



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

FACULTAD DE CIENCIAS

CARACTERIZACIÓN DE ONDAS DE CHOQUE  
GENERADAS Y PROPAGADAS EN AGUA CON  
ENERGÍAS DE CIENTOS DE JOULES

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:  
CÉSAR TLAKAÉLEL MARTÍNEZ VILLEGAS



DIRECTOR DE TESIS:  
M. en C. FRANCISCO FERNÁNDEZ ESCOBAR

MÉXICO D. F. 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.

Me encuentro escribiendo con dificultad estas últimas palabras, quizá las más importantes de mi vida. Hay mucho que decir cuando se acumulan más de 25 años de esfuerzo, trabajo, dedicación y tantas otras cosas. Con estas líneas no me estoy refiriendo a ninguna cualidad propia, por el contrario se que para ser digno de la inversión depositada en mi persona, el camino por recorrer aún es largo.

Pienso en la incansable rutina diaria llevada a cabo dentro de la casa en dónde, por alguna fuerza del destino tuve la suerte de vivir. Todavía con la oscuridad de la noche se despierta una persona: mi madre Adelina, siempre la primera, siempre con su increíble dedicación. A ella le debo mucho más que a cualquier otra persona y es que no solamente debió realizar una tarea, ella ha sido más que eso y ha sabido ser lo que se necesita en todo momento, como un camaleón ha cambiado el color de su piel manteniendo su esencia, ha sido madre, amiga, consejera y maestra. En fin, la mano detrás de este y todos los pequeños logros que he podido realizar.

Después, mi padre Ángel. Inagotable fuente de entusiasmo, décadas de trabajo constante y esfuerzo desmedido, todo por un sueño, el pequeño momento en el que existimos y compartimos este espacio. Con él me encuentro en deuda eterna simplemente porque no existe en el universo nada con lo que se pueda pagar lo que me ha regalado: la capacidad de soñar y alas para volar. Él representa el cuerpo que ha llegado hasta este momento.

Con los primeros destellos brillantes sobre la ventana, el día se ilumina más cuando despierta mi hermana Miya, ella siempre ha sido un faro de luz en mi camino, el ejemplo de perseverancia y éxito, el único ejemplo. Eternos compañeros de batalla, a veces en el mismo bando, otras tantas defendiendo causas distintas, pero en todo momento en el mismo campo. Hoy agradezco profundamente la competencia intensa, a veces cruel y despiadada a la que fuimos sometidos desde el principio, ya que sin ella no sería lo que soy ahora y

sin una amiga y compañera como tú tampoco. Miya es el corazón tras bastidores.

Por último veo a Jimena, el mar, el barco, la vela, el viento, todo lo que rige mi destino. Ella levanta mi espíritu cuando me siento más agotado. Triunfadora en todos los aspectos, un pez muy grande en un estanque muy pequeño. De ella puedo decir que es la mujer que no soñé jamás, es bastante más que eso ya que mis sueños nunca alcanzaron para visualizar una persona como tú. Ella ha sido desde el primer momento el alma y el espíritu.

A ellos dedico con el corazón este trabajo como una pequeña ofrenda a su gran esfuerzo y sacrificio constante deseando también que estas páginas sean el testimonio de un principio en lugar de un final. Con estas letras caigo en cuenta de que el camino delante aun sigue su curso y miro con optimismo lo que viene, ya que con personas como ustedes es posible alcanzar las estrellas.

Gracias por enseñarme las leyes de las otras fuerzas que rigen el universo.

César Tlakaélel

## Agradecimientos

---

Agradezco en primer lugar a mi familia, tíos y primos por haberme apoyado desde el principio y por estar al pendiente de la evolución de mi licenciatura. En especial a mi tía Blanca, mi tío Roberto y mis primos Jorge y Erik Nava, ya que en ellos he encontrado amistad sincera y consejos valiosos.

A mi amigo y compañero inseparable en el transcurso de toda esta etapa Eduardo Fernández. Con él he reído, gozado, sufrido y llorado a lo largo del camino que aquí ve su final. Muchas gracias por mantenerte cerca y por tu nobleza.

A los amigos que aligeraron en todo momento la carga: Nila, Hibraim y Carlos. Muchas gracias por el aliento, por los momentos que hemos pasado, por los juegos tan intensos y los desvelos memorables. Los llevo siempre en el corazón.

A la familia Fernández Domínguez por abrirme las puertas de su hogar y recibirme siempre con los brazos abiertos. En especial a la señora Yolanda Domínguez por compartir conmigo sus historias y experiencias, pero sobre todo, por su amistad sincera y sus consejos atinados.

Al maestro Francisco Fernández por su trabajo realizado para dirigir el trabajo aquí expuesto, por sus enseñanzas, su sabiduría, pero sobre todo porque antepuso a la amistad y a las personas antes que el trabajo. Agradezco sinceramente profundamente los gestos de amistad que me ha brindado.

Al laboratorio de ondas de choque del Centro de Física Aplicada y Tecnología Avanzada de la UNAM y las personas que ahí laboran. En particular al señor René Preza por las facilidades y experiencia otorgadas en la elaboración de los distintos materiales usados a lo largo del experimento realizado y al maestro Ángel Luis Rodríguez por facilitar las herramientas y

conocimientos necesarios para la elaboración del sistema de adquisición de datos

A los sinodales de este proyecto: Dr. Naser Qureshi, Dr. Achim Loske, M. en C. Ricardo Hernández, Dr. Roberto Zenit, por sus valiosas sugerencias y sus aportes en la corrección del escrito.

A los profesores de la Facultad de Ciencias de la UNAM por poner siempre la dedicación necesaria para instruir correctamente a los alumnos.

A la Universidad Nacional Autónoma de México por brindarme la oportunidad y las herramientas para realizar mis sueños.

A la DGAPA-UNAM por brindar los recursos que hicieron posible la realización del experimento reportado, a través del proyecto número IN108410

Por último quisiera agradecer a todas las personas que desde las sombras, de una u otra manera contribuyeron con su granito de arena en la culminación de la licenciatura y a lo largo de la elaboración de este trabajo.

# Índice

---

Introducción.....	3
Capítulo 1 .....	7
1.1 Fenómenos ondulatorios y ondas de choque .....	7
1.2 Generación de ondas de choque .....	12
1.3 El generador electrohidráulico .....	16
1.4 Aplicaciones de las ondas de choque y propósitos del trabajo .....	20
Capítulo 2 .....	25
2.1 Metodología general. ....	25
2.2 Mapeo del Espacio.....	27
2.3 El transductor de presión .....	32
2.4 El osciloscopio. ....	36
2.5 Sistema de adquisición y almacenamiento de datos.....	38
2.6 Control remoto de disparo de los frentes de choque.....	42
Capítulo 3 .....	45
3.1 Resultados para $C = 80\text{nF}$ . ....	47
3.2 Resultados para $C = 160\text{nF}$ . ....	54
3.3 Resultados para $C = 500\text{nF}$ . ....	61
3.4 Límite de energía almacenada para el generador experimental	
Mexilit II. ....	69
Capítulo 4 .....	72
4.1 Geometría del campo de presiones. ....	72

4.2 Comportamiento de la presión medida a 45.0° ante cambios de voltaje.....	81
4.3 Comportamiento de la presión medida a 45.0° ante cambios de capacidad.....	85
4.5 Comportamiento con de la presión con respecto del aumento de energía.....	89
4.6 Conclusiones.....	91
Bibliografía.....	94



## Introducción.

---

El fenómeno conocido en el ámbito de la física y la medicina como “onda de choque” es una discontinuidad de presión muy fuerte que se propaga en un medio material y que transporta cierta cantidad de la energía con la que fue originada. Estas cualidades permitieron su aplicación en distintas ramas de la ciencia y la tecnología, en particular en la física y la medicina.

El estudio de las ondas de choque y su interacción con la materia viva e inanimada ha tenido gran auge en las últimas tres décadas, a partir del descubrimiento de la litotricia extracorpórea (ESWL, por sus siglas en inglés), la cuál es una técnica médica no invasiva que permite remover cálculos renales o vesicales del organismo humano sin la necesidad de cirugía.

El equipo clínico con el cual se aplica el tratamiento mencionado se conoce como litotritor extracorporal y tiene como principio de funcionamiento el de generar ondas de choque en agua, fuera del cuerpo, las cuales se dirigen al interior del mismo en forma concentrada y enfocando al cálculo a remover. La energía transportada desde el punto de generación hasta el área tratada induce mecanismos físicos mediante los cuales es posible pulverizar el cálculo.

Un litotritor extracorporal está básicamente constituido por un sistema de generación y concentración de las ondas de choque, además de equipos de imagenología acoplados a la camilla de tratamiento del paciente para la localización precisa del cálculo, que debe hacerse coincidir con el punto de concentración de las ondas de choque. El método de generación y concentración sirve también para distinguir las distintas clases de generadores que se han desarrollado desde el surgimiento de la técnica. Entre ellos podemos enumerar los generadores microexplosivos, los electrohidráulicos, los electromagnéticos y los piezoeléctricos.

El presente trabajo centra su atención en el generador electrohidráulico el cual utiliza una descarga abrupta de corriente eléctrica entre dos electrodos

sumergidos en agua, como método de generación de la onda de choque, y la reflexión de esta en un elipsoide de revolución, como método de concentración. El funcionamiento de este dispositivo es de vital importancia para cumplir los objetivos de la investigación realizada y se dedica una buena parte del escrito para explicar su funcionamiento de una manera más detallada.

Actualmente aún se siguen realizando investigaciones en torno a la litotricia extracorpórea, ya que si bien esta técnica causa menos daño al organismo que una cirugía o una litotricia invasiva, los tejidos circundantes al área de tratamiento sufren alteraciones y lesiones colaterales, por esta razón se sigue desarrollando tecnología para lograr dispositivos más eficientes.

