de choque las descargas empiezan a fallar al intentar producirlas con voltajes menores a 20kV.

Dado que en este trabajo sólo se contó con 2 bujías nuevas para todo su desarrollo, hubo que hacer una buena planeación para evitar que ciertos experimentos se realizaran con bujía muy desgastada; por ejemplo, evitar disparos a menos de 18KV cuando la bujía hubiera pasado por más de 300 disparos. Por esta razón y dado que fueron 2 variables principales (voltaje y capacidad) las que se fueron modificando, los 44 experimentos básicos (con 10 descargas en cada uno de ellos) se llevaron a cabo como se muestra en la tabla de planeación siguiente. Lo de básicos es porque hubo otros experimentos (no contemplados en la figura II.8) que se pueden llamar de refinamiento, porque en base a lo encontrado al agotar dicha tabla de planeación, fue necesario retroalimentar la captura de datos con menores cambios en el parámetro de interés, particularmente en lo referente a la variación de capacidad. También hubo experimentos destinados a otros aspectos, los cuales se comentan posteriormente.

V \ C	40nF	80nF	120nF	160nF
16kV	1	5	9	13
17kV	2	6	10	14
18kV	3	7	11	15
19kV	4	8	12	16
20kV	17	21	25	29
21kV	18	22	26	30
22kV	19	23	27	31
23kV	20	24	28	32
24kV	33	36	39	42
25kV	34	37	40	43
26kV	35	38	41	44

Figura II.8: Tabla de planeación de disparos de la bujía en relación al voltaje y la capacidad.

En la tabla anterior, el primer experimento corresponde a 16 kV con 40 nF de capacidad, manteniendo esta última hasta el 4° experimento conforme se va aumentando el voltaje, con incrementos de 1 kV, hasta llegar a 19 kV. En el 5° experimento se aumenta la capacidad a 80 nF y se regresa a los 16 kV, y así sucesivamente hasta cubrir las cuatro capacidades mostradas (en múltiplos de 40 nF). Así, primero se hicieron los experimentos a relativos bajos voltajes (16kV a 19kV) aunque ello implicara estar modificando el banco de capacitores frecuentemente. Después se realizaron los experimentos de mediano voltaje (20kV a 23kV) y finalmente los de mayor voltaje (24kV a 26kV). Para comentarios posteriores sobre esta planeación, cada vez que se mencionen mediciones de bajo, mediano o alto voltaje, ello es con referencia a dichos intervalos.

II.6.- Implementación del modo tándem en el generador electrohidráulico

Se procedió a modificar el funcionamiento del Mexilit II al modo tándem descrito al final de la sección I.4. Para ello fue necesario incorporar más elementos en forma análoga a lo mostrado en la figura I.18 para el generador de tipo piezoeléctrico. En este caso, inicialmente se acopló otro banco de capacitores (80 nF) y un interruptor de chispa, ambos elementos idénticos a los originales, que fueron montados lo más cerca posible al primer interruptor de chispa, según se muestra en la figura II.9.

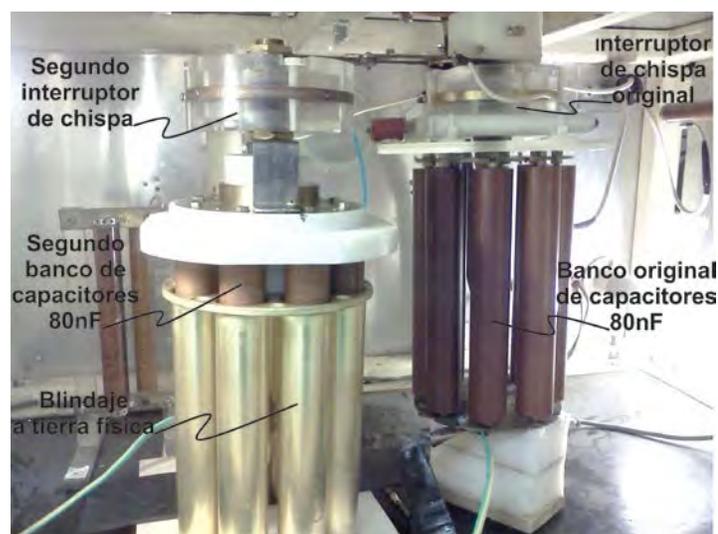


Figura II.9: Montaje del banco de condensadores e interruptor de chispa adicionales

Gracias a un análisis previo de los resultados de la primera parte de este trabajo, se notó que existen fuertes efectos de inducción electromagnética, que actúan sobre todo en elementos cercanos al interruptor de chispa. Debido a esto, el segundo banco de capacitores fue blindado con una cubierta de aluminio conectada a tierra física.

Posteriormente se desconectó y se desmontó la fuente de descarga o controladora de disparo original; y en su lugar se instalaron dos fuentes similares a la misma, idénticas entre sí, pero manejadas por un generador especial, llamado de pulsos retardados, el cual se describe a continuación. En la figura siguiente se muestra el diagrama del sistema de carga y disparo del generador Mexilit II en versión de prueba tándem.

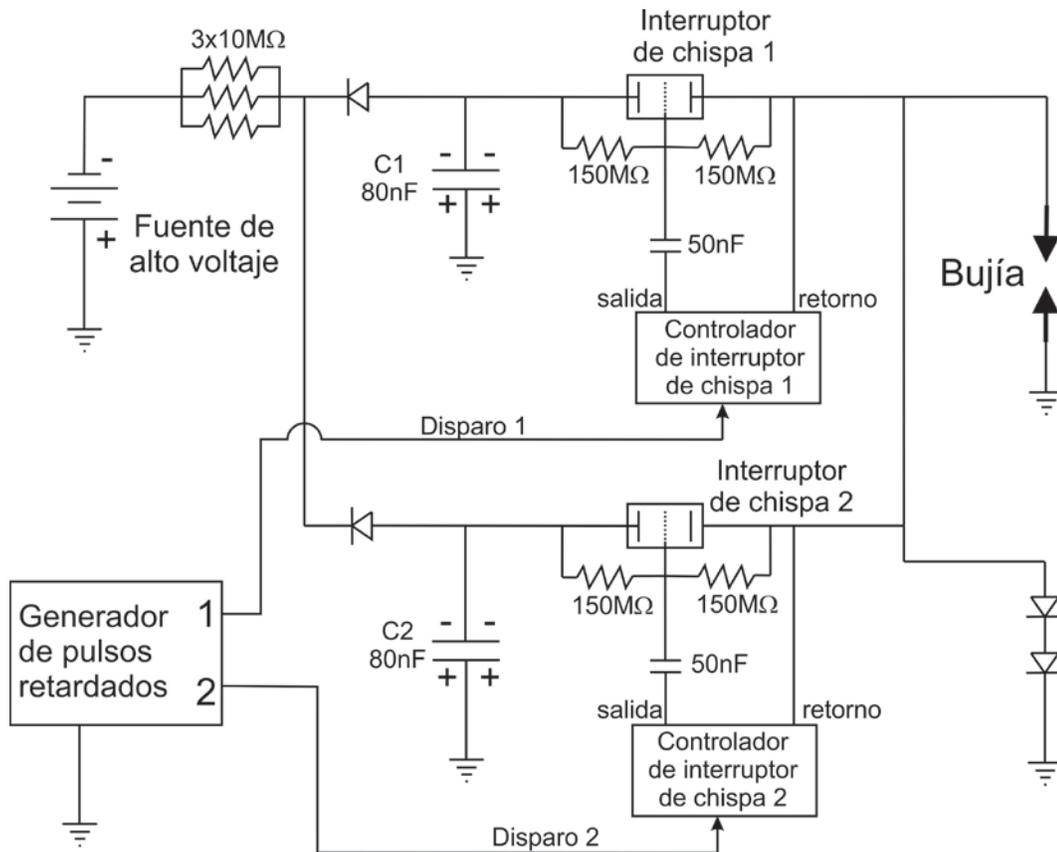


Figura II.10: Circuito del modo de pruebas tándem para el Mexilit II.

El generador de pulsos retardados (GPR) es un instrumento electrónico desarrollado en el Laboratorio de Ondas de Choque del CFATA, con el propósito de controlar el retardo de los pulsos para el sistema tándem implementado en el generador de tipo piezoeléctrico, según se describió en la sección I.4. Tiene la ventaja de emitir repetitivamente o en forma manual, dos pulsos sucesivos con un intervalo de tiempo entre ellos fácilmente ajustable mediante un potenciómetro de 10 vueltas. A diferencia de la unidad generadora de pulsos del Mexilit II que manda pulsos ópticos, el GPR genera parejas de pulsos eléctricos separados por un tiempo variable que va desde algunas decenas de microsegundos hasta casi un milisegundo.

Para las pruebas con el generador electrohidráulico, se modificaron sus circuitos para ampliar y correr los tiempos de retardo a valores desde 188 μs y hasta 4190 μs , con una resolución de 8 μs , a fin de probar la respuesta del Mexilit II a distintos órdenes de magnitud del tiempo de retardo entre frentes de choque sucesivos.

El GPR también posee otra función que multiplica la escala completa de tiempo por un factor de 10.4 a fin de que el retardo entre pulsos sea lo suficientemente lento como para ser distinguible “a oído”. Es decir, el sonido de dos disparos separados por apenas unos cuantos milisegundos es para el oído humano lo mismo que el sonido de un solo disparo, mientras que dos disparos separados por varias decenas de milisegundos se alcanzan a distinguir muy bien.

Esta modalidad del GPR llamada “retardo audible” es más de carácter cualitativo y para asegurarse ocasionalmente de la doble emisión de ondas de choque, pues para los fines de la lógica tándem un retardo de decenas de milisegundos no es útil. En la figura siguiente se muestra dicho GPR acoplado a los controladores de los interruptores de chispa.



Figura II.11: Instante de la activación de los interruptores de chispa.

Como se puede notar en la figura anterior, el segundo controlador del respectivo interruptor de chispa y el GPR se colocaron fuera de la cabina del equipo. Esto fue para evitar que la luz emitida por el primer interruptor de chispa no accionara por accidente el segundo controlador. En general, los controladores de los interruptores de chispa reciben un pulso de bajo voltaje y corta duración (5 V, 50 μ s); y con él generan inmediatamente otro pulso de alto voltaje para accionar el interruptor de chispa. Por seguridad de los mismos aparatos, este pulso de alto voltaje debe estar eléctricamente aislado del generador de pulsos (o del GPR), por lo que en su diseño incorporan un optoacoplador; es decir, un convertidor de pulsos eléctricos a ópticos y de ópticos a eléctricos. Así, a la entrada del controlador llega un pulso eléctrico, se transforma y entra al aparato como un pulso óptico, y se vuelve a convertir a eléctrico para producir el pulso de alto voltaje. Un curioso acontecimiento ocurrió al tomar fotografías del equipo, ya que el “flash” de la cámara accionó el optoacoplador del controlador externo disparando inmediatamente su interruptor de chispa, que a su vez iluminó el controlador interno provocando el segundo disparo. En la figura II.11 se aprecia la descarga de ambos interruptores de chispa, que a falta de un sincronizador para la cámara hubiese sido imposible de captar en fotografía. Este suceso marcó la importancia de aislar de fuentes ajenas de luz los controladores de los interruptores de chispa.

Capítulo III

Resultados y discusión

Como se describió en el capítulo anterior, la cámara de video de alta velocidad fue el principal instrumento de medición utilizado para determinar el tiempo empleado por el generador electrohidráulico en la emisión de los diversos frentes de choque. Dicha cámara se mantuvo en toda la experimentación con una velocidad de grabación de 14100 cuadros por segundo, lo que en consecuencia proporcionó un tiempo de 70.92 μs entre imágenes consecutivas. Con ello, al contar el número de cuadros comprendidos entre el inicio de la generación de cada frente de choque (producción de la descarga eléctrica) y el estado en que la bujía del generador regresaba a sus condiciones iniciales, se logró obtener cada tiempo de interés como un múltiplo de dicho tiempo base.

Para ilustrar lo anterior, en el apéndice I de esta tesis se muestra una secuencia de 104 imágenes consecutivas, correspondientes a la generación de un frente de choque con 16 kV en 80 nF de capacidad. Tal secuencia, aunque algo larga en forma impresa, es interesante y permite hacer inferencias bajo evidencia fotográfica sobre la formación de los frentes de choque por el método electrohidráulico, aparte de que no se tiene conocimiento de que una secuencia como esta se haya filmado anteriormente. Para los propósitos de este capítulo, en la figura III.1 se muestra un resumen de dicha secuencia, que contiene 20 imágenes consideradas como representativas de la misma. Estas últimas siguen dispuestas en orden cronológico (a, b, c, d, etc.), pero no necesariamente son fotogramas consecutivos de la secuencia original, según se indica al pie de cada uno de ellos con los respectivos números de cuadro originales.

En los párrafos siguientes se explican los fenómenos detectados y la temporalidad de los mismos, para después presentar los resultados y el análisis sobre los frentes de choque generados bajo diversas condiciones de energía liberada (variaciones de voltaje y capacidad), incluyendo la dependencia con la conductividad eléctrica del medio (agua). Se finaliza el capítulo con los resultados obtenidos para el sistema tándem electrohidráulico.

III.1 Fotogramas de la generación electrohidráulica de un frente de choque

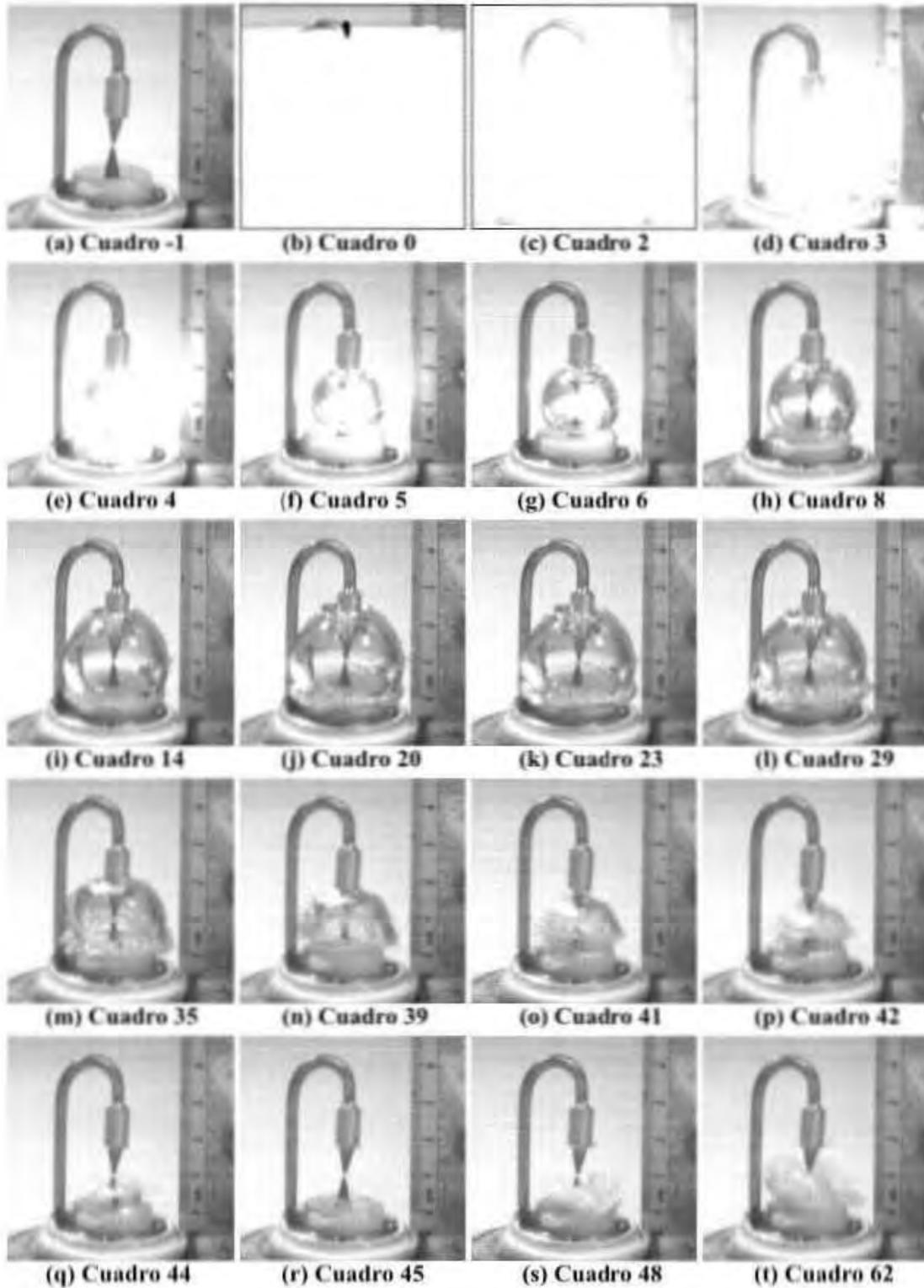


Figura III.1 Imágenes representativas de una descarga eléctrica a 16 kV en 80 nF de capacidad, y la consecuente formación de plasma . La secuencia completa se encuentra en el apéndice I. En los incisos siguientes se describen los aspectos correspondientes a cada fotograma.

- a) Estado inicial de la bujía, 70.9 μs antes de la descarga, por lo que este cuadro se etiquetó como “-1”.
- b) Momento de la descarga eléctrica, considerado como el origen del tiempo a medir (cuadro 0). La luz emitida casi saturó el sensor de la cámara. El cuadro 1, no mostrado, fue una imagen completamente en blanco indicando intensidad luminosa suficiente para saturar completamente al sensor de la cámara.
- c) El cuadro 2, 141.8 μs después de la descarga, permite distinguir parte del gancho de la bujía, indicando menor intensidad luminosa que en la imagen anterior.
- d) A 212.7 μs después de ocurrida la descarga eléctrica (cuadro 3), el plasma es aún muy intenso y su brillo no deja ver mucho, lo cual continúa en la imagen (e) siguiente (cuadro 4), aunque en menor grado.
- f) El plasma, en proceso de extinción, se nota dentro de una burbuja de vapor de agua en expansión, lo cual es confirmado por las imágenes (g), (h), (i) y (j) siguientes (cuadros 6, 8, 14 y 20).
- k) A 1631.2 μs de tiempo transcurrido (cuadro 23), el plasma ya se extinguió completamente y la burbuja está en su expansión máxima, a punto de empezar a colapsar.
- l) Esta imagen y las (m), (n), (o) y (p) siguientes (cuadros 29, 35, 39, 41 y 42), muestran el proceso de colapso de la burbuja, comprimiéndose el vapor de agua en su interior.
- q) Lo que queda de la burbuja está a punto de desaparecer (cuadro 44).
- r) En este cuadro 45 (a 3191.4 μs de tiempo transcurrido), la bujía y el medio circundante regresan a un estado muy similar al inicial, que sólo es aparente y transitorio, ya que la imagen siguiente (s, cuadro 48) muestra que el vapor de agua antes comprimido empieza a generar turbulencia en el agua líquida circundante.
- s) La turbulencia ocasionada por el colapso de la burbuja se manifiesta por pequeñas burbujas de vapor de agua que se esparcen alrededor de los electrodos y alcanzan un volumen máximo en la imagen (t) correspondiente al cuadro 62. Después, según se muestra en el apéndice I, la turbulencia como tal desaparece hasta el cuadro 70, quedando sólo residuos de la misma que duran hasta el cuadro 102 (a 7234 μs después de la descarga), donde se puede decir que el agua entre los electrodos de la bujía prácticamente regresó a su estado inicial.

Por otra parte y para complementar lo anterior, cabe recordar el perfil de un pulso de presión concentrada como el mostrado en la figura III.2, el cual es rutinariamente obtenido en el Laboratorio de Ondas de Choque para el mismo generador, a los mismos valores de descarga,

pero utilizando un reflector elipsoidal con parámetros: $a = 13.91$ cm, $b = 7.81$ cm y $c = 11.51$ (ver sección I.3.1); es decir, con 27.82 cm de distancia total de recorrido para el frente de choque.

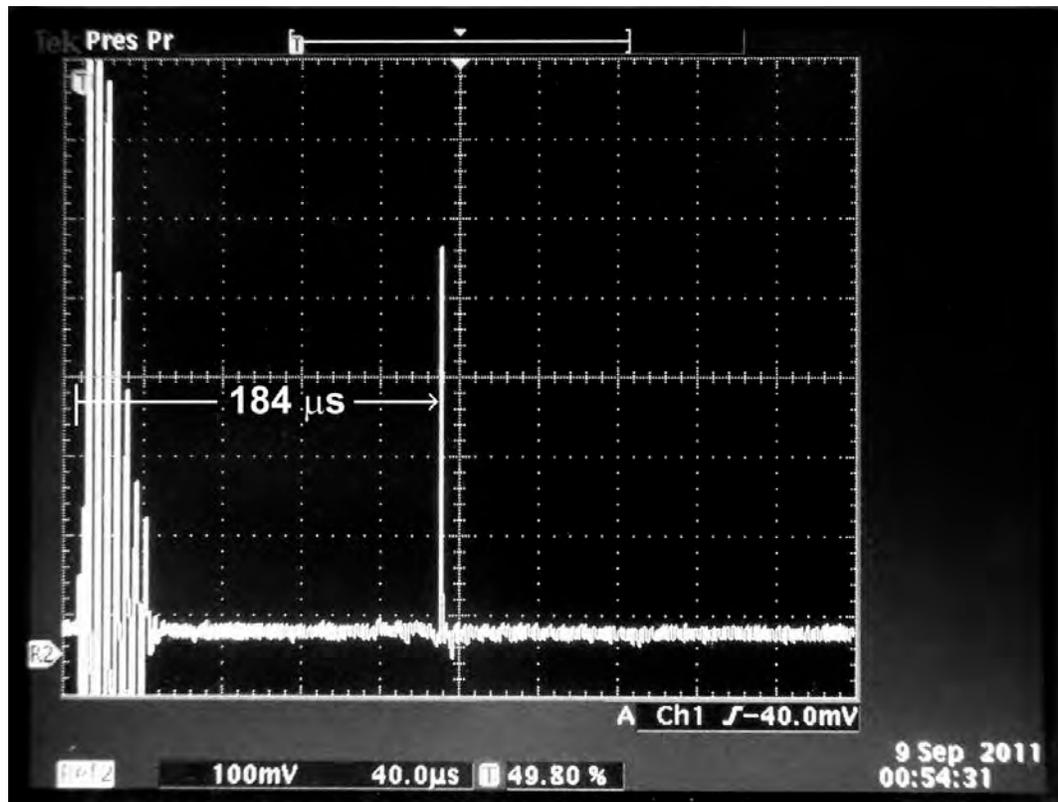


Figura III.2 Perfil típico de presión concentrada del generador Mexilit II, para 10.24 J de energía liberada (16 kV en 80 nF de capacidad).

El registro de dicho oscilograma fue mediante un hidrófono marca Imotec, modelo 80-0.5-4.0, con sensibilidad de 1.486 mV/bar; el cual fue ubicado en el foco exterior del reflector elipsoidal. Tal oscilograma es útil tanto para conocer la magnitud del pico de presión (concentrada) obtenido en cada frente de choque emitido, como para constatar que el agua utilizada como medio de generación y propagación de los mismos, mantenga generalmente las mismas propiedades. Esto último es de particular interés, pues el tiempo que se registra entre el inicio de la descarga eléctrica (parte izquierda de la figura anterior) y el pico de presión obtenido (parte central de la figura), debe ser una constante que no debe variar en más de 4 μ s alrededor de los 184 μ s mostrados. Es decir, el cociente de la distancia de recorrido del frente de choque

entre tal tiempo ($27.82 \text{ cm}/184 \mu\text{s} \approx 1512 \text{ m/s}$), proporciona la velocidad de propagación, que normalmente debe ser constante a menos que cambien las propiedades del medio.

Con lo anterior y los fotogramas de la figura III.1 antes comentados, se tienen ya los elementos necesarios para comparar los resultados obtenidos con las descripciones hechas en la sección I.2.2, sobre la generación de un frente de choque por el método electrohidráulico ^[5]. Al respecto, se pueden mencionar los puntos siguientes:

1º. La descarga eléctrica cuyo inicio fue capturado en el fotograma (b) de la figura III.1 (cuadro 0), originó un plasma que se expandió muy rápido (en el orden de μs o menos) hasta un volumen máximo, donde generó propiamente al frente de choque, que se empezó a propagar en el medio líquido. Es decir, al término del tiempo de captura de dicho cuadro ($70.92 \mu\text{s}$), el frente de choque ya debió estar relativamente alejado de la bujía, pues dicho tiempo de captura es de casi la mitad del tiempo de recorrido mostrado en el oscilograma de la figura III.2, para un frente de choque concentrado.

2º. El cuadro 1, no mostrado en la figura III.1 (ver apéndice I), indicó la existencia de luminosidad suficiente para mantener todavía saturado al sensor de la cámara, durante otros $70.92 \mu\text{s}$, hasta que al término del cuadro 2 se empieza a notar parte del entorno, lo cual es más claro hasta el cuadro 3. El tiempo transcurrido al término de este último, ya sobrepasó el tiempo de recorrido de un frente de choque concentrado, pero la intensidad luminosa y el plasma todavía prevalecen aunque con menor intensidad, debido a su proceso de extinción que es confirmado por los tres cuadros siguientes (4, 5 y 6) donde ya es notable la presencia de la burbuja de vapor de agua en proceso de expansión. En otras palabras, después de emitido el frente de choque, el plasma toma un tiempo relativamente largo en extinguirse mientras la burbuja de vapor de agua tarda un tiempo aún mayor para expandirse hasta alcanzar su volumen máximo (cuadro 23), en más de $1600 \mu\text{s}$ posteriores al inicio de la descarga eléctrica.

3º. Adicionalmente a lo anterior, el proceso de colapso de la burbuja de vapor de agua consume un tiempo similar al de su expansión, ya que las condiciones iniciales en la región de la bujía se volvieron a notar hasta los cuadros 45 y 46, que no obstante de ser estados transitorios

y previos a la turbulencia mencionada, podrían permitir una segunda descarga eléctrica y la consecuente emisión de un segundo frente de choque. Para esto se requiere un retardo de aproximadamente 3200 μs , tiempo que indudablemente resultó muy grande en comparación con los retardos del sistema tándem (200 a 400 μs) que permiten aprovechar los efectos de la cavitación acústica.

4º. Como consecuencia del colapso de la burbuja de vapor, a partir del cuadro 47 (ver apéndice I) se notó turbulencia en el agua circundante a los electrodos de la bujía, revolviendo el medio y esparciendo una nube de burbujas de vapor que tarda todavía más tiempo en disolverse. En el cuadro 62 se aprecia el máximo volumen de esta nube de burbujas relativamente densa, la cual regresa a un mínimo por el cuadro 70, para después repetirse a menor densidad y alcanzar máximo volumen (menor al anterior) por el cuadro 78, con nueva atenuación en el cuadro 80 y así sucesivamente hasta el cuadro 102 (a un tiempo de 7.2 ms), a partir del cual ya se volvió a notar el estado inicial de la bujía en forma estable.