De manera simultánea, nuevas líneas de investigación han permitido el estudio de nuevos métodos de aplicación de las ondas de choque en química y biología, haciendo necesarios estudios más detallados sobre las características de las ondas de choque generadas a partir de una gama de parámetros más amplios que aquellos utilizados en los litotritores extracorporales ya que en dichas aplicaciones no se cuenta con tejido vivo que pueda sufrir lesiones al aplicar energías más elevadas.

Hasta el momento, los trabajos realizados en las “nuevas” líneas de investigación se han realizado con litotritores extracorporales adaptados o dispositivos de investigación basados en equipos clínicos, sin embargo, los resultados alentadores encontrados recientemente plantean la necesidad del desarrollo de equipos vanguardistas que se adecuen de mejor manera a las técnicas exploradas. Entre otras cosas, es deseable alcanzar presiones similares a las de los equipos clínicos pero en zonas más grandes, esto podría lograrse al eliminar la concentración parcial o totalmente aumentando la energía empleada para generar la onda de choque.

El trabajo aquí expuesto pretende construir los cimientos sobre los cuales se base el diseño de un nuevo tipo de generadores de ondas de choque

experimentales que cumplan con los requerimientos citados. Para ello es fundamental en primer lugar, la determinación experimental del campo de presiones (sin concentración de energía) en el tanque de pruebas de un generador de ondas de choque (electrohidráulico), así como determinar las relaciones de tales presiones con sus variables de susceptibilidad (capacidad de almacenamiento de energía, alto voltaje de descarga, etc...).

Para la determinación del campo de presiones fue necesaria la elaboración de un experimento que permitiera la medición y registro de presiones de una cantidad considerable de ondas de choque, lo cual planteo el objetivo particular del diseño e implementación de un sistema semiautomático que permitiera homogeneizar las mediciones y acortar el tiempo invertido en la toma de datos. Por último es conveniente la búsqueda de modelos matemáticos para describir el fenómeno observado, a partir del análisis de los datos obtenidos.

El presente trabajo está dividido en cuatro capítulos. El primero de ellos se escribió con el objetivo de dar un panorama general del fenómeno conocido como ondas de choque, sus primeras aplicaciones en litotricia extracorporeal que derivaron en el desarrollo de los primeros generadores clínicos, en particular el generador electrohidráulico cuyo funcionamiento se explica detalladamente.

En el capítulo 2 está dedicado al sistema semiautomático de obtención, registro y almacenamiento de perfiles de presión provenientes de ondas de choque generadas en un litotritor electrohidráulico experimental. En dicho capítulo se plantea la necesidad del desarrollo del sistema de adquisición mencionado, basada en la cantidad de ondas de choque que se planteó analizar. En las secciones finales se describe la estrategia que se siguió para la toma de los datos, la aplicación de los parámetros estudiados y en general, se muestra el montaje experimental aplicado.

Los resultados generales obtenidos se muestran de manera global en el capítulo 3, además se ofrecen una serie de comentarios de las primeras conclusiones a las que se llegó en los análisis preliminares.

Por último, en el capítulo 4 se pretende profundizar el análisis de los datos en las zonas con las presiones más elevadas, se muestran los resultados con respecto a las variables de susceptibilidad capacidad, alto voltaje y energía almacenada en los capacitores. Dichos datos se ajustaron con funciones que toman como base la hipótesis de la relación entre la energía almacenada y la presión medida sin concentración para concluir el trabajo con las observaciones realizadas, los alcances, las limitaciones y los aportes del trabajo realizado.

# Capítulo 1

---

## *1.1 Fenómenos ondulatorios y ondas de choque*

Desde el punto de vista lingüístico, el término “ondas de choque” es un abuso de la combinación de dos palabras cuyo significado -por separado- es bien conocido tanto en el lenguaje común como en la física. Se acostumbra usar tal término compuesto para referirse a frentes de choque sucesivos, donde un frente de choque se define tanto por sus características de generación, como por la forma en que se propaga y los efectos que ocasiona. Estas dos últimas cualidades tienen mucho que ver con los fenómenos estrictamente ondulatorios, por lo que antes de describir los frentes de choque, conviene mencionar brevemente las características principales de los movimientos ondulatorios así como sus parámetros básicos.

En la naturaleza existen dos grandes tipos de ondas: las ondas mecánicas y las ondas electromagnéticas. Estas se distinguen, entre otros aspectos, por la necesidad que tienen las primeras de un medio material de propagación (que puede ser sólido, líquido, gaseoso e inclusive un plasma), en contraste con las del segundo tipo, las cuales se pueden propagar incluso en el vacío. Las ondas electromagnéticas, quedan fuera del contexto de este trabajo, por lo que se usará la palabra “onda(s)” para referirse exclusivamente a las ondas mecánicas.

Como un ejemplo ilustrativo de ondas mecánicas, se puede mencionar el fenómeno que ocurre cuando manualmente se provocan oscilaciones en el extremo de una cuerda paralela al piso y semi-tensa por estar sujeta en el otro extremo. En este caso se pueden observar las ondas como el cambio en la altura de la cuerda con respecto al piso, notando que las perturbaciones viajan a través de la cuerda hasta llegar al punto de sujeción, para después regresar (reflejarse) con fase invertida. También es notable que la cuerda no se mueve

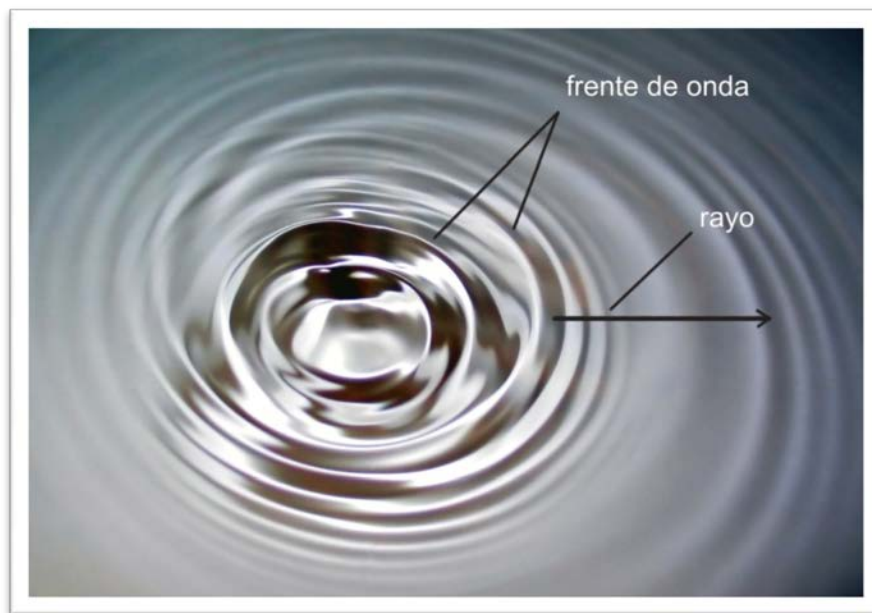
en la dirección longitudinal, sino únicamente oscila verticalmente, lo cual permite asegurar que el medio de propagación de la onda (la cuerda en este caso) no se transporta y únicamente vibra; es decir, en dichas ondas no hay transporte de materia pero sí se transportan las perturbaciones y por consiguiente hay transporte de energía de un lugar a otro. Si se cambia el punto de sujeción por la mano de otra persona, ésta sentirá la acción de la oscilación al arribo de la perturbación.

Un segundo ejemplo surge de recordar lo que sucede cuando se arroja una piedra a un estanque. En este caso, la perturbación es la caída de la piedra hacia el interior del estanque, mientras que la onda se manifiesta como una sucesión de crestas y valles que forman circunferencias concéntricas que se alejan del lugar de la perturbación.

En ambos ejemplos hay un medio de propagación (la cuerda en un caso y el agua en el otro) y también hay transporte de energía, pero no de materia. En el caso de la cuerda, la oscilación es en una sola dirección, mientras que para las ondas en el agua se deben utilizar dos variables independientes para la descripción espacial. De tales comparaciones se infiere una nueva clasificación referente al número de grados de libertad que tiene una onda para propagarse. En el primer ejemplo basta una descripción unidimensional mientras que para el segundo se requieren dos dimensiones. Otros fenómenos como la propagación de los sismos o el sonido son ejemplos de ondas tridimensionales.

El frente de onda es otro concepto indispensable al tema y se define como el lugar geométrico que se forma con todos los puntos del medio que se encuentran en el mismo estado de movimiento. En el ejemplo de la perturbación del estanque, los frentes de onda son los círculos cuyo centro es el origen de la perturbación, según se ilustra en la Figura 1. 1. Una línea perpendicular a los frentes de onda, en la dirección del movimiento de las ondas, se denomina rayo. Si los rayos son todos paralelos entre sí, la onda se conoce como onda

plana; en su defecto, la onda se llamará según la forma de sus frentes de onda; de esta manera, se habla de ondas circulares, esféricas, etc. Otra clasificación es de acuerdo a la dirección de propagación de la onda comparada con la dirección de la oscilación. Cuando estas son perpendiculares entre sí, se trata de una onda transversal y si son paralelas la onda se conoce como longitudinal.



**Figura 1. 1. Ondas sobre agua.**

Hasta el momento se han abordado algunas cualidades que tienen los fenómenos ondulatorios, así como definiciones en torno a ellos. Para un análisis cuantitativo que permita comparar numéricamente los diversos fenómenos, además de su modelado matemático, es necesario recordar otras propiedades y otras variables, particularmente el tiempo que transcurre en todo fenómeno físico. Tales propiedades, por simplicidad se describen para ondas unidimensionales, pero se puede hacer fácilmente una generalización para el caso de ondas de dimensión superior.

Se conoce como amplitud de onda ( $A$ ) al valor máximo que alcanza la perturbación con respecto al punto de equilibrio; es decir, el valor que se tiene cuando no existe oscilación alguna. Dependiendo de la onda que se esté

tratando, la amplitud puede ser una diferencia de potencial eléctrico, una distancia, una diferencia de presiones o cualquier otra propiedad física del medio.