En resumen, se puede decir que el proceso que genera el frente de choque (descarga eléctrica y formación del plasma) es un evento muy corto (del orden de μs o menos), pero las secuelas que quedan del mismo causan fenómenos en la región de generación (colapso del plasma, expansión y colapso de la burbuja de vapor de agua y formación de una nube de burbujas) cuya duración es del orden de ms. Esto último -como ya se mencionó-, hace imposible el aprovechamiento del generador electrohidráulico en la modalidad tándem descrita en la sección I.4 del capítulo I, para el generador de tipo piezoeléctrico. Si bien el éxito del modo tándem en el generador piezoeléctrico se debe a la rápida respuesta y recuperación de los cristales del mismo nombre, en forma más general se puede decir que en tal caso la perturbación abrupta (causante del frente de choque) es de tipo electro-mecánico, mientras que en el generador electrohidráulico se puede calificar como “electro-termo-mecánica”, donde la parte térmica es la de mayor duración en el proceso de recuperación.

Para concluir esta sección, cabe mencionar que los resultados y el análisis hasta ahora presentados corresponden a un solo frente de choque generado con parámetros típicamente usados en la litotricia extracorpórea (16 kV en 80 nF de capacidad), por lo que los tiempos

mencionados no pueden todavía generalizarse a otros parámetros de generación. Tampoco podrían asignarse a otros frentes de choque emitidos de igual forma, por la alta variabilidad (hasta un 35%) inherente a los mismos, según lo comentado al final de la sección I.2.2 del capítulo I.

En las secciones siguientes se presentan y se discuten los resultados de experimentos realizados con otros parámetros, a fin de determinar sus relaciones con el tiempo de recuperación del generador. Para ello, este tiempo se definió como la duración de un evento principal, o evento de recuperación, que comprende desde la detección de la descarga eléctrica (figura III.1-b, cuadro 0), hasta el momento en que la burbuja de vapor ha colapsado en su totalidad justo antes de formarse la nube de burbujas (figura III.1-r, cuadro 45). Es decir, de ahora en adelante cada vez que se mencione la palabra “evento”, es con referencia a dicho proceso de recuperación, sin considerar la turbulencia y formación de la nube de burbujas posterior.

También es de anticipar que los resultados que se muestran en las secciones siguientes, son valores numéricos tabulados y graficados que sintetizan análisis extensos y minuciosos de las secuencias de fotogramas correspondientes a cada experimento, con la debida estadística en cada uno de ellos. Cada valor de tiempo (t) reportado es un promedio de 10 mediciones del mismo evento en cada experimento (salvo otra especificación), a fin de tener resultados representativos de cada combinación de variables. Por lo mismo, también se incluyen los coeficientes de variación porcentuales ($CV[\%] = 100$ veces la desviación estándar entre el promedio) correspondientes a cada tiempo, recordando que la propagación de los errores sistemáticos fue ya considerada en la sección II.4 del capítulo anterior.

III.2.- Temporalidad en función del voltaje y la capacidad

Conforme a la planeación descrita en la sección II.5 del capítulo anterior, se realizaron 44 experimentos básicos para investigar el comportamiento del tiempo de recuperación del generador ante variaciones del voltaje y de la capacidad, los cuales se repartieron en 4 grupos de esta última (40, 80, 120 y 160 nF) y en cada grupo se varió el voltaje desde 16 kV hasta 26 kV,

en pasos de 1 kV, pero en tres etapas distintas (ver cronograma de la figura II.8), para evitar descargas erráticas a bajos voltajes, debidos al desgaste de la bujía.

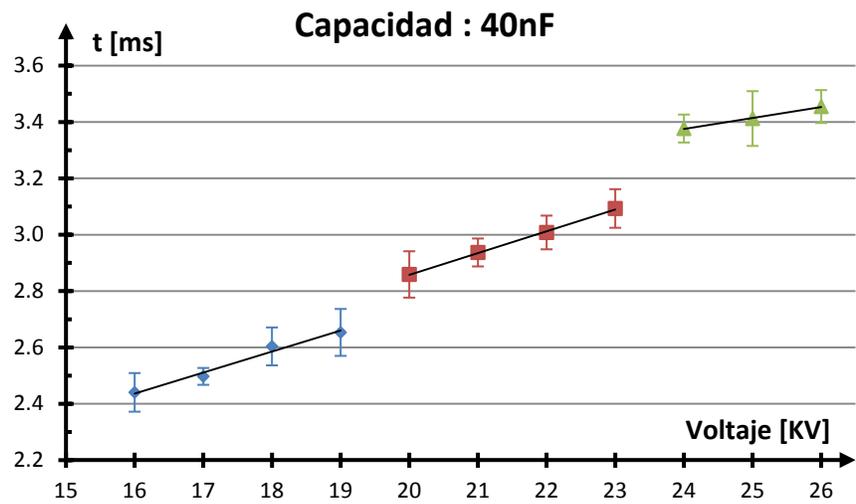
La primera etapa, llamada de bajos voltajes, inició con el menor valor de capacidad (40 nF), con la que se hicieron los primeros cuatro experimentos correspondientes a los voltajes: 16, 17, 18 y 19 kV, para después cambiar la capacidad al valor de 80 nF y efectuar los siguientes 4 experimentos (del 5 al 8) correspondientes a los mismos voltajes anteriores y así sucesivamente hasta terminar con el experimento 16 en el que se utilizaron 19 kV en 160 nF de capacidad.

La segunda etapa (de medianos voltajes) fue similar a la anterior, pero utilizando los voltajes: 20, 21, 22 y 23 kV en cada valor de capacidad; es decir, esta inició con el experimento 17, a 20 kV en 40 nF, y terminó con el experimento 32 efectuado con 23 kV en 160 nF. La tercera y última etapa (de altos voltajes) fue análoga a las anteriores, usando en esta sólo los tres valores de voltaje restantes (24, 25 y 26 kV) para cada una de dichas capacidades, empezando con 40 nF a 24 kV (experimento 33) y terminando con el experimento 44 (26 kV en 160 nF).

Con tal procedimiento, se lograron reunir 11 valores distintos de voltaje para cada uno de los cuatro valores de capacidad mencionados, evaluando -estadísticamente- el tiempo de recuperación del generador en cada uno de los 44 experimentos. Los resultados al respecto se muestran en las cuatro gráficas (y tablas respectivas) siguientes, correspondientes a cada valor de capacidad.

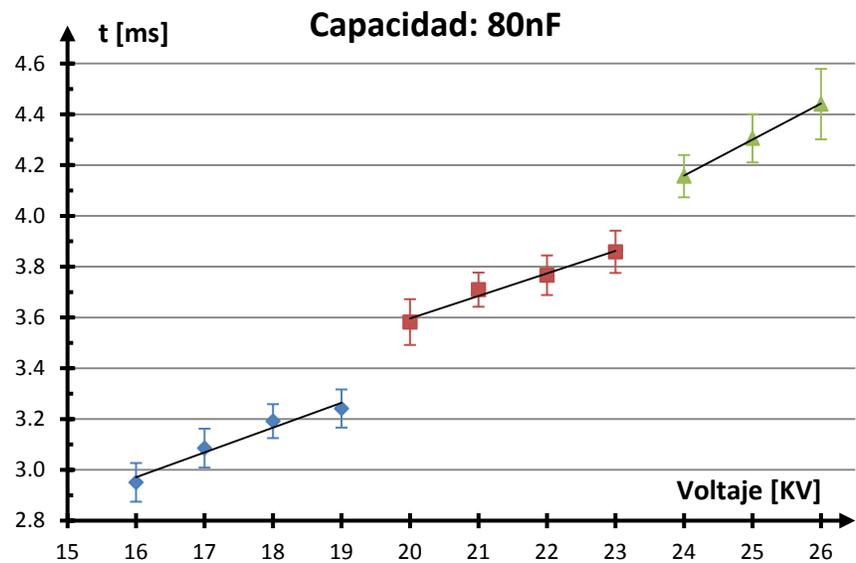
Por simplicidad, el origen de las gráficas no coincide con el origen de coordenadas pues cerca de este último y hasta los valores más bajos desplegados en las gráficas no hay datos recabados.

V [kV]	t [ms]	CV [%]
16	2.440	2.81
17	2.497	1.20
18	2.603	2.59
19	2.653	3.14
20	2.858	2.88
21	2.937	1.69
22	3.007	1.99
23	3.093	2.22
24	3.376	1.47
25	3.412	2.85
26	3.454	1.69



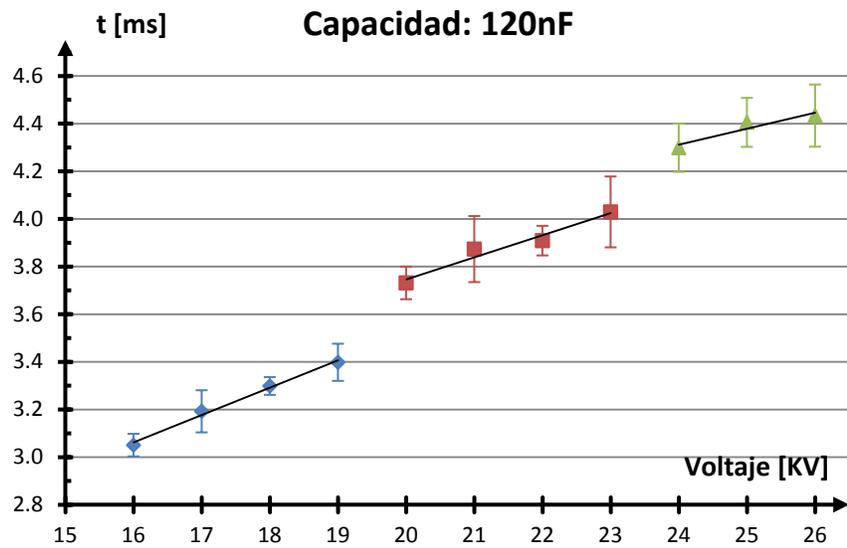
Gráfica III.1 Tiempo de recuperación contra variación de voltaje, en 40 nF de capacidad.

V [kV]	t [ms]	CV [%]
16	2.951	2.58
17	3.085	2.48
18	3.192	2.10
19	3.242	2.32
20	3.582	2.51
21	3.71	1.81
22	3.766	2.07
23	3.859	2.16
24	4.157	2.00
25	4.305	2.20
26	4.440	3.12



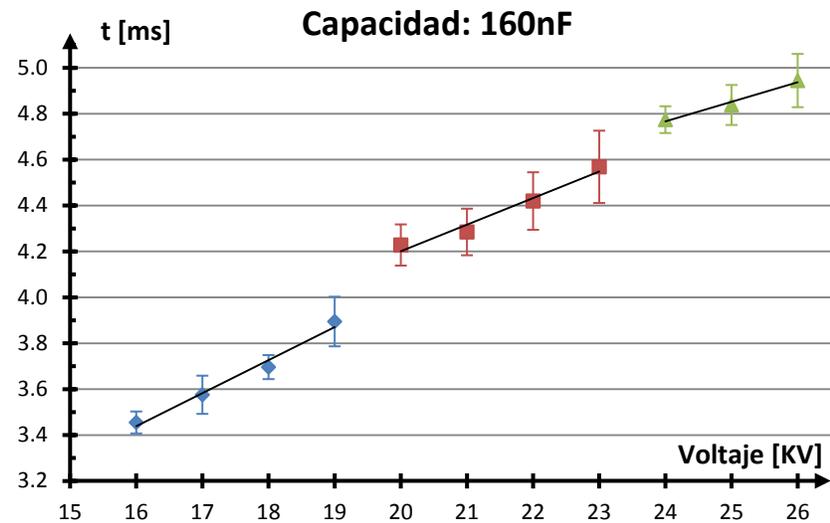
Gráfica III.2 Tiempo de recuperación contra variación de voltaje, en 80 nF de capacidad.

V [kV]	t [ms]	CV [%]
16	3.050	1.55
17	3.192	2.77
18	3.298	1.13
19	3.398	2.30
20	3.731	1.84
21	3.873	3.59
22	3.908	1.59
23	4.029	3.70
24	4.298	2.36
25	4.405	2.33
26	4.433	2.95



Gráfica III.3 Tiempo de recuperación contra variación de voltaje, en 120 nF de capacidad.

V [kV]	t [ms]	CV [%]
16	3.454	1.39
17	3.575	2.33
18	3.695	1.42
19	3.894	2.78
20	4.227	2.12
21	4.284	2.37
22	4.419	2.84
23	4.568	3.45
24	4.774	1.22
25	4.837	1.80
26	4.944	2.35



Gráfica III.4 Tiempo de recuperación contra variación de voltaje, en 160 nF de capacidad.

Todas las gráficas anteriores presentaron la particularidad de cambiar su línea de tendencia según la etapa en que se fueron obteniendo los resultados. Es decir, se detectaron diferencias muy marcadas entre los resultados obtenidos a bajos voltajes (etapa 1) con respecto a los de mediano voltaje (etapa 2), los cuales a su vez también se distinguieron de los obtenidos a altos voltajes (etapa 3). Por ello, en cada una de dichas gráficas se usaron tres líneas de tendencia para hacer notar este efecto, que indudablemente tiene que ver con el desgaste de la bujía y se discute posteriormente. Dada esta aclaración, a continuación se analiza el comportamiento del tiempo de recuperación del generador contra la variación del voltaje de descarga en dichas capacidades.