Una cresta es un máximo local de la oscilación. Análogamente, un valle es un mínimo local. La distancia entre dos crestas o dos valles consecutivos es conocida como longitud de onda ( $\lambda$ ). Un ciclo es el evento de oscilación comprendido entre dos máximos consecutivos, o entre dos mínimos, o también entre dos puntos de equilibrio después de pasar por una cresta y un valle. Con lo anterior, se define la frecuencia ( $f$ ) de una onda como el número de ciclos por unidad de tiempo. El recíproco de la frecuencia se conoce como periodo ( $T$ ) y es una medida del tiempo que transcurre para que se complete un ciclo. También se acostumbra utilizar la frecuencia angular ( $\omega$ ) por cuestión de unidades, ya que esta última se expresa en radianes/segundo, mientras que la anterior en ciclos/segundo o Hertz. De hecho, la relación entre ambas es  $\omega = 2\pi f$ ; y como  $f = 1/T$ , también se cumple que  $\omega = 2\pi/T$

La velocidad de propagación ( $v$ ) de una onda es la velocidad con la que la perturbación se mueve en el medio. Matemáticamente se expresa como  $v = \lambda f = \lambda/T$ . Esta generalmente depende de las características del medio de propagación, como la densidad, la presión, o la temperatura. Como ejemplo, la velocidad típica del sonido en el aire es de 343 m/s, mientras que en el agua es de 1493 m/s.

De acuerdo a la breve descripción y ejemplos anteriores, se puede afirmar que los fenómenos ondulatorios se tipifican por cambios periódicos, continuos y monótonos del medio donde ocurren, los cuales generalmente se expresan con funciones de tipo senoidal. A diferencia de esto último, un frente de choque se caracteriza por cambios abruptos del estado termodinámico de cualquier medio material; es decir, cuando hay variaciones repentinas de la presión ( $P$ ), la densidad ( $\rho$ ), o la temperatura ( $T$ ) de dicho medio <sup>[1]</sup>.



Como tales variables de estado están muy relacionadas entre sí, también se puede definir un frente de choque como una discontinuidad de presión ( $P$ ) muy fuerte, consistente en una compresión ( $P^+$ ) seguida de una tensión o dilatación ( $P^-$ ), que se propaga en el medio transportando energía. 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 un 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 en forma del mencionado movimiento vibratorio, entre otros. Además se sabe que los frentes de choque viajan a una velocidad ligeramente mayor que la del sonido en el medio.

Un frente de choque cumple con varias de las características mencionadas para los fenómenos ondulatorios, pero carece tanto de una longitud de onda específica, como de una frecuencia o frecuencias determinantes, ya que no se puede establecer consistentemente un ciclo y por consiguiente carece también de un periodo. No obstante de tales excepciones, se pueden determinar frentes de onda, rayos, dirección de propagación, su naturaleza (mecánica o electromagnética) y se le puede asociar una amplitud, la cual fue de interés primordial durante el desarrollo de este trabajo.

Al referirse a ondas de choque como frentes de choque sucesivos -como se menciona al principio de este capítulo-, el período sólo tiene sentido como el tiempo transcurrido entre dos frentes de choque consecutivos y lo análogo para la frecuencia, como el número de frentes de choque por unidad de tiempo. No obstante, también es posible determinar el espectro de frecuencias correspondiente a un frente específico. Como se ha comentado, dicho frente es un pulso de presión muy corto que tendrá un espectro muy amplio en consecuencia -aproximadamente desde 100 kHz hasta 1 MHz con un máximo alrededor de los 300 kHz-.

El término “ondas de choque” se entiende como la pluralización de “frente de choque” y dado que en esta tesis se trabajó con más de un frente de choque, en lo sucesivo se usará “ondas de choque” o “frentes de choque” para referirse a lo mismo.

## *1.2 Generación de ondas de choque*

Como se comentó en la sección anterior, los frentes de choque son producto del cambio súbito en las variables termodinámicas de un medio material. La perturbación que provoca tales cambios puede ocurrir de manera natural o generarse artificialmente. En la naturaleza se pueden experimentar frentes de choque durante las tormentas eléctricas, ya que si nos encontramos lo suficientemente cerca de estas, se pueden sentir cambios en la presión atmosférica justo antes de escuchar el sonido de truenos debidos a rayos eléctricos entre nubes, o entre nube-tierra. Esta sensación es precisamente ocasionada por el paso de un frente de choque a través del cuerpo, el cual se generó al alterar termodinámicamente el aire distante y que se propagó a través del mismo medio hasta llegar al punto donde nos encontramos.

De manera artificial, el ejemplo más común de la generación de una onda de choque es en una explosión. Se puede decir que la “envolvente” de la explosión origina la onda de choque, ya que indudablemente toda explosión involucra liberación abrupta de energía, con efectos destructivos no sólo en la región de la detonación, sino también en su entorno más o menos lejano (por la propagación de la onda de choque), dependiendo de la intensidad de la energía liberada.

Para investigar el fenómeno y aprovecharlo en aplicaciones benéficas (que se describen posteriormente), se han desarrollado distintos métodos que permiten la generación y propagación controlada de los frentes de choque. Tales métodos usan el agua como medio de generación y propagación de los

frentes de choque, ya que esta posee propiedades acústicas similares a las de los tejidos blandos de muchos seres vivos, incluyendo el ser humano. Por ello, en este trabajo se utilizó tal líquido como único medio para generar y propagar las ondas de choque.

Los primeros dispositivos orientados a la generación controlada de frentes de choque con dichos propósitos, fueron alimentados con microexplosivos para provocar efectos similares a los de explosiones bélicas, pero a pequeña escala. En estos generadores se colocaba una muy pequeña carga explosiva (algunos mg de ózida de plata), inmersa en el agua, que era detonada eléctricamente para controlar el estallido a distancia. La microexplosión así lograda produce una onda de choque esférica que se propaga radialmente desde el punto donde ocurrió, por lo que se dice que la fuente de generación es aproximadamente puntual. La onda de choque así originada no tendría muchas aplicaciones, ya que terminaría por disipar su energía en el medio líquido y en las paredes del contenedor.

Para aumentar la aplicabilidad de las ondas de choque se buscó la concentración de las mismas, lo cual se hace de distintas maneras dependiendo del método usado para su generación. En los casos de fuentes puntuales, como la descrita en el párrafo anterior, se utilizan reflectores elipsoidales, ya que su geometría permite reflejar gran parte de la onda de choque (más del 50%) y concentrarla en una región reducida del espacio (centímetros cúbicos), para obtener presiones “puntuales” de alrededor de 15 MPa (~150 atmósferas) a partir de aproximadamente 20 Joules de energía liberada por el microexplosivo. En otras palabras, si el microexplosivo se detona en uno de los focos ( $F_1$ ) del reflector elipsoidal (ver Figura 1. 2a), la onda de choque se refleja en las paredes del mismo para concentrarse en el segundo foco ( $F_2$ ), fuera del reflector, logrando así las presiones mencionadas, según se muestra en la gráfica de la Figura 1. 2b

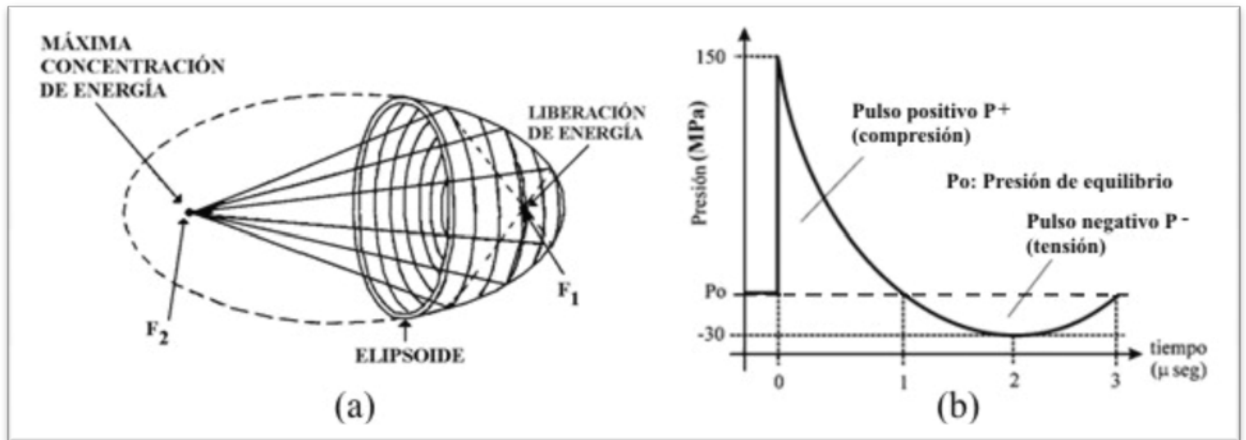


Figura 1. 2. (a) Concentración de una onda de choque con un reflector elipsoidal.  
 (b) Gráfica característica de una onda de choque concentrada.

Como se puede notar en la Figura 1. 2b, la presión en el punto de concentración de la onda de choque cambia abruptamente desde su valor de equilibrio ( $P_o$ ) hasta un valor máximo (150 MPa), para después decaer en forma relativamente suave, cruzando dicho valor  $P_o$  hasta alcanzar un valor mínimo (-30 MPa), para finalmente regresar al equilibrio. Tales cambios ocurren en un tiempo típico de tres millonésimas de segundo. A la región donde la presión supera a la de equilibrio se le conoce como pulso de compresión ( $P^+$ ), mientras que donde hay presiones inferiores a  $P_o$  se le llama pulso de tensión o de dilatación ( $P^-$ ).