III.2.1.- Dependencia de la temporalidad con el voltaje de descarga

El primer aspecto notado en las gráficas anteriores fue la linealidad que presentaron en cada una de las etapas de medición, por lo que se ajustaron rectas correspondientes a cada segmento graficado. Las expresiones analíticas obtenidas se resumen en la tabla siguiente, incluyendo los respectivos coeficientes de determinación (coeficientes de correlación al cuadrado).

Capacidad:	40 nF	80 nF	120 nF	160 nF
Ecs. de bajo voltaje:	$t = 0.074V + 1.245$	$t = 0.098V + 1.404$	$t = 0.115V + 1.223$	$t = 0.144V + 1.135$
Coeficiente r^2 :	0.980	0.963	0.993	0.983
Ecs. de mediano V:	$t = 0.077V + 1.311$	$t = 0.089V + 1.823$	$t = 0.093V + 1.887$	$t = 0.116V + 1.889$
Coeficiente r^2 :	0.999	0.978	0.957	0.966
Ecs. de alto voltaje:	$t = 0.039V + 2.439$	$t = 0.142V + 0.754$	$t = 0.067V + 2.694$	$t = 0.085V + 2.724$
Coeficiente r^2 :	0.997	0.999	0.899	0.980

Tabla III.1: Ecuaciones y coeficientes de determinación de las rectas asociadas a los segmentos de las gráficas III.1 a III.4. Las unidades para el voltaje (V) y el tiempo (t), son respectivamente kV y ms.

Al comparar las pendientes de las rectas en una misma capacidad, no hay mucha diferencia entre las obtenidas en la primera y segunda etapa de mediciones, pero las obtenidas para altos voltajes sí muestran discrepancias mayores indicando nuevamente la intervención del desgaste de la bujía.

Los coeficientes de determinación obtenidos en la mayoría de los casos (superiores al 95%), permiten asegurar que la duración del evento es directamente proporcional al voltaje utilizado, dentro de cada intervalo de medición. La capacidad de 120 nF en altos voltajes fue el único resultado en que dicho coeficiente tuvo un valor inferior al 90%, pero en esta y en la de 160 nF se detectaron problemas debidos a su instalación, los cuales se comentan a en la sección siguiente.

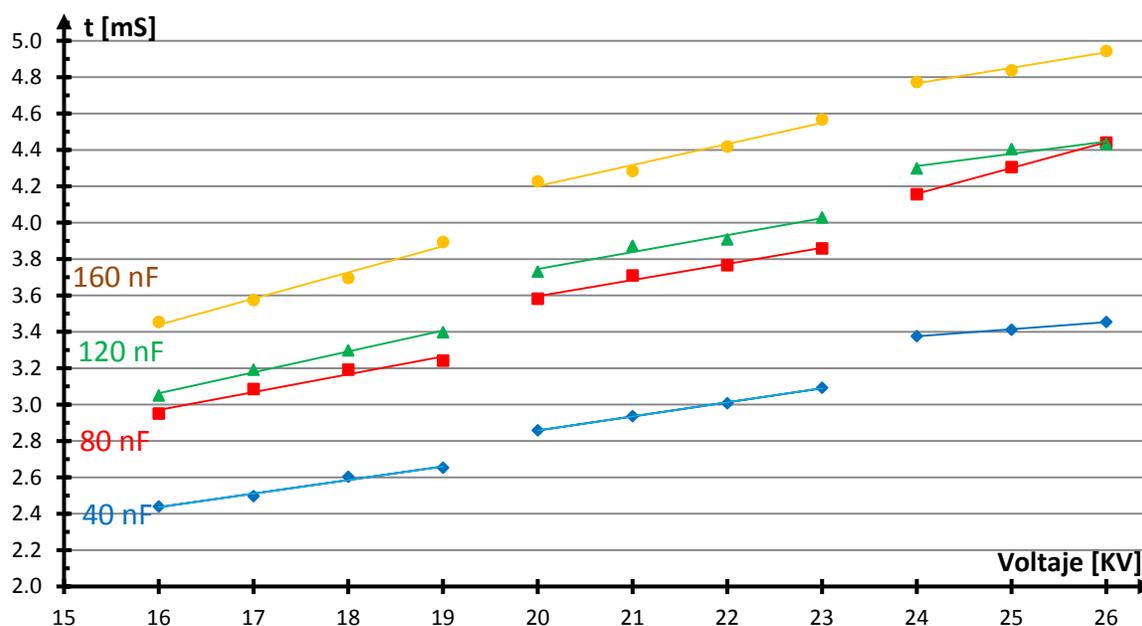
III.2.2.- Dependencia de la temporalidad con la variación de capacidad

En la tabla III.1 anterior, al comparar las ecuaciones de las rectas obtenidas en una misma etapa de medición, se aprecia que al aumentar la capacidad, la pendiente de la recta también aumenta. Por ejemplo, para el caso de bajo voltaje, las pendientes asociadas a 40, 80, 120 y 160 nF son respectivamente 0.074, 0.098, 0.115 y 0.144 ms/kV. Lo análogo ocurre para las rectas de mediano voltaje, pero en los valores de la etapa 3 la capacidad de 80 nF rompe con esta regularidad, no obstante de haber sido uno de los dos casos en que se obtuvo el coeficiente de determinación más alto, aunque hay que tener presente que la mayoría de los segmentos de recta (etapas 1 y 2) constan de sólo 4 puntos y en la etapa de altos voltajes se utilizaron 3 puntos.

Otro aspecto interesante se nota cuando las cuatro gráficas anteriores se muestran en un mismo sistema de coordenadas tiempo-voltaje, como se muestra en la gráfica III.5. Ahí se puede ver que las rectas situadas en mayores valores de la escala del tiempo corresponden a los de capacidades más altas, pero la separación temporal entre las mismas, esperada por los cambios de capacidad, no refleja la uniformidad de variación de esta última. Es decir, la mayor separación se presentó entre las capacidades de 40 y 80 nF, mientras la mínima entre los

valores de 80 y 120 nF, quedando como separación intermedia la de 120 y 160 nF, no obstante que dichos cambios fueron en pasos de 40 nF.

Lo anterior está relacionado con el montaje experimental de las capacidades mayores a 80 nF, y quizás fue ocasionado por efectos considerables de inducción electromagnética durante la ocurrencia de las descargas eléctricas en dichas capacidades, lo cual no fue previsto en esta parte de la experimentación. A continuación se da una posible explicación al respecto.



Gráfica III.5 Tiempo de recuperación del generador contra variación de voltaje, para las capacidades de 40, 80, 120 y 160 nF.

Como se muestra en la figura II.5 del capítulo II, el banco de capacitores del Mexilit II (80 nF) fue diseñado, construido y conectado en forma simétrica y lo más cercano posible al interruptor de chispa, para disminuir en lo posible los efectos inductivos ^[7] durante las descargas eléctricas, ya que estas también generan radiación electromagnética intensa en el entorno de tales componentes. Por ello, los capacitores, el interruptor de chispa y los conectores a la bujía se encuentran ubicados en un compartimiento bajo la tina de pruebas,

cuyas paredes son blindajes conectados a tierra física, a fin de evitar que dicha radiación alcance el exterior en forma considerable.

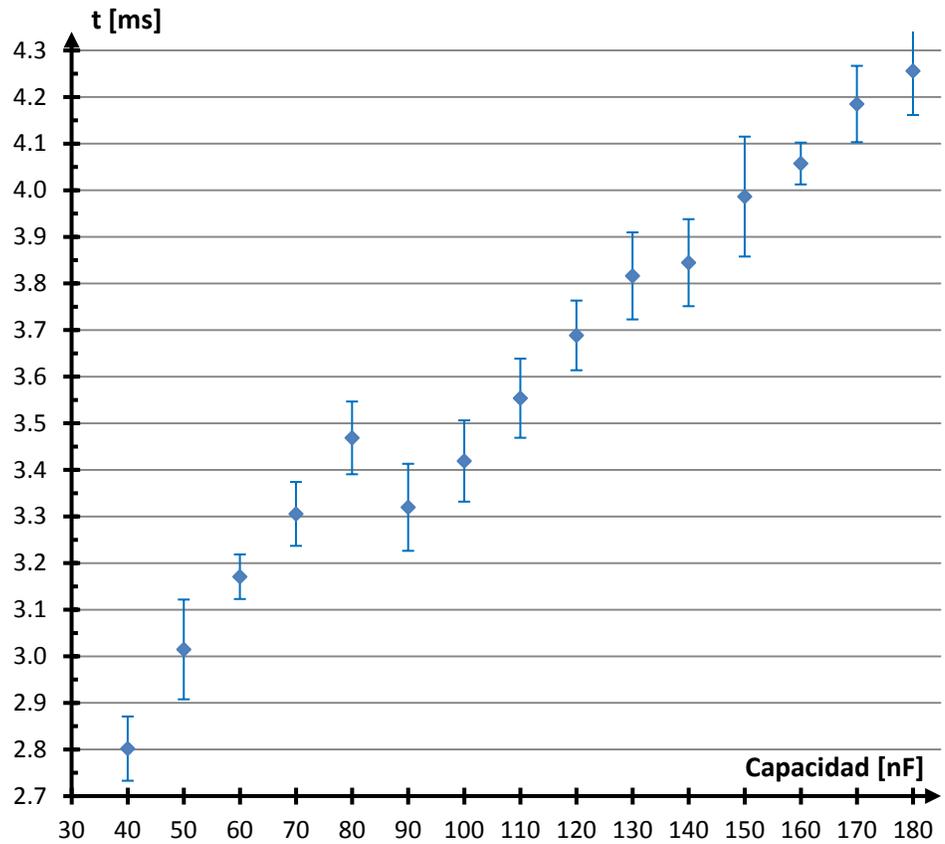
En el interior del compartimiento, cada descarga involucra una muy alta corriente momentánea (más de 100 A) que fluye por los contactos metálicos del banco de condensadores hasta llegar al interruptor de chispa, donde literalmente los electrones deben brincar de un polo a otro mediante un arco voltaico que desde luego también emite radiación electromagnética, inclusive en la parte visible del espectro. Los campos electromagnéticos producidos, aunque momentáneos, también son intensos y a su vez inducen corrientes en todos los elementos eléctricos a su alrededor. Los condensadores de 50nF (y sus conectores) que se agregaron para modificar dicha capacidad original (ver figura II.6), estuvieron expuestos a dicha radiación electromagnética, a escasos 20 cm de distancia de los capacitores originales.

Esto último permite elucubrar sobre la existencia de efectos inducidos, que por las fuerzas de tipo contra-electromotriz inherente a los mismos, produjeron una especie de apantallamiento a la capacidad total del generador, dando como resultado un aumento menos pronunciado e incluso la disminución en la duración de los eventos, al acoplar uno o los dos capacitores de 50 nF.

Tanto para confirmar dichos efectos inesperados como para tener una mayor cantidad de muestras en la variación de capacidad, se realizó un nuevo experimento en el que esta última se varió desde 40 nF hasta 180 nF, pero en pasos de 10 nF. El voltaje se mantuvo fijo en 21 kV, por ser este el valor medio entre 16 y 26 kV (valores extremos usados en la realización de este trabajo).

Los datos obtenidos se resumen en la gráfica siguiente, acompañada de la tabla respectiva.

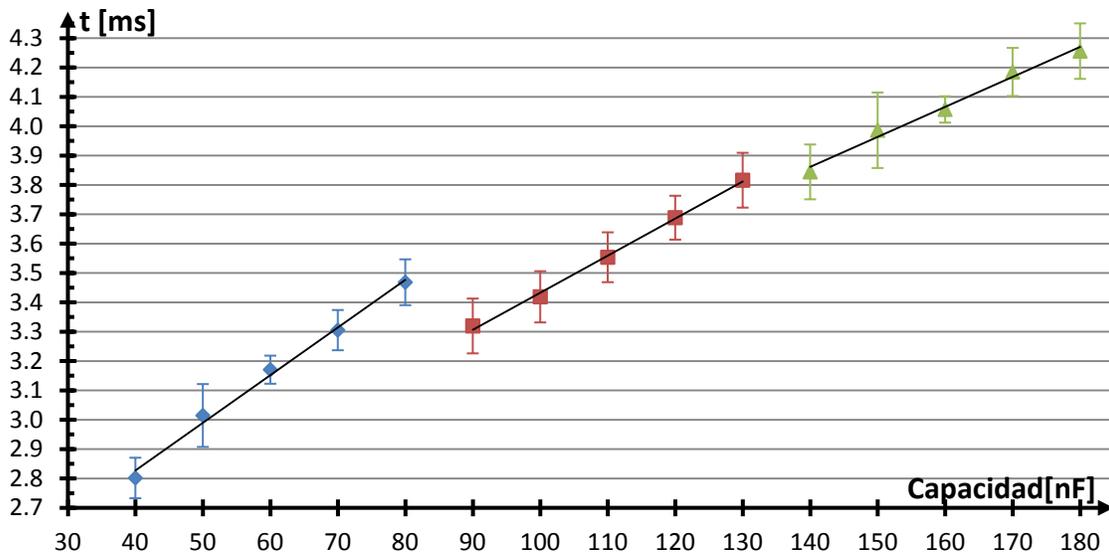
C [nF]	t [ms]	CV [%]
40	2.802	2.46
50	3.015	3.55
60	3.171	1.51
70	3.305	2.07
80	3.468	2.25
90	3.320	2.81
100	3.419	2.55
110	3.554	2.39
120	3.688	2.03
130	3.816	2.45
140	3.844	2.43
150	3.986	3.23
160	4.057	1.11
170	4.185	1.96
180	4.256	2.22



Gráfica III.6 Tiempo de recuperación del generador contra variación de capacidad, a 21 kV de voltaje fijo.