Dichos cambios de presión son capaces de fracturar una piedra (ubicada en el punto focal) e inclusive pulverizarla, si se aplican repetidamente y manteniendo la concentración de las ondas de choque. Fuera de la pequeña zona de concentración, la presión es relativamente baja y no posee efectos destructivos considerables. Estas propiedades de las ondas de choque concentradas dieron origen a lo que actualmente se conoce como *litotricia extracorpórea*, la cual es una técnica médica no invasiva para el tratamiento de pacientes con cálculos en el aparato urinario (piedras en el riñón, vejiga, etc.). Las primeras aplicaciones de dicha técnica datan de 1980, en Alemania<sup>[2]</sup>, al generar ondas de choque en agua, fuera del cuerpo, haciéndolas pasar por el

paciente y concentrando sobre el cálculo la energía liberada. Se demostró que después de aplicar cientos de ondas de choque enfocadas sobre el cálculo, este se fragmentaba en partículas muy pequeñas que podían ser orinadas por el paciente en los días subsecuentes al tratamiento.

El método del microexplosivo sólo se usó en los inicios de la litotricia extracorpórea, por la desventaja de tener que cambiar la carga explosiva por cada onda de choque generada. Actualmente hay varios métodos alternativos, más versátiles, entre los que destacan el de tipo electrohidráulico, el basado en el efecto piezoeléctrico y el que usa sistemas electromagnéticos.

El generador electrohidráulico es el utilizado en este trabajo, por lo que se describe con mayor detalle en la sección siguiente. Por el momento se puede mencionar que su funcionamiento es similar al generador por microexplosivos, con la diferencia de que se sustituye el paquete explosivo por un par de electrodos a través de los cuales se descarga abruptamente energía eléctrica de alta tensión, previamente almacenada en capacitores.

El generador piezoeléctrico<sup>[3][4]</sup>, como su nombre lo indica, tiene como principio de funcionamiento al efecto piezoeléctrico inverso, ya que al aplicar un pulso de alto voltaje en los extremos de un cristal que presente dicho efecto, este sufre una elongación momentánea, regresando a su estado inicial en ausencia del campo eléctrico. El generador de este tipo cuenta con algunos miles de pequeños cristales piezoeléctricos, conectados todos en paralelo y dispuestos sobre una superficie cóncava semiesférica, la cual también sirve de fondo del contenedor de agua donde se propagan las ondas de choque, mediante una cubierta impermeable y dúctil. En tal arreglo, el pulso de alto voltaje provoca que todos los cristales piezoeléctricos se deformen simultáneamente, comprimiendo súbitamente el agua sobre ellos (impulso de presión), generando así el frente de choque que por la geometría de la

superficie emisora converge naturalmente al centro del sector esférico, donde se obtienen las altas presiones mencionadas.

El generador de tipo electromagnético<sup>[3][4]</sup> utiliza pulsos de corriente eléctrica en inductores, para producir campos magnéticos que mueven abruptamente una membrana plana, la cual está en contacto con el agua, en forma análoga al generador anterior. Los impulsos de presión así obtenidos provocan frentes de choque planos, requiriéndose de una lente acústica adicional para su concentración. También existen generadores electromagnéticos que usan fuentes cilíndricas y reflectores parabólicos para la concentración de las ondas.

En este trabajo no se utilizaron generadores de tipo piezoeléctrico o electromagnético, por lo que las muy breves descripciones al respecto han sido meramente informativas. Para mayores detalles pueden consultarse las referencias citadas.

### *1.3 El generador electrohidráulico*

En el método electrohidráulico, la onda de choque se produce mediante un arco eléctrico abrupto entre dos electrodos separados alrededor de 1 mm, inmersos en agua y situados en el primer foco ( $F_1$ ) del reflector elipsoidal antes descrito, a fin de concentrar la energía que se libera en  $F_1$  hacia el segundo punto focal ( $F_2$ ), según se ilustra en la parte derecha de la Figura 1. 3.

Para producir dicho arco eléctrico, es necesario cargar previamente un banco de condensadores ( $C$ ) a un voltaje elevado (entre 15 y 30 kV) y en forma relativamente lenta, para después provocar su descarga con la mayor rapidez posible. Ambos procesos involucran varios parámetros y magnitudes que deben tenerse en cuenta, por lo que a continuación se explican separadamente.

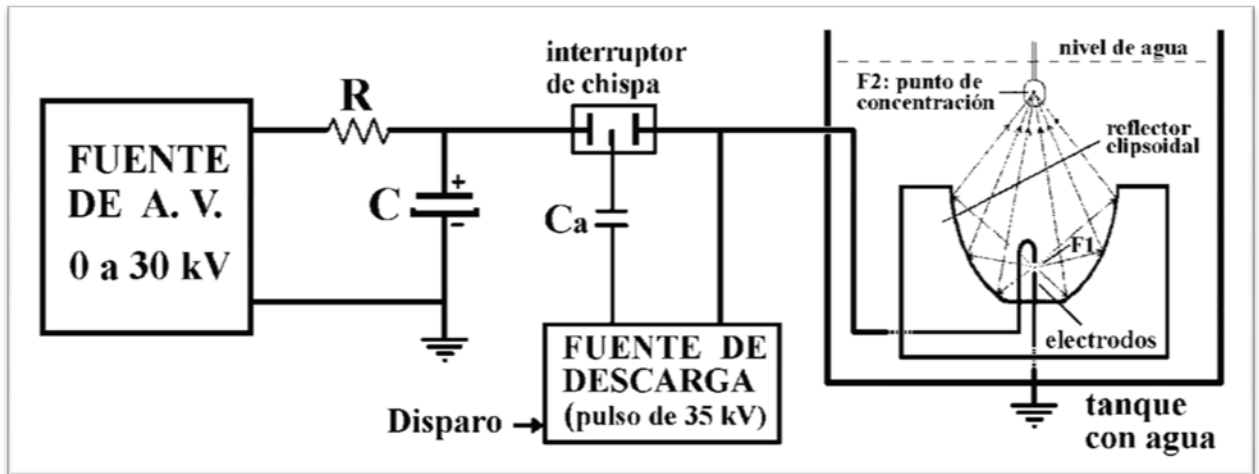


Figura 1. 3. Generación y concentración de una onda de choque por el método electrohidráulico.

En la carga previa de C (parte izquierda de la figura anterior), es donde se tiene control sobre la energía (E) a liberar, ya que esta se almacena potencialmente conforme a la expresión 1. 1, donde V es el alto voltaje acumulado [5].

$$E = \frac{1}{2} C V^2$$

..... 1. 1

Típicamente se han usado 80 nF como valor de capacidad para C, a fin de equiparar el potencial energético de los microexplosivos antes mencionados. Con este dato, la ecuación anterior predice que para voltajes entre 15 y 30 kV, se tienen energías respectivas entre 9 y 36 joules.

Cabe mencionar que la ecuación 1. 1 se refiere a la energía almacenada, más no la energía obtenida en el punto de concentración del frente de choque. Según datos al respecto [1], esta última a lo más llega a alcanzar el 5% de la primera, ya que gran parte de la energía liberada se disipa en forma de calor, radiación electromagnética, etc.

Durante el proceso de carga del condensador, a través de la resistencia  $R$ , el voltaje en este se acumula en función del tiempo según la expresión siguiente <sup>[6]</sup>.

$$V_C(t) = V \left[ 1 - e^{-\frac{t}{RC}} \right]$$

..... 1. 2

Donde  $t$  es el tiempo y  $V$  la magnitud del alto voltaje preestablecido en dicha fuente.

En tal ecuación, es útil expresar el tiempo en términos de una constante  $\tau$  que se define como el producto de los valores de  $R$  y  $C$ ; y representa la fracción mínima del voltaje de la fuente acumulado en el condensador, para considerar que este último recibió carga. Es decir, al tiempo  $t = \tau = RC$ , el argumento de la exponencial en la ecuación anterior es  $-1$  y se tiene que  $V_C(\tau) = 0.632 V$ , lo que significa que el voltaje acumulado en  $C$  es poco más del 63% del voltaje de fuente. Para asegurar que el condensador se cargó completamente (al 100%), la ecuación 1. 2 requiere estrictamente de un tiempo infinito, lo cual es impráctico. Por ello se acostumbra aproximar el tiempo de carga completa a múltiplos enteros de dicha constante de tiempo, según el grado de aproximación deseado. En este trabajo se utilizan cinco constantes de tiempo para dicha aproximación; es decir cuando el voltaje en el condensador es poco más del 99% del voltaje de la fuente ( $V_C(5\tau) = 0.993 V$ ). Como dato adicional a los antes mencionados, el valor utilizado para  $R$  fue de  $3.33 M\Omega$ , por lo que  $\tau = 0.266 s$  y el tiempo de carga completa se consideró de  $1.33 s$ .

Para producir la descarga abrupta de la energía almacenada en  $C$  -y por consiguiente la generación de la onda de choque-, se requiere de cerrar muy rápidamente el circuito hacia los electrodos inmersos en agua (ver Figura 1. 3), los cuales prácticamente presentan conducción ante las diferencias de potencial eléctrico mencionadas. Una conmutación repentina no puede efectuarse



mediante interruptores mecánicos o electromecánicos, debido a los efectos de corona y arco, además de la corriente momentánea involucrada (mayor a 100 A). Para ello se utiliza el interruptor de chispa mostrado en la parte central superior de la Figura 1. 3, que también se conoce como interruptor por ionización, ya que aprovecha el fenómeno físico del mismo nombre para pasar del estado de no conducción eléctrica de algunos gases, al de conducción total, en forma muy rápida (tiempo de respuesta menor a  $10^{-7}$  s) y apropiada para manejar voltajes altos.

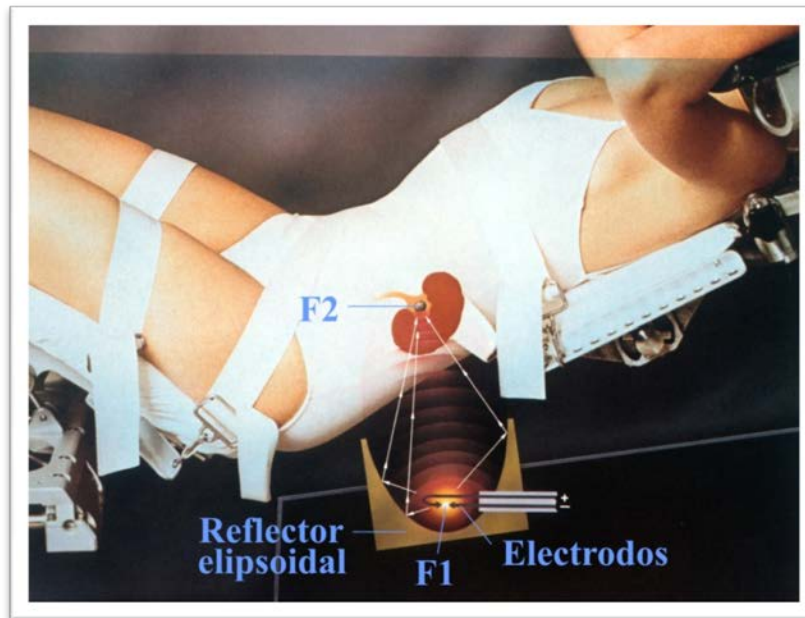
Tal interruptor está formado por tres electrodos en aire, de los cuales, los dos más extremos están separados una distancia poco mayor a 3 cm, considerando que la constante de rigidez dieléctrica del aire es de 10 kV/cm en promedio. Con este arreglo, dichos electrodos extremos soportan hasta un voltaje de 30 kV sin que ocurran efectos de corona o de arco entre ellos. El tercer electrodo está ubicado en medio de los anteriores, por lo que la distancia de este a cualquiera de los extremos es de poco más de 1.5 cm y consecuentemente se requieren más de 15 kV para producir un arco voltaico local. De hecho, en este electrodo y a través de un condensador de acoplamiento ( $C_a$ ), se aplica un pulso de 35 kV -a muy baja corriente- con respecto al electrodo extremo de salida, para ionizar localmente el aire existente. Esto reduce la región de aire no conductor entre los electrodos extremos, por lo que el alto voltaje entre los polos del condensador  $C$  termina por ionizar abruptamente todo el aire, liberándose así la energía eléctrica almacenada.

El pulso de 35 kV proviene de una fuente de alto voltaje pulsado que también se conoce como fuente de descarga o controladora de disparo; cuyo principio de funcionamiento es similar al sistema de “encendido” de bujías en motores de combustión interna a gasolina desarrollados hasta hace poco más de 20 años (sistema de bobina, condensador y platinos).

Los generadores de tipo electrohidráulico han sido muy utilizados tanto en el desarrollo de la litotricia extracorpórea (ESWL, por sus siglas en inglés), como en otras aplicaciones que se describen en la sección siguiente. Su auge se debe a la relativa simplicidad de su funcionamiento, el cual no requiere de componentes muy elaboradas, lo que en consecuencia representa costos de producción relativamente bajos. Entre sus principales desventajas se encuentra la alta variabilidad (hasta de un 35%) del pico máximo de presión generado entre un frente de choque y otro, además de la necesidad de reemplazar periódicamente los electrodos donde ocurre la descarga eléctrica, ya que cada repetición de esta los va desgastando paulatinamente. De hecho, tales electrodos están dispuestos en forma similar a los de una bujía del tipo de la industria automotriz, pero son de mayores dimensiones y con mejores aislantes eléctricos. Por esto último, también se acostumbra llamar “bujía” (del generador) a dicho arreglo de electrodos, la cual se reemplaza después de 1500 o 2000 descargas, dependiendo de las cantidades de energía utilizadas.

#### *1.4 Aplicaciones de las ondas de choque y propósitos del trabajo*

Como se comenta en la sección previa, el estudio de las ondas de choque y sus interacciones con la materia viva e inanimada, han tenido mayor interés a partir del descubrimiento de la litotricia extracorpórea, ya que esta técnica permite remover cálculos renales y vesicales del organismo humano sin necesidad de cirugía. Los equipos clínicos desarrollados con tal propósito llevan el nombre de litotritores extracorporales, los cuales además del sistema de generación y concentración de las ondas de choque, también poseen sistemas de imagenología (ultrasonido o fluoroscopia) acoplados a la camilla de tratamiento del paciente, para la localización precisa del cálculo, que debe hacerse coincidir con el punto de concentración de las ondas de choque, según se muestra en la figura siguiente.



**Figura 1. 4. Paciente humano bajo tratamiento en un litotritor de tipo electrohidráulico marca Dornier modelo HM3 (fotografía de catálogo).**

Dicho enfoque de las ondas de choque es de vital importancia en el tratamiento de la litiasis por esta técnica, ya que un corrimiento hacia la región exterior del cálculo no sólo deja a este sin desintegrar, sino que causa daños a los tejidos circundantes al mismo. En el mejor de los casos de un mal enfoque, el cálculo se pulveriza con un número de ondas de choque mucho mayor al típico (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.

Todavía hay muchas investigaciones en torno a la litotricia extracorpórea, ya que si bien esta técnica causa menos daño al organismo que una cirugía

abierta o una litotricia invasiva, los tejidos circundantes al cálculo bajo desintegración no están exentos de alteraciones causadas por las ondas de choque aplicadas. Tales investigaciones se han dirigido a la búsqueda de nuevas formas de generación, concentración y aplicación de las ondas de choque, más que a la experimentación variada de los parámetros inherentes a dicha técnica <sup>[7][8]</sup>. De hecho, ya se ha demostrado que no se puede aumentar la eficiencia de los litotritores extracorporales incrementando la energía liberada en la generación de las ondas de choque, tanto por la saturación de la presión en el impacto concentrado como por el aumento de dichos daños colaterales. No obstante de lo anterior, las ondas de choque con relativa alta energía son aplicables a otras líneas de investigación como las siguientes.

En la industria de envasado de alimentos, hay investigaciones encauzadas a la conservación de los mismos por métodos no térmicos y sin el uso de conservadores químicos, ya que la mayoría de los consumidores prefieren alimentos mínimamente procesados; es decir, lo más parecido a los alimentos frescos. En los procesos actuales de envasado no térmico, se usan pequeñas cantidades de sustancias que actúan como agentes bactericidas o bacteriostáticos (sorbato de potasio al 0.1%, por ejemplo) para asegurar la inocuidad del alimento. Aún así estos conservadores no dejan de ser una sustancia extraña que a la larga podría causar daños al organismo humano. Una alternativa al uso de conservadores es la pasteurización, en la que el alimento a envasar es sometido a temperaturas altas y a presiones de vapor de agua, cuyos efectos bactericidas son indiscutibles. Desde hace poco más de una década, surgió la idea de usar sólo altas presiones, sin calor, para la conservación de alimentos; esto es, usar las ondas de choque concentradas sobre el alimento, con fines bactericidas, tratando de lograr un alimento envasado de forma “más natural” <sup>[9]</sup>.

En biología, las ondas de choque se usan para tratar de volver más permeables las membranas de algunas células, con fines de transfección

celular; es decir, para generar pequeñas perforaciones tanto en la membrana como en el núcleo de muchas células, de tal forma que se facilite la incorporación de material genético exógeno al interior de la estructura celular. Al respecto, se tienen resultados recientes y muy alentadores <sup>[10]</sup>, en los cuales se aprovecharon los efectos de la cavitación acústica causados por las ondas de choque.

En tales ataques a microorganismos, se han utilizado ondas de choque concentradas sobre muestras pequeñas contenidas en viales permeables a los impactos acústicos, los cuales han sido generados con las magnitudes de energía utilizadas en la litotricia extracorpórea (~ 25 Joules). De hecho, en la experimentación al respecto se han ubicado dichas muestras en la zona focal del generador (pequeña región de concentración de las ondas de choque), que es donde se tienen dichas presiones (~ 150 MPa). Obviamente en estos casos no hay tejidos humanos que puedan sufrir daños colaterales y es muy deseable experimentar con mayores volúmenes de muestras, dados los potenciales de utilidad que representan tanto la inactivación bacteriana como la obtención de productos transgénicos. Esto último requiere de alcanzar o superar dicha presión de impacto, sin concentración de energía y con la mayor homogeneidad posible en el nuevo volumen de interés, lo cual fue uno de los motivos para el desarrollo de este trabajo.

En los generadores de tipo electrohidráulico, ya se ha demostrado <sup>[1]</sup> que la energía ( $E$ ) liberada en la descarga eléctrica origina una presión ( $P$ ) en el medio circundante a los electrodos, cuya amplitud al cuadrado es proporcional a dicha energía; es decir:  $P^2 \propto E$ ; por lo que de acuerdo a la ecuación 1. 1 tal presión mantiene proporcionalidad directa tanto con el alto voltaje ( $V$ ) acumulado para la descarga, como con la raíz cuadrada de la capacidad ( $C$ ) de almacenamiento. Esta presión, obviamente no es la obtenida por la concentración de energía mencionada en la sección 1. 2, aparte de que también hay que considerar que la densidad de energía propagada por un frente de

onda esférico es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia de propagación. No obstante de esto último, es de esperar que el incremento deseado en dicha presión de impacto para microorganismos, se pueda lograr ya sea aumentando la magnitud de  $V$ , de  $C$ , o de ambas variables.