La gráfica anterior inicia con un comportamiento aproximadamente lineal y nuevamente se aprecia que en el paso de los 80 a los 90 nF (que es cuando se acopló un primer capacitor de 50 nF y se removieron 4 capacitores de 10 nF), la duración del evento disminuye en 0.148 ms, para después continuar aumentando de manera lineal conforme se van adicionando los capacitores originales de 10nF. Luego, al pasar de 130 a 140 nF (al montar el segundo capacitor de 50nF y remover 4 de 10nF), vuelve a aparecer una irregularidad en el aumento de la duración, que esta vez no disminuye pero su incremento es tan sólo de 0.028 ms, cuando antes venía aumentando en un promedio de 0.124 ms. Esto vuelve a indicar que al acoplar los otros capacitores al banco original del generador, sin mayor blindaje, produce apantallamiento en la capacidad total y por consiguiente una disminución en la duración de los eventos.

Fuera de tales cambios irregulares, el resto de la gráfica presentó tendencias lineales, por lo que esta se analizó en tres segmentos separados según se ilustra en la gráfica III.7. En la tabla III.2 posterior, se incluyen las expresiones analíticas y coeficientes de determinación correspondientes, los cuales muestran como cada segmento se ajusta con muy buena aproximación a una recta e incluso mejor que en el caso de la dependencia con el voltaje.



Gráfica III.7 Segmentación lineal de la dependencia del tiempo de recuperación del generador contra variaciones de capacidad.

Capacidad:	40-80 [nF]	90-130 [nF]	140-180 [nF]
Ecuación obtenida:	$t = 0.016C + 2.178$	$t = 0.012C + 2.171$	$t = 0.010C + 2.432$
Coefficiente r^2 :	0.993	0.997	0.987

Tabla III.2 Ecuaciones y coeficientes de determinación de las rectas asociadas a los segmentos de la gráfica anterior. Las capacidades (C) están dadas en nF y el tiempo (t) en ms.

III.3.- Temporalidad en función de la conductividad eléctrica del agua y consideraciones sobre el desgaste de la bujía del generador

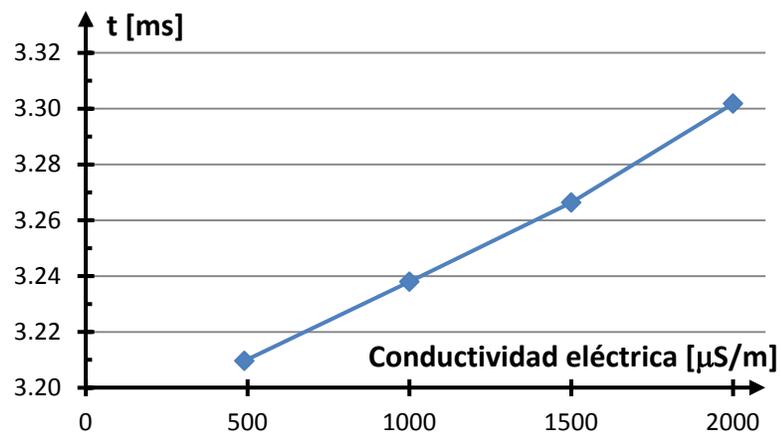
Si bien el voltaje y la capacidad son las principales variables de las cuales depende el tiempo de recuperación del generador, hay involucradas otras variables como la temperatura

del agua, su conductividad eléctrica, la presión hidrostática, etc., que en menor grado podrían afectar dicha temporalidad. En este trabajo se hizo un breve estudio de la dependencia sólo con la conductividad eléctrica del agua, pues de dichas variables secundarias se supuso que esta podría producir efectos detectables, porque aumentos en la misma disminuyen la resistencia entre los electrodos de la bujía, lo que en consecuencia reduce la constante de tiempo de la descarga eléctrica.

Para efectos de lo anterior se midió el tiempo de recuperación del generador para cuatro valores distintos de la conductividad eléctrica del agua, manteniendo constantes el voltaje y la capacidad en 21 kV y 80 nF respectivamente. Se utilizó una bujía nueva y en cada valor de conductividad se tomaron 20 descargas para tener promedios representativos de dicho tiempo, dado que se esperaba poca variación en la misma. Tal expectativa se basó en que al afectar directamente sólo la constante de tiempo de la descarga eléctrica (que es del orden de μs o menor), sus efectos en los procesos termodinámicos posteriores (plasma, burbuja de vapor de agua, etc.) no necesariamente tienen que ser detectables, ya que estos últimos alcanzan el orden de los milisegundos.

Comúnmente se usa agua ordinaria de la red de distribución en el laboratorio (agua de la llave) para llenar la tina de pruebas del generador. Su conductividad eléctrica fue medida con una sonda TDS TESTER 3TM, instrumento digital que al sumergir sus electrodos en un medio líquido indica la conductividad eléctrica del mismo en un intervalo de 0 a 1990 $\mu\text{S}/\text{m}$ (micro-siemens/metro). Cuenta con una resolución única de 10 $\mu\text{S}/\text{m}$ por lo que se asociaron a todas las mediciones hechas con este conductímetro una incertidumbre de $\pm 5 \mu\text{S}/\text{m}$. Se empezaron las mediciones del tiempo de recuperación del generador a partir de la conductividad eléctrica inicial del agua, que resultó de $490 \pm 5 \mu\text{S}/\text{m}$, incrementando después tal valor al agregar cantidades precisas de sal de mesa. Se hizo un ensayo previo sobre dilución de la misma en agua, para obtener una razón masa de sal/conductividad, de tal forma que para el volumen de 294 litros de agua contenida en la tina de pruebas del generador, fue necesario diluir 90.03 gr de sal para aumentar en 500 $\mu\text{S}/\text{m}$ la conductividad del medio líquido. Los resultados obtenidos se muestran en la gráfica siguiente, que incluye su respectiva tabla.

C [μ S]	t [ms]	CV [%]
490	3.210	2.47
1000	3.238	3.43
1500	3.266	2.17
1990	3.302	1.91



Gráfica III.8 Tiempo de recuperación del generador contra variación de la conductividad eléctrica del agua, a 21 kV en 80 nF de capacidad.

En la gráfica anterior se observa que el tiempo de recuperación del generador aparentemente se incrementa en forma lineal con el aumento de la conductividad eléctrica del agua, a razón de 0.031 ms (en promedio) por cada paso de prácticamente 500 μ S/m. Se usa el término “aparentemente”, porque una razón de cambio tan pequeña podría no ser debida a dicha variación de conductividad, sino más bien ocasionada por el desgaste de la bujía; es decir, por el mismo efecto que rompe con la continuidad de los resultados mostrados en las gráficas III.1 a III.5, sobre la dependencia con el voltaje de descarga.

Como se anticipó en la sección III.2, se sospechó del desgaste de la bujía como agente de variación, porque dichas gráficas mostraron cambios en sus líneas de tendencia precisamente al terminar una etapa de medición e iniciar la siguiente. En la gráfica III.5 se puede ver que todas las interrupciones ocurrieron tanto al cambiar de 19 a 20 kV como en el paso de 23 a 24 kV, que respectivamente correspondieron a las transiciones de bajo a mediano voltaje (etapas 1 a 2) y de mediano a alto voltaje (etapas 2 a 3). La inferencia sobre el desgaste de la bujía es atribuible a la forma no completamente secuencial en que se varió el voltaje en cada uno de los cuatro valores de capacidad analizados. De acuerdo al cronograma de la figura II.8 (capítulo II), en la etapa 1 se aplicaron a una misma capacidad -40 nF por ejemplo- los bajos voltajes: 16, 17, 18 y 19 kV para después hacer lo mismo con las capacidades restantes (80, 120 y 160 nF), regresando a la capacidad original -en la etapa 2- con valores de mediano voltaje (20, 21, 22 y 23 kV)

después de 120 descargas intermedias dedicadas a dichas capacidades restantes. Lo análogo ocurrió entre dicha etapa 2 y la 3.

Para confirmar esta hipótesis hubiera sido necesario emplear toda una bujía para analizar los efectos de su desgaste en el tiempo de interés, manteniendo el resto de las variables fijas y controladas. Como lamentablemente no se contó con otra bujía nueva para estos fines, se limitó el análisis a deducir posibilidades al respecto, basadas en los resultados antes obtenidos. Para ello se tomó como premisa que la duración de los eventos debió ser proporcional al voltaje aplicado en todo el intervalo de valores empleado, lo cual se logra al desplazar verticalmente y “hacia abajo” los dos últimos segmentos de cada gráfica, hasta obtener una sola recta (sin brincos intermedios) con la mejor linealidad posible. Así, los dos desplazamientos efectuados en cada caso, dan una estimación del aumento de tiempo provocado por el desgaste de la bujía, bajo la capacidad asociada a cada gráfica. Como se conoce el número de descargas intermedias en las transiciones de las mencionadas etapas de medición, es posible deducir el incremento de tiempo (causado por el desgaste de la bujía) correspondiente a las 20 descargas que se utilizaron como muestras en las mediciones referentes a la variación de la conductividad eléctrica del agua.

En la tabla III.3 se resumen los resultados obtenidos con dicho procedimiento, donde las columnas sombreadas corresponden al incremento estimado en el tiempo de recuperación del generador por cada 20 descargas de la bujía. Cabe aclarar que en estos análisis las variables de voltaje y capacidad no estuvieron fijas como en el caso en que se varió la conductividad del agua, sin embargo los valores de tiempos determinados para el desgaste de la bujía -que oscilan entre 20 y 41 μs - son comparables a los incrementos de tiempo encontrados en la variación de la conductividad eléctrica del agua (31 μs , en promedio).

Obviamente el procedimiento de análisis efectuado es subjetivo y raya en forzar lo esperado, por lo que los comentarios al respecto sólo son útiles como una inferencia sobre los efectos causados por dicho desgaste de la bujía del generador.

Capacidad [nF]	Descargas intermedios en las etapas 1 a 2	Tiempo 1 a 2 debido al desgaste de la bujía [ms]	Tiempo 1 a 2 estimado por cada 20 descargas [ms]	Descargas intermedios en las etapas 2 a 3	Tiempo 2 a 3 debido al desgaste de la bujía [ms]	Tiempo 2 a 3 estimado por cada 20 descargas [ms]
40	120	0.135	0.022	120	0.206	0.034
80	120	0.244	0.041	110	0.206	0.037
120	120	0.218	0.036	100	0.170	0.034
160	120	0.187	0.031	90	0.092	0.020

Tabla III.3 Estimación de tiempos ocasionados por el desgaste de la bujía, mediante la manipulación de los resultados presentados en la gráfica III.5

Tomando en cuenta estas conclusiones sobre el desgaste de la bujía, no se puede asegurar que la conductividad eléctrica del agua en que se generan los frentes de choque, sea una variable relevante en el tiempo de recuperación del generador.

III.4.- Pruebas del sistema tándem en el generador electrohidráulico

No obstante que los tiempos reportados en las secciones anteriores mostraron que el generador Mexilit II no tarda menos de 2.4 ms en regresar a sus condiciones iniciales, se decidió implementar y probar el sistema tándem en el mismo, tanto para verificar operativamente lo anterior como para tratar de detectar posibles efectos adicionales. Como se mencionó en el capítulo I, el modo tándem usado en generadores piezoeléctricos se emplea con retardos comprendidos en el intervalo de 200 a 400 μ s, tiempos en los cuales están colapsando las microburbujas generadas por la cavitación acústica. En las pruebas aquí realizadas, se generaron pulsos tándem con distintos retardos que van desde más de 40 ms hasta menos de 0.2 ms, con el fin de asegurar inicialmente la emisión de los dos frentes de choque sucesivos y observar sus cambios a medida que se reduce el tiempo de retardo entre ellos.

Como se mencionó al final del capítulo anterior, en el sistema tándem ya no se usa la unidad generadora de pulsos del Mexilit II, sino que esta se sustituye por el generador de pulsos retardados (GPR), cuyo potenciómetro de control, de 10 vueltas, es lineal y está escalado mediante un “dial” con vernier (con resolución de centésimas de vuelta), que presenta las equivalencias mostradas en la tabla siguiente.

Posición del dial	Retardo entre pulsos [ms]
0.00	0.188
1.00	0.566
2.00	0.968
3.00	1.374
4.00	1.775
5.00	2.177
6.00	2.582
7.00	2.985
8.00	3.385
9.00	3.787
10.00	4.190
10 + audible	43.576

Tabla III.4 Correspondencia de la lectura del dial o perilla del GPR con el retardo entre pulsos.

Las pruebas realizadas se llevaron a cabo mediante 11 experimentos con los retardos mostrados en la segunda columna de la tabla III.5. El tiempo de los eventos se analizó de la misma forma que en los experimentos anteriores; es decir, mediante la cámara de alta velocidad. Un hidrófono (y osciloscopio) como el descrito en torno a la figura III.2, sirvieron únicamente como guía durante esta experimentación, pues intentar medir los perfiles de presión de frentes de choque sin concentrar no es fácil, aparte de que las ondas electromagnéticas inherentes a las descargas perturbaban demasiado las señales eléctricas de interés, provocando falsos pulsos de presión. Los pocos oscilogramas capturados no proporcionaron resultados nuevos y fueron poco útiles. En general, hay que aclarar que los resultados de esta parte del trabajo son esencialmente cualitativos, y si bien los análisis numéricos pueden sugerir algún tipo de comportamiento o tendencia, estos distan mucho de ser contundentes.