Incrementar el voltaje más allá del máximo disponible en los generadores electrohidráulicos existentes (30 kV), resulta complicado porque implica un nuevo diseño e implementación del sistema de carga y descarga de energía eléctrica. La alternativa de aumentar la capacidad de almacenamiento de energía resulta más viable y adaptable a generadores de ondas de choque existentes, por lo cual se seleccionó a esta para los propósitos de este trabajo

Dichos propósitos tuvieron como objetivo primordial la determinación experimental del campo de presiones (sin concentración de energía) en el tanque de pruebas de un generador de ondas de choque experimental dispuesto para este proyecto, así como determinar las relaciones de tales presiones con sus variables de susceptibilidad (capacidad de almacenamiento de energía, alto voltaje de descarga, etc.), incluyendo la comparación de los resultados obtenidos con los existentes para ondas de choque concentradas y generadas con baja energía, a fin de determinar su aplicabilidad en la mencionada experimentación con microorganismos.

## Capítulo 2

---

### 2.1 Metodología general.

Como se menciona al final del capítulo anterior, esta tesis fue dirigida a la determinación experimental del campo de presiones producidas por un generador de ondas de choque de tipo electrohidráulico, cuyas características se muestran en la figura siguiente.



Marca/modelo	UNAM/Mexilit II
Tipo	Electrohidráulico experimental
Capacidad nominal	80 nF
Voltajes de operación	15 – 30 kV
Almacenamiento de energía	9 – 36 J
Cte. de tiempo de recarga	0.26 s
Distancia interfocal usual	230 mm

Figura 2. 1 Fotografía y características del generador electrohidráulico Mexilit II. En la fotografía se ha superpuesto otra imagen de la generación de un frente de choque.

A diferencia de los equipos usados en la litotricia extracorpórea -donde se manejan energías relativamente bajas (9 a 36 J)-, en este trabajo se llegaron a liberar energías hasta alcanzar el orden de los 100 J, mediante la modificación de la capacidad de almacenamiento de la misma, que usualmente es fija (80 nF) según lo descrito en la sección 1.3, en torno a la ecuación 1.1 ( $E = \frac{1}{2} CV^2$ ).

Tales campos de presiones se contemplaron para tres magnitudes de capacitores (80, 160 y 500 nF) y cinco voltajes de carga para cada uno de ellos (16, 18, 20, 22 y 24 kV), lo que implicó la planeación de quince grandes casos de energía liberada, mediante los cuales se pretendió estimar las relaciones entre las presiones obtenidas y sus parámetros de generación. A su vez, cada campo de presión requirió de contemplar las variables espaciales inherentes al mismo (ubicación de los puntos de interés), considerando también la necesidad de mediciones para procesos estadísticos, dada la variabilidad que presentan los generadores electrohidráulicos en la emisión de los frentes de choque.

Como se comentó al final de la sección 1.3, es bien conocido que las presiones concentradas en el punto focal de un generador electrohidráulico de aplicaciones médicas, pueden variar hasta en un 35% en disparos consecutivos. Esto ha ocasionado que en las investigaciones al respecto sea común repetir el mismo experimento un cierto número de veces, de tal manera que la aplicación posterior de las herramientas estadísticas conocidas, permitan tener significancia en los datos reportados. Para el caso específico de la medición del pico máximo de presión, es recomendable realizar entre 10 y 20 repeticiones, por lo cual en este trabajo se tomaron 15 muestras de cada medición caracterizada tanto por su ubicación espacial, como por sus parámetros de generación.

Para lograr los objetivos planteados, fue indispensable la elaboración de un método bajo el cual se efectuara la experimentación correspondiente,



considerando en todo momento la necesidad estadística expuesta. Este método consistió básicamente en establecer las ubicaciones espaciales a medir dentro de la tina de pruebas del generador (mapeo del espacio), estableciendo para cada punto de interés las combinaciones significativas de los parámetros de generación de la onda de choque (pares: voltaje - capacidad). También fue necesario efectuar varias modificaciones al generador, las cuales se describen a lo largo de este capítulo, además de la descripción de los instrumentos de medición utilizados.

## *2.2 Mapeo del Espacio.*

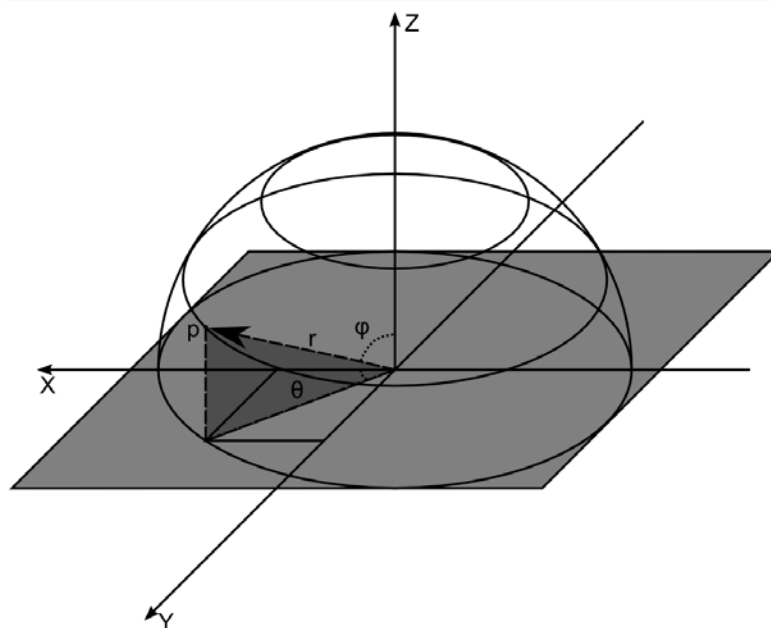
En la mayoría de los fenómenos físicos, las relaciones que existen entre las distintas variables involucradas generalmente son continuas. Aún así, en la experimentación resulta imposible determinar continuamente dichas relaciones, ya que para lograrlo se tendrían que establecer una infinidad de puntos en el dominio de la función de interés, con la consecuente cantidad de mediciones en la imagen, con precisiones que también rayarían en lo ideal.

Experimentalmente siempre se mide en forma discreta, tanto en la variable dependiente como en la independiente, considerando la resolución o incertidumbre de los instrumentos de medición. Posteriormente se usan herramientas matemáticas como la interpolación o ajuste mediante funciones conocidas, para establecer una relación continua que incluya los datos medidos y que permita realizar predicciones, constituyendo de esta manera un modelo matemático del fenómeno bajo análisis. Dependiendo del problema específico que se tenga, se pueden utilizar argumentos que permitan escoger adecuadamente dichos valores discretos. En este trabajo se utilizaron los criterios y decisiones que se describen a continuación.

Inicialmente se determinó el uso de coordenadas esféricas como el más conveniente, dada la geometría del fenómeno a estudiar (propagación de

frentes de choque esféricos). A pesar de que la fuente generadora de los frentes de choque no es precisamente puntual, para las magnitudes espaciales involucradas se tiene buena aproximación a tal caso. Es decir, recordando que la separación entre los electrodos de la bujía es de 1mm (espacio de la generación), al comparar este dato con la distancia interfocal del reflector comúnmente usado en aplicaciones médicas ( $R= 23 \text{ cm}$ ), se puede decir que el tamaño de la fuente es  $1/230 = 0.43\%$  de la distancia típica de trabajo.

Al ubicar el origen del sistema de coordenadas entre los electrodos de la bujía, entonces cualquier punto del espacio (dentro de la tina) es representado por su distancia a dicho origen y dos ángulos: el que forma un radio con la vertical (latitud) y el que forma la proyección de este sobre el plano del fondo de la tina (XY) con un vector de referencia en el mismo plano (azimut), según se ilustra en la figura 2.2.



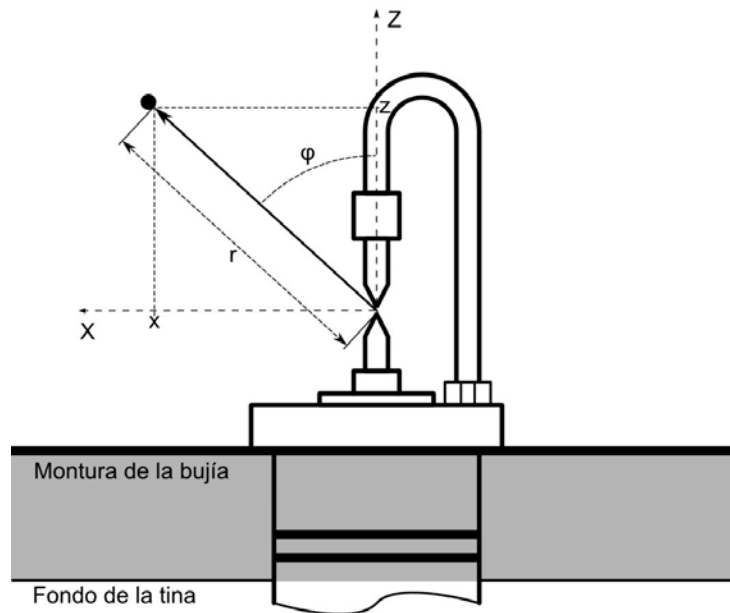
**Figura 2. 2 Sistema de coordenadas esféricas.**

En dicho sistema de coordenadas, el ángulo de azimut se acota en el intervalo  $[0, 360)$  grados o  $[0, 2\pi)$  radianes y el ángulo de latitud entre  $[-90, 90]$

grados o  $[-\pi, \pi]$  radianes. Al respecto, es importante señalar dos aspectos: el primero es que la bujía está situada a unos pocos centímetros del fondo de la tina, razón por la cual careció de sentido considerar valores de ángulo de latitud negativos, es decir, que todo ángulo de latitud en donde la presión se podía medir variaba prácticamente en el intervalo:  $[0, 90]$  grados. En segundo lugar, la geometría de la bujía permitió establecer la simetría de esta con respecto al eje vertical, por lo que se esperó que el frente de onda mantuviera esta misma simetría y se pudieran realizar las mediciones para un solo valor del ángulo de latitud.

Otro caso de relevancia se esperó con los cambios en la coordenada radial, ya que de esta variable depende notablemente el valor de la presión. A mayor distancia, mayor será el área en la cual se distribuya la energía y menor será la presión, efecto que aumenta cuando se consideran pérdidas de energía debidas a la disipación del medio.