Para dichos experimentos el voltaje se fijó en 16 kV y la capacidad se mantuvo de 80 nF para cada banco de capacitores. También se utilizaron 10 eventos para cada una de las 11

posiciones especificadas para el dial del GPR, sin embargo no siempre se generó la segunda descarga, como se indica en la tercera columna de la tabla siguiente, en la cual se resumen los resultados principales obtenidos.

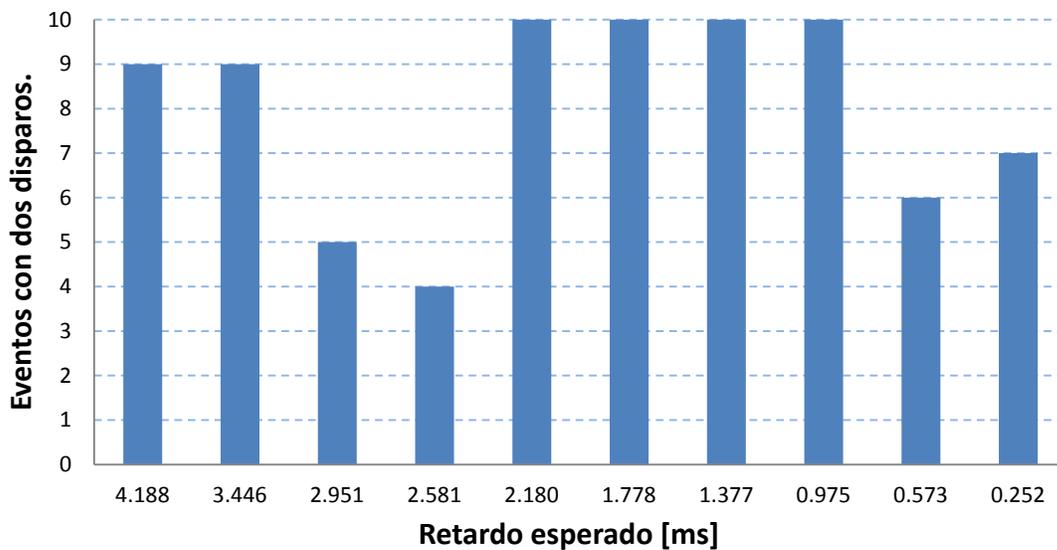
Posición del dial del GPR	Retardo esperado [ms]	Eventos que presentaron doble descarga	Retardo real promedio medido entre eventos [ms]	Coefficiente de variación porcentual
10 + audible	43.576	10	35.139	11.179%
10.00	4.190	9	3.318	53.783%
8.15	3.446	9	1.537	87.266%
6.92	2.951	5	2.497	8.379%
6.00	2.582	4	2.199	11.175%
5.00	2.177	10	1.738	23.819%
4.00	1.775	10	1.674	49.099%
3.00	1.374	10	1.170	41.328%
2.00	0.968	10	1.163	78.097%
1.00	0.566	6	2.104	41.155%
0.20	0.188	7	2.716	25.623%

Tabla III.5 Resultados del tiempo de los eventos en la versión de prueba tándem del Mexilit II a distintos tiempos de retardo.

En la tabla anterior, la columna etiquetada como “Eventos que presentaron doble descarga”, indica el número de eventos en los que efectivamente la bujía descargó dos veces sin importar el tiempo que duraron los eventos. La columna: “Retardo real promedio medido entre eventos”, se refiere al promedio del tiempo medido desde el inicio de la primer descarga hasta el inicio de la segunda, siempre y cuando hayan ocurrido ambas. Así, por ejemplo, para el caso en que la perilla marcaba 6.00, sólo 4 de los 10 eventos presentaron una segunda descarga y el promedio involucra sólo esos 4 eventos. En otras palabras, mientras menos eventos presentaron doble descarga, se considera que hay menor repetitividad en el experimento. El coeficiente de variación porcentual incluido en la última columna de la tabla, indica -como tal- la

confiabilidad de los promedios obtenidos (para los eventos que sí presentaron una segunda descarga).

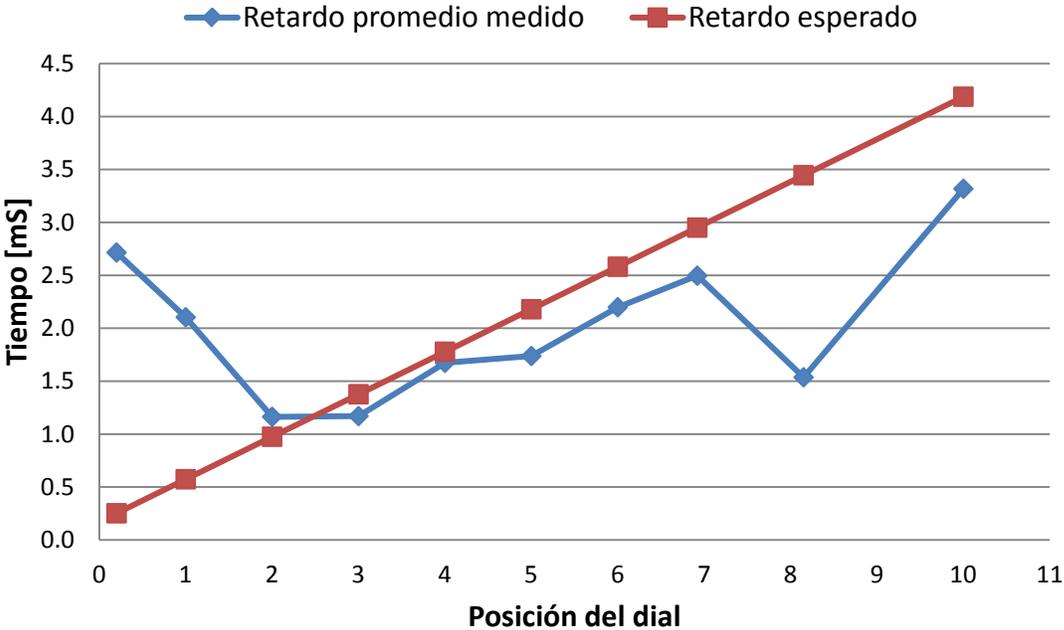
En la gráfica III.9 se ilustran las cantidades de eventos que en cada experimento presentaron doble descarga eléctrica, exceptuando el caso en que el dial se posicionó en 10 con la modalidad “audible”, ya que este se trató como caso particularmente seguro cuyos resultados se pueden describir brevemente. El retardo así establecido fue de 43.576 ms y lo primero que se notó fue que ocurrieron las dos descargas en los 10 eventos, aunque no con el retardo esperado. En promedio, la segunda descarga se adelantó casi 8.5 ms a la señal del segundo controlador del interruptor de chispa. El coeficiente de variación porcentual no es tan bajo como en los experimentos antes descritos, pero en estas pruebas resultó ser de los menores con respecto a los casos restantes que se describen a continuación. Lo anterior indicó la influencia de algún fenómeno repetible que disparaba el segundo interruptor de chispa antes de tiempo.



Gráfica III.9 Cantidades de eventos por experimento que presentaron 2 descargas, incluyendo el retardo esperado en cada caso.

Pasando al resto de los experimentos, se observó que aún para los casos en que los 10 eventos presentaron la segunda descarga, los promedios de retardos obtenidos no coincidieron con los retardos esperados (ver tabla III.5). Las menores diferencias al respecto resultaron en los

cientos de microsegundos y en general es mayor el valor del retardo esperado que el del medido, exceptuando los tres últimos casos en que se usaron las posiciones más bajas del dial (menores retardos esperados), en las que los promedios medidos resultaron mayores a los esperados, según se muestra en la gráfica III.10. Esta gráfica se elaboró para contrastar ambos tipos de retardos, por lo que las líneas incluidas en cada gráfica no son líneas de tendencia sino más bien para fines de distinción.



Gráfica III.10 Comparación entre los retardos esperados y los promedios medidos.

En la gráfica anterior se puede notar que entre las posiciones 2 y 7 del dial los retardos medidos presentan cierta tendencia, no obstante que en las posiciones 6 y 6.92 no ocurrieron las dos descargas en los 10 eventos. Esta región da la impresión que antes de cierto valor de retardo, las segundas descargas se adelantan más mientras mayor sea el retardo impuesto por el GPR, lo que concuerda con lo antes mencionado sobre la segunda descarga para la posición 10 + audible donde el adelanto fue de casi 8.5 ms, aunque también es muy notable que el punto de la posición 8.15 del dial rompa con tal tendencia.

En ninguno de los eventos, tanto a nivel individual como en promedios de 10, coincidieron los retardos. Todas estas alteraciones en los resultados, a falta de una mejor

explicación, se podrían adjudicar a inducciones electromagnéticas que a estas corrientes y voltajes son difíciles de evitar. Otra posibilidad podría ser algún efecto relacionado con la conexión de ambos interruptores de chispa (ver figura II.10), ya que a la salida de ellos se conecta no sólo uno de los electrodos de la bujía, sino también un arreglo de diodos de alto voltaje cuya única función es la de suprimir pulsos transitorios de tensión positiva, ya que la fuente de alto voltaje siempre carga negativamente los capacitores con respecto a tierra física. Normalmente, cuando se dispara el primer interruptor de chispa, aparece momentáneamente un potencial positivo en dicho punto de conexión, que se transmite a tierra física a través de los diodos, para evitar que el segundo interruptor de chispa se dispare sin control por el exceso de potencial eléctrico entre sus electrodos extremos. Si la magnitud y duración de este potencial es mayor a lo que pueden suprimir los diodos, no importa que el segundo interruptor de chispa no tenga potencial de descarga en su electrodo central, ya que la ionización entre sus electrodos extremos ocurrirá inevitablemente. Las magnitudes de corriente involucradas en cada descarga también pueden inducir oscilaciones en los conductores cercanos, por lo que análogamente a lo anterior, la presencia de altos potenciales negativos en dicho contacto impedirían la descarga del segundo interruptor de chispa, aún cuando su electrodo central haya recibido ya el pulso de descarga, retardando así la segunda descarga hasta que desaparece tal potencial negativo.

Otro aspecto notado en los videos capturados, fue que si la segunda descarga eléctrica ocurría en el momento en el que estaban terminando los efectos termodinámicos de la primera, muchas de las segundas descargas fueron irregulares en el sentido de no liberar la misma cantidad de energía, ni producir otra burbuja simétrica o de duración definida. Es decir, si la burbuja causada por la primer descarga aun estaba colapsando o recién había terminado de hacerlo, las propiedades eléctricas y mecánicas de la región de generación no eran ni homogéneas ni constantes. Un aumento repentino en la resistencia óhmica entre los electrodos de la bujía, puede evitar por completo la segunda descarga o bien provocar que esta ocurra no entre ambos electrodos, sino entre uno de ellos y tierra física, a través de algún camino momentáneamente ionizado, lo cual también fue observado.

Todas las hipótesis antes mencionadas son meras especulaciones sobre los efectos observados. En ningún momento se comprobó o se refutó la veracidad de las mismas. Los resultados gráficos y numéricos presentados en esta última sección, tampoco se pueden considerar confiables. Los fenómenos involucrados en el sistema tándem descrito requieren de un estudio más dedicado y con experimentación planeada para descartar o comprobar dichas hipótesis, así como para generar nuevas teorías al respecto. En síntesis, los resultados obtenidos para el sistema tándem electrohidráulico y los efectos observados en el mismo, sólo cubren aspectos descriptivos de las pruebas efectuadas.

Conclusiones

Las conclusiones de este trabajo se describen siguiendo el orden de los objetivos planteados en la última sección del capítulo I, tratando de enfatizar los aspectos novedosos determinados mediante los resultados y el análisis del capítulo anterior. Inicialmente se alude el proceso de generación electrohidráulica de los frentes de choque -descrito en la sección I.2.2-, emitiendo las conclusiones generales sobre la temporalidad de los fenómenos involucrados en el mismo. Después se concluye sobre la dependencia de dicha temporalidad con sus variables de susceptibilidad, para finalmente comentar lo pertinente a las pruebas efectuadas con el sistema tándem instalado en el generador electrohidráulico Mexilit II.

Dichos antecedentes sobre la generación de los frentes de choque (ilustrados mediante la secuencia de los diagramas de la figura I.15), describen precisamente el proceso de la generación pero sin explicar mucho las secuelas posteriores. Aparte de que los tiempos involucrados, sólo son referidos de manera muy relativa, mediante los calificativos “abrupto”, “súbito”, o “rápido”. Con las evidencias fotográficas obtenidas en este trabajo, se puede concluir que la generación en sí del frente de choque -debida a la expansión de la burbuja de plasma- dura a lo más algunos microsegundos. No fue posible precisar mejor la evolución de tal fenómeno y su duración, porque la radiación emitida por la descarga eléctrica fue tan intensa que llegó a saturar el sensor de la cámara de video, aparte de que la velocidad de grabación utilizada (14100 cps) resultó lenta en comparación con la rapidez del fenómeno. Como sugerencias para una mejor investigación de esta parte, se podría utilizar en la videocámara algún filtro que atenuara la intensidad luminosa producida por la descarga eléctrica, además de grabar a la máxima velocidad posible, dependiendo de la resolución de las imágenes a obtener.