Mediante los criterios anteriores, dicho sistema de coordenadas esféricas se redujo a uno de tipo polar y en un cuadrante (ver figura 2.3), que no obstante de su sencillez descriptiva, su implementación en la realidad no fue tan fácil por la coincidencia del origen de coordenadas con el lugar de la generación de los frentes de choque. Por esto último, se decidió medir en coordenadas cartesianas reportando los resultados en coordenadas polares.



**Figura 2. 3 Ubicación del sistema de coordenadas polares.**

La tabla siguiente muestra los 15 puntos de interés considerados, los cuales radialmente se ubicaron a la distancia interfocal ( $R = 23 \text{ cm}$ ) y a las fracciones  $\frac{3}{4}$  y  $\frac{1}{2}$  de la misma, para ángulos de  $0, 22.5, 45, 67.5$  y  $90$  grados. En dicha tabla se incluyen las coordenadas rectangulares correspondientes a tales coordenadas polares, con sus incertidumbres asociadas por la medición en forma cartesiana. El eje "X" se consideró en el plano paralelo al fondo de la tina y contiene al origen (espacio entre electrodos), mientras que el eje "Z" fue la altura medida perpendicularmente al plano XY.

**Tabla 2. 1 Ubicación de los puntos considerados para el mapeo del espacio.**

<b>Punto</b>	<b>Coordenada X [cm]</b>	<b>Coordenada Z [cm]</b>	<b>Radio [cm]</b>	<b>Incertidumbre absoluta [cm]</b>	<b>Incertidumbre relativa</b>	<b>Angulo [°]</b>	<b>Incertidumbre absoluta [°]</b>
<b>1</b>	0.0	23.0	23	0.50	2.17%	0.00	1.25
<b>2</b>	8.8	21.2	23	0.65	2.84%	22.50	1.63
<b>3</b>	16.3	16.3	23	0.71	3.07%	45.00	1.76
<b>4</b>	21.2	8.8	23	0.65	2.84%	67.50	1.63
<b>5</b>	23.0	0.0	23	0.50	2.17%	90.00	1.25
<b>6</b>	0.0	17.3	17.3	0.50	2.89%	0.00	1.66
<b>7</b>	6.6	16.0	17.3	0.65	3.78%	22.50	2.16
<b>8</b>	12.2	12.2	17.3	0.71	4.09%	45.00	2.34
<b>9</b>	16.0	6.6	17.3	0.65	3.78%	67.50	2.16
<b>10</b>	17.3	0.0	17.3	0.50	2.89%	90.00	1.66
<b>11</b>	0.0	11.5	11.5	0.50	4.35%	0.00	2.49
<b>12</b>	4.4	10.6	11.5	0.65	5.68%	22.50	3.25
<b>13</b>	8.1	8.1	11.5	0.71	6.15%	45.00	3.52
<b>14</b>	10.6	4.4	11.5	0.65	5.68%	67.50	3.25
<b>15</b>	11.5	0.0	11.5	0.50	4.35%	90.00	2.49

Indudablemente fue indispensable la planeación de un método que permitiera la medición de la presión en las 15 ubicaciones antes mencionadas, en cada una las cuales hubo que establecer los 15 casos de energía determinados en la sección anterior, contemplando también que cada medición representativa requería de 15 muestras estadísticas. La cantidad total de eventos a registrar (3375), requirió tanto de los instrumentos de medición adecuados a dichas presiones momentáneas (transductor de presión, osciloscopio, etc.), como de un sistema de adquisición de datos confiable, los cuales se describen en las secciones siguientes.

La medición del perfil de presión que genera un frente de choque con las particularidades mencionadas, tiene como principal inconveniente la rapidez con la que ocurre; esto es, la presión puede aumentar y disminuir súbitamente en lapsos de tiempo en el orden los microsegundos, de manera que para realizar una medición confiable, el tiempo de muestreo de un sistema de adquisición de datos aplicable (transductor y electrónica asociada) debe ser del orden de decenas nanosegundos como máximo.

### *2.3 El transductor de presión*

En la actualidad se cuenta con transductores de presión en los cuales el tiempo de respuesta es suficientemente rápido como para detectar los cambios de presión mencionados, sin embargo todavía no es posible determinar con suficiente precisión el valor de la presión en forma absoluta, por lo que en la mayoría de los trabajos reportados en esta área se encuentran resultados relativos de la misma<sup>[1, 3, 4,7]</sup>. Lo anterior se debe, entre otros, a la interferencia producida por las reflexiones que el frente de choque sufre en el interior del transductor, además de la dependencia de la medición con la orientación del transductor en relación al frente de choque y el daño sufrido por el dispositivo en cada medición. Tampoco se puede afirmar que los fabricantes de estos transductores, los producen siempre con las mismas características de calibración y especialmente diseñados para medir presiones de frentes de choque.

El transductor más usado en esta área se conoce como hidrófono de aguja (por su forma) y fue inventado alrededor de 1985 por M Müller y M Platte. Su funcionamiento se basa en el efecto piezoeléctrico del fluoruro de polivinilideno (PVDF), que es un polímero parcialmente cristalino y por ello permite un mejor acoplamiento acústico con el agua, en comparación con los piezoeléctricos completamente cristalinos en los que la interfase agua-transductor genera un cambio de densidad drástico. En otras palabras, las propiedades acústicas del PVDF son más parecidas a las del agua, por lo que las ondas de choque que recibe no sufren mucha reflexión, mejorando así la medición y alargando la vida útil del dispositivo.

Tal tipo de hidrófono consta de un electrodo central muy delgado recubierto en su extremo con PVDF. Encima del PVDF se aplica mediante evaporación una capa muy delgada (20 micras) de cromo, níquel o plata, que

forma el segundo electrodo y está en contacto eléctrico con un pequeño cilindro metálico de 1mm de espesor y 50mm de largo. El espacio entre el electrodo central y este cilindro se rellena con una resina epóxica aislante. El hidrófono particularmente utilizado en este trabajo, tiene las características mostradas en la tabla siguiente.

**Tabla 2. 2 Características del transductor utilizado.**

<b>Marca:</b>	IMOTEC GmbH
<b>Tipo:</b>	PVDF Needle hydrophone
<b>Modelo:</b>	80-0.5-4.0
<b>Número de Serie:</b>	300/24/11
<b>Sensibilidad:</b>	0.373 pC/bar
<b>Capacidad:</b>	238 pF

Todas las mediciones de presión efectuadas con dicho transductor se reportan mediante el voltaje de la señal transducida, como una variable análoga:  $P_{@}[V]$ . Esto se hizo por simplicidad, ya que los estudios al respecto fueron de tipo comparativo, además de que tal variable es directamente proporcional a la presión absoluta ( $P_{abs}[bar]$ ), según la expresión siguiente proporcionada por el fabricante:

$$P_{abs}[bar] = \left( \frac{C_{total}}{Q_{sonda}^*} \right) * P_{@}[V] \quad \dots\dots\dots 2.1$$

Donde  $Q_{sonda}^*$  es la sensibilidad del hidrófono y  $C_{total}$  es la capacidad total involucrada en la medición, la cual se determina sumando la capacidad del hidrófono (238 pF) con la capacidad inherente al osciloscopio utilizado (13 pF) para el despliegue de la señal transducida. Con tales datos, la ecuación anterior se reduce a la siguiente:

$$P_{abs}[bar] = 0.6729 \left[ \frac{bar}{mV} \right] * P_{@}[mV]$$

..... 2. 2

Entre las ventajas de dicho transductor, se pueden mencionar su tiempo de respuesta (50 ns) y su facilidad de conexión. Esta última se hace directamente a la terminal de entrada de un osciloscopio adecuado (con ancho de banda de 100 MHz o mayor), prescindiendo de etapas de amplificación o de filtrado para la señal transducida. También presenta un mantenimiento sencillo, ya que en caso de que la punta se deteriore por la incidencia de los frentes de choque, basta con reponer la pintura de plata que cubre la misma. Las dimensiones de la zona sensible son pequeñas (0.5mm de diámetro y 10mm de largo), lo que permitió mediciones confiables bajo los cuidados siguientes recomendados por el fabricante.

- La colocación del hidrófono fue en forma tal que la aguja quedara perpendicular al fondo de la tina, haciendo coincidir el punto de medición con la parte media de la zona sensible.
- El cable de conexión se mantuvo seco, ya que la humedad en el mismo produce mediciones con componentes de corriente directa excesivas y aumenta el tiempo de recuperación. Antes de cada sesión se colocaba el transductor dentro de un horno a 50°C, durante una hora, y su tiempo de uso en la tina de pruebas del generador no excedió 5 horas de uso continuo, de acuerdo a lo sugerido por el fabricante.



Como una protección adicional, se introdujo el hidrófono dentro de una pipeta de plástico para transferencia de muestras líquidas (ver figura 2.4), con 3.5ml de agua destilada en su interior. Dicho encapsulado formó dos interfases agua-plástico que aminoraron la compresión directa del frente de choque en un factor de 20%. Tal atenuación fue evaluada sólo como resultado útil para otros fines en el laboratorio, ya que en este trabajo ello carecía de relevancia porque el estudio realizado fue de tipo comparativo.



**Figura 2. 4 Encapsulado del transductor de presión.**

## *2.4 El osciloscopio.*

El transductor descrito en la sección anterior, es una de las partes fundamentales del sistema de medición. Las otras partes son los equipos que permiten desplegar, almacenar y analizar las señales eléctricas obtenidas. El osciloscopio tiene relevancia general, ya que puede ser usado en una amplia gama de experimentos. En particular aquí fue usado para el despliegue de las señales proporcionadas por el hidrófono de aguja.

Una explicación detallada de las funciones y aplicaciones del osciloscopio queda fuera del contexto del presente trabajo, por lo que únicamente se mencionan los aspectos relacionados con los experimentos realizados. Para profundizar en el tema se recomienda consultar el manual del osciloscopio utilizado, el cual es de la marca Tektronix, modelo TDS-3032.

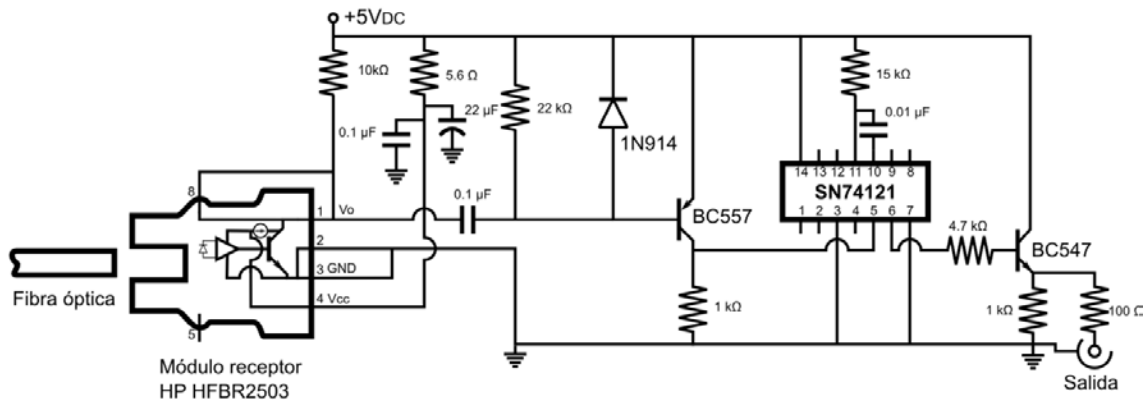
Dicho osciloscopio cuenta con dos canales de entrada, ancho de banda de 300 MHz, rapidez máxima de muestreo de 2.25 giga-muestras por segundo, e interfases GPIB Y RS-232 para comunicación con otros dispositivos. Este equipo es de tipo digital, por lo que la señal capturada es discreta tanto para el voltaje como para el tiempo. Sobre esto último, el osciloscopio ajusta automáticamente su rapidez de muestreo de forma tal que le permita capturar siempre 10000 puntos por medición. Por ejemplo, si se utiliza la escala de 4  $\mu\text{s}/\text{div}$ , el barrido total tendrá 40  $\mu\text{s}$  (10div), en la que el equipo ajusta la rapidez a una muestra cada 4 ns, lo que equivale a 250 mega-muestras por segundo. Si se multiplica esta rapidez por los 40  $\mu\text{s}$  que dura la medición, se obtienen las 10000 muestras mencionadas.

La selección de la escala temporal se basó en el dato de la velocidad del frente de choque ( $\sim 1500$  m/s) y las distancias a recorrer por el mismo (11.5 a 23 cm), llegando por inspección a la escala finalmente utilizada, que fue de 10  $\mu\text{s}/\text{div}$ . Para la escala de voltajes, se consultaron resultados previos obtenidos

con generadores electrohidráulicos y en particular del generador utilizado (con parámetros nominales). De manera análoga a la escala temporal, se realizaron ensayos de inspección que determinaron el uso de escalas entre 5mV/div y 50mV/div, según la magnitud de presión a medir por la cantidad de energía liberada en cada descarga.

Por la relativa corta duración de un frente de choque ( $\sim 10 \mu\text{s}$ ), comparada con el tiempo mínimo necesario que debe transcurrir para emitir el siguiente (tiempo de recarga del generador:  $\sim 1 \text{ s}$ ), fue indispensable utilizar el osciloscopio en modo de disparo sencillo (“single sequence”) con una señal de sincronía adecuada. Es decir, en dicho modo el osciloscopio espera una señal específica para inicial el muestreo.

Como se mencionó en la sección 1.3, el generador electrohidráulico posee un interruptor por ionización que primordialmente cierra el circuito de descarga del banco de condensadores de alto voltaje, lo cual también genera un destello luminoso. Al conducir esta señal luminosa por una fibra óptica y convertirla a tipo eléctrico mediante el circuito mostrado en la figura 2.5, se obtuvo la señal de sincronía antes mencionada.



**Figura 2. 5 Conversión de la señal óptica de sincronía a tipo eléctrico.**

Con dicha señal de sincronía ya en forma de pulso eléctrico con amplitud y duración constantes (4 V, 0.1 ms), sólo fue necesario retardar el inicio del

barrido del osciloscopio considerando el tiempo que transcurre desde que se genera el frente de choque y hasta que este alcanza el punto de interés. Es decir, si la distancia de propagación del frente de choque es de 20 cm (por ejemplo), el tiempo transcurrido resulta de 133  $\mu\text{s}$ , lo que para una sincronía inmediata en la escala de tiempo mencionada (10  $\mu\text{s}/\text{div}$ ) ocasiona que la secuencia de captura de datos no alcance a cubrir la llegada del frente de choque, ya que sólo se disponen de 100  $\mu\text{s}$  de barrido (10 divisiones de tiempo).

Para solucionar tal inconveniente se usó el modo de disparo retardado, mediante el cual el osciloscopio espera un tiempo previamente programado antes de iniciar el barrido activado por la señal de sincronía. Tal tiempo de retardo se adecúa de tal manera que el valor de retraso que se asigna se sitúa en el centro de la secuencia de muestras a capturar (muestra 5000, que se captura a medio barrido del osciloscopio). Por ejemplo, si se ajusta el retraso a 130  $\mu\text{s}$  y la escala temporal es de 10  $\mu\text{s}/\text{div}$ , entonces la secuencia de datos adquiridos es desde 80  $\mu\text{s}$  (130  $\mu\text{s}$  menos 5 divisiones de tiempo) hasta 180  $\mu\text{s}$  (130  $\mu\text{s}$  más 5 divisiones de tiempo).

## *2.5 Sistema de adquisición y almacenamiento de datos.*

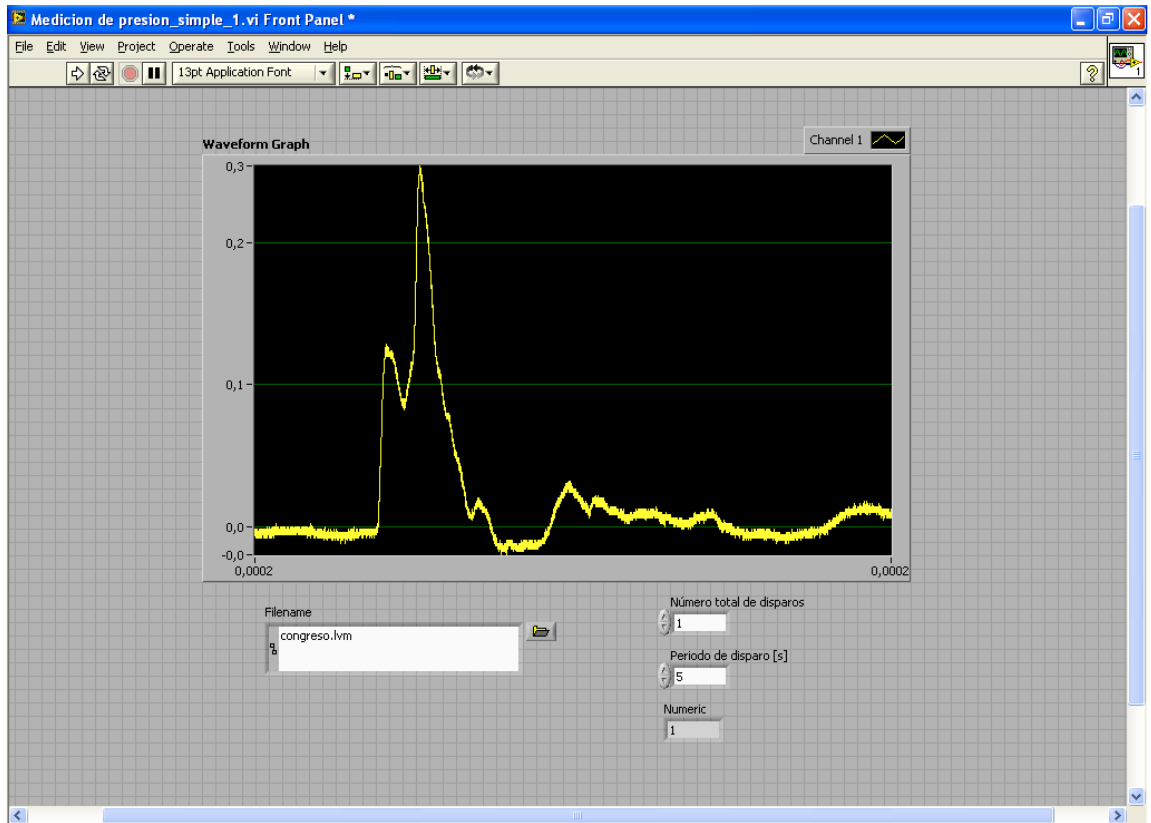
Con los dispositivos mencionados hasta ahora, se podían ya detectar y medir los perfiles de presión originados por un frente de choque. El transductor de presión y el osciloscopio eran suficientes para los propósitos descritos, pero su aplicación a centenas de mediciones representaba una labor tediosa y poco confiable por los posibles errores estocásticos inherentes al experimentador (errores humanos).

Cuando se requiere una investigación exhaustiva en la cual se deban medir, analizar y almacenar cientos o miles de datos, es más conveniente

aprovechar la tecnología con la que se cuenta, desarrollando un sistema que realice automáticamente las tareas rutinarias y que requiera mínima participación del experimentador. Dicho sistema no solamente disminuye el tiempo invertido en la investigación, sino que también aumenta el control sobre los parámetros de interés, mejorando así la confiabilidad de las mediciones.

En la sección 2.2 de este capítulo se determinó la cantidad