Los efectos posteriores a la emisión del frente de choque sí se lograron capturar secuencialmente, dada la relativa lentitud de los mismos con respecto a la duración de la luminosidad producida por la descarga eléctrica. Es decir, se comprobó visualmente la existencia de una burbuja (supuestamente de vapor de agua) todavía en expansión, que alcanzaba su tamaño máximo (más de 2 cm de diámetro) en el orden de los milisegundos (~1.5

ms), para después colapsar durante un tiempo similar al anterior, quedando finalmente las turbulencias ocasionadas por dicho colapso, durante otro tiempo también considerable (~4 ms). La temporalidad de estos fenómenos se ha indicado con valores aproximados sólo por generalidad, es decir, no por falta de resultados confiables sino porque dichos tiempos dependieron de los parámetros (voltaje y capacidad) con que se generaron los diversos frentes de choque, según los comentarios siguientes.

Para la burbuja antes mencionada, se demostró que su temporalidad depende linealmente del voltaje utilizado en los intervalos: [16, 19] kV, [20, 23] kV y [24, 26] kV, manteniendo la capacidad fija. En cada caso se encontraron las relaciones funcionales correspondientes, incluyendo sus coeficientes de determinación (tabla III.1 del capítulo anterior). La selección de tres intervalos para la variación del voltaje (etapas de medición no consecutivas), fue para evitar que el desgaste de la bujía del generador ocasionara problemas en las mediciones con menores magnitudes de voltaje, lo que se reflejó en los resultados obtenidos permitiendo estimar la influencia de dicho desgaste en el tiempo de interés, lo cual fue mostrado en la tabla III.3.

Con respecto a la conductividad eléctrica del agua, no se detectó que esta variable afectara el comportamiento de la burbuja generada por la descarga eléctrica. Las aparentes variaciones encontradas (gráfica III.8) fueron más bien atribuidas al desgaste de la bujía.

Análogamente a lo encontrado para la variación del voltaje a capacidad fija, se demostró que la temporalidad de la burbuja también depende linealmente de la capacidad utilizada, manteniendo el voltaje fijo. Aún cuando en esta parte se detectaron algunos efectos indeseables ocasionados por la forma en que se fueron instalando las diversas capacidades, fue posible determinar las relaciones funcionales correspondientes a tres intervalos de variación de la misma, según lo especificado en la tabla III.2 del capítulo anterior.

Para los fines de la modalidad tándem en el generador electrohidráulico (reforzar los efectos de la cavitación acústica), se puede asegurar que no es posible emitir un segundo frente de choque en las mismas condiciones de una primer descarga, dado que el tiempo de

recuperación del generador es al menos un orden de magnitud mayor que el tiempo promedio de la cavitación acústica (expansión y colapso de burbujas al paso de una onda de choque). El calificativo “al menos” es con referencia al tiempo de colapso de la burbuja entre los electrodos de la bujía, que fue analizado por suponer que al término de este se volvían a tener condiciones para una segunda descarga eléctrica, a pesar de la formación de una nube de burbujas posterior al colapso mencionado.

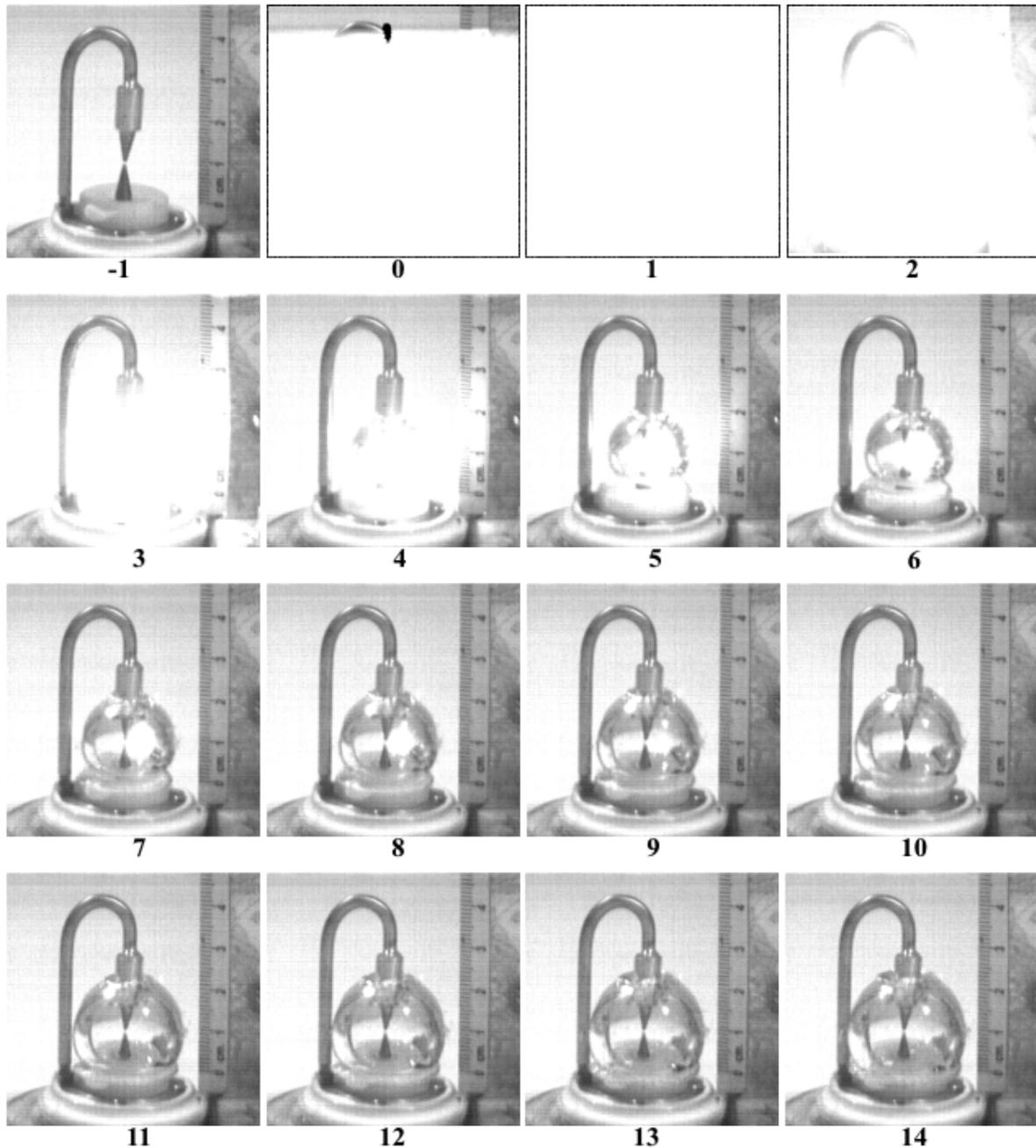
Dicha nube de burbujas resultó de consideración, lo cual fue detectado hasta las pruebas del sistema tándem, en las que aún cuando no se tuvo un buen control sobre los tiempos de descarga (por efectos inductivos imprevistos), se logró comprobar visualmente que los fenómenos inherentes a la emisión de frentes de choque sucesivos sólo fueron repetibles con retardos en el orden de 10^{-2} segundos o mayores. Cuando la segunda descarga eléctrica ocurría en tiempos menores, ya sea antes del colapso de la burbuja o durante la existencia de la nube de burbujas que se formaba después del colapso de la burbuja generada por la descarga eléctrica, los fenómenos observados fueron tan diversos y azarosos que no permiten sugerir tendencia alguna de su comportamiento. Lo único que se puede asegurar al respecto, es que el medio donde se encuentran los electrodos de la bujía no presenta las condiciones previas a la primera descarga eléctrica, antes de 10 ms posteriores a la descarga eléctrica.

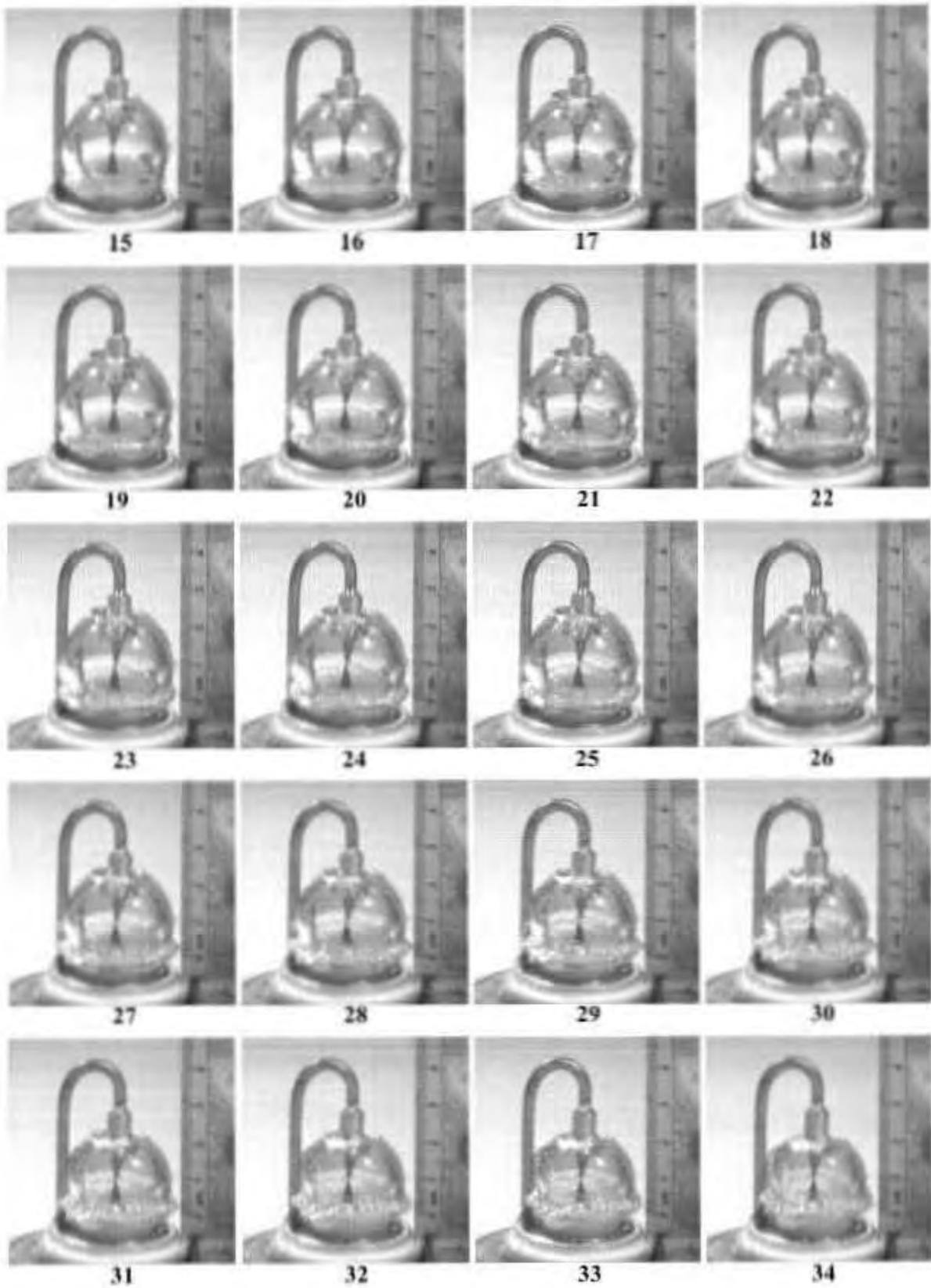
En síntesis, se concluye que en los generadores electrohidráulicos de un solo cabezal (con sólo una bujía y su reflector), no es posible aprovechar los efectos de la cavitación acústica mediante la emisión de frentes de choque en la modalidad tándem. Esta podría ser implementada en generadores contruidos con dos bujías y sus respectivos reflectores que comparten el mismo punto de concentración de las ondas de choque. En tal caso, las probabilidades de éxito sólo estarían limitadas por las inducciones electromagnéticas indeseables, las cuales podrían evitarse mediante blindajes adecuados.

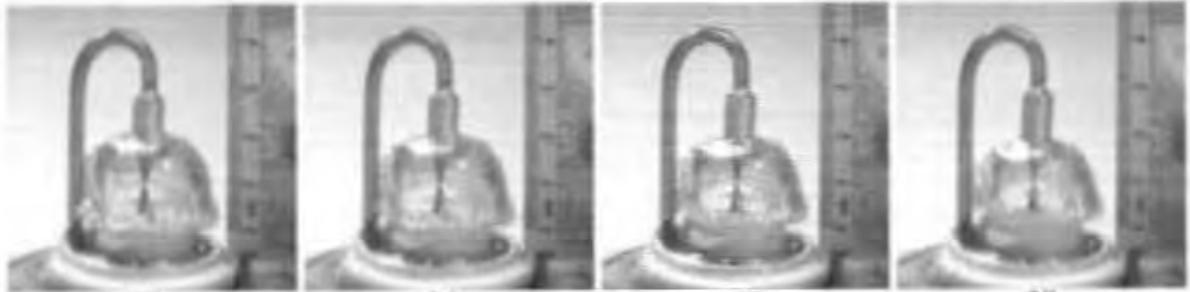
Apéndice I

Secuencia de imágenes sobre la emisión de un frente de choque en el generador Mexilit II, con 16 kV cargados en 80 nF de capacidad

Al pie de cada cuadro se especifica su número secuencial y la separación temporal entre cuadros consecutivos es de 70.92 μ s. El cuadro “-1” muestra el estado inicial de la bujía y en el cuadro “0” ocurrió la descarga eléctrica (referencia del disparo del frente de choque).





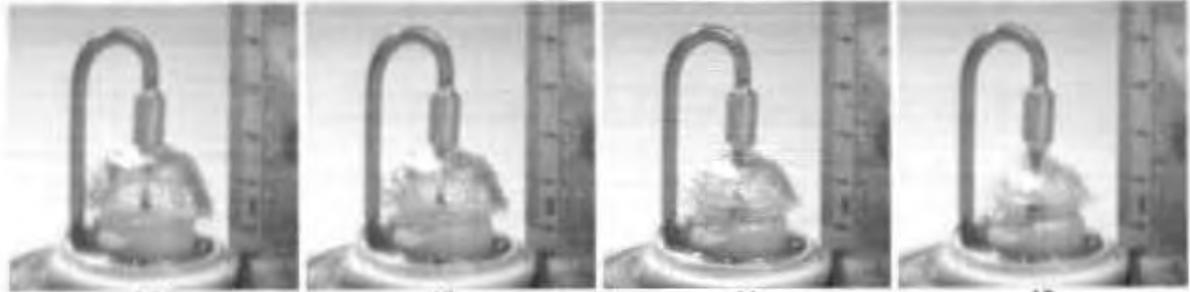


35

36

37

38

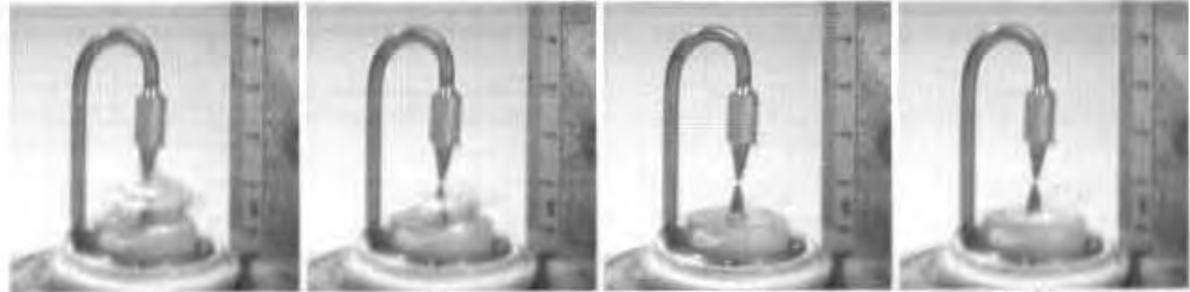


39

40

41

42

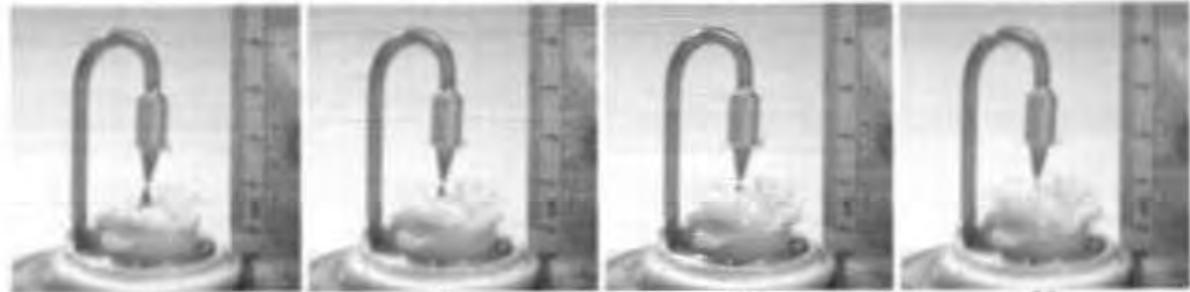


43

44

45

46

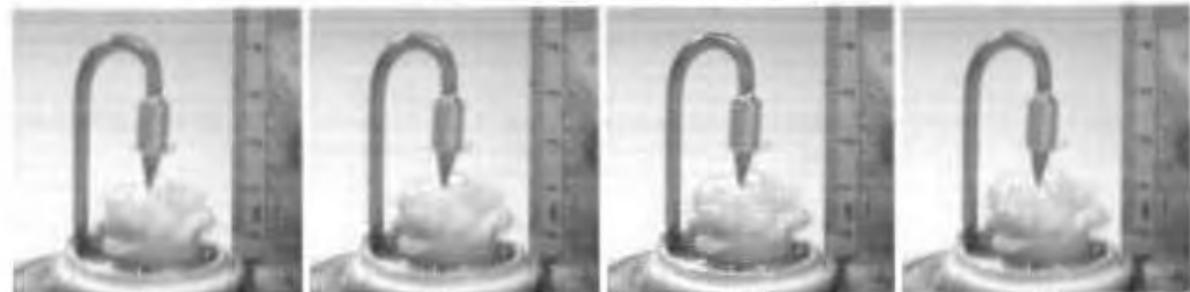


47

48

49

50

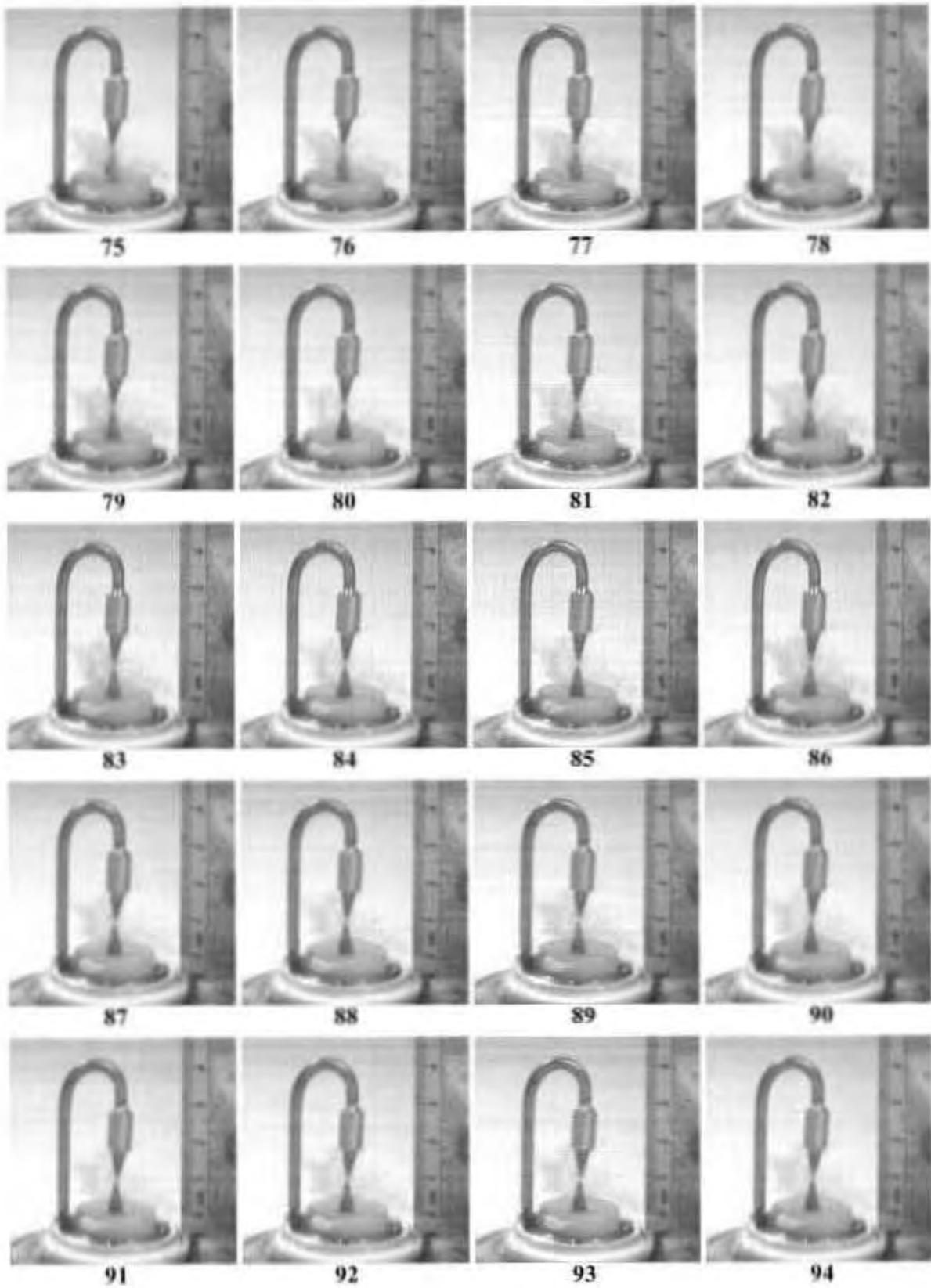


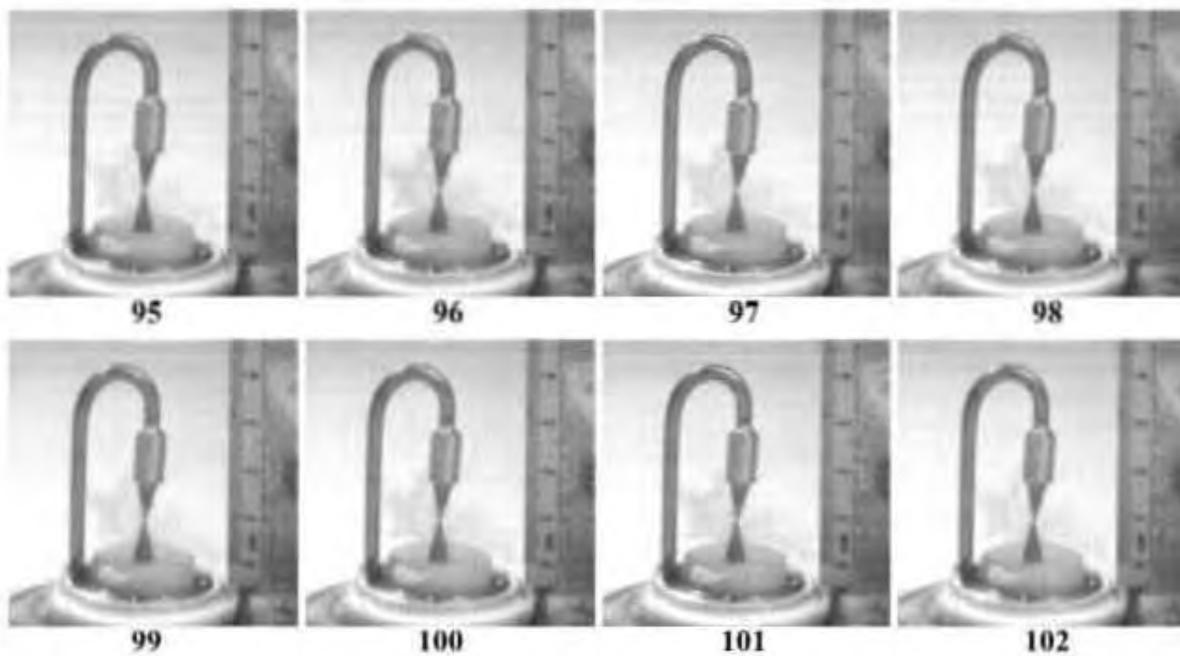
51

52

53

54





Bibliografía

- 1) http://luz.izt.uam.mx/mediawiki/index.php/Ondas_Mecanicas_Longitudinales
- 2) 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.
- 3) Loske, A. M. *Interacción de ondas de choque débiles en agua con la materia: Diseño de electrodos y reflectores novedosos para litotriptores electrohidráulicos*. Tesis de Doctorado, CICESE, Ensenada, B.C., México, 1994. Director: Fernando E. Prieto Calderón.
- 4) Loske A. M. *Shock Wave Physics for Urologists*. Universidad Nacional Autónoma de México, México, 2007.
- 5) Loske A. M., Prieto F. E. *Fundamentos Técnicos de Litotripsia Extracorporeal*. JGH Editores, México, 1999.
- 6) John R. Reitz, Frederick J. Milford. *Foundations of Electromagnetic Theory*. 2ª edición, Addison-Wesley, U.S.A., 1969.
- 7) Loske A. M. *Generación de ondas de choque débiles en agua por rompimiento eléctrico*. Tesis de Maestría, Facultad de Ciencias, UNAM, México, 1990. Director: Fernando E. Prieto Calderón.
- 8) Achim M. Loske, Francisco Fernández. *The development of tandem extracorporeal shock wave lithotripsy*, en: "New Trends in Shock Wave Applications to Medicine and Biotechnology". A. M. Loske (ed.), Research Signpost, Kerala, India, 2010.
- 9) Francisco Fernández, Gilberto Fernández, Achim M. Loske. *Treatment time reduction using tandem shockwaves for lithotripsy: an in vivo study*. Journal of Endourology, Vol. 23, No. 8 (2009), 1247-1253.
- 10) F. E. Prieto and A. M. Loske. *Bifocal reflector for electrohydraulic lithotripters*. Journal of Endourology, Vol. 13, No. 2 (1999), 65-75.
- 11) D. L. Sokolov, M. R. Bailey, L. A. Crum. *Use of a dual-pulse lithotripter to generate a localized and intensified cavitation field*. Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 110, No. 3 (2001), 1685-1695.

12) Eduardo Armenta, Arturo Méndez, Achim M. Loske y Fernando E. Prieto. *Generador de ondas de choque Mexilit II⁺: Manual de usuario y protocolos de seguridad*. Laboratorio de Choques Débiles, Instituto de Física de la UNAM, C.U.- D.F., México 1997.

13) MotionPro Software Suite version 2.05.02. *Manual de usuario*. *Integrated Design Tools, Inc.* Copyright © U.S.A. 2000 - 2007.

14) Fuente de voltaje Gamma, mod. RR30-20. *Manual de usuario*. *Gamma High Voltage Research Inc.* NY, USA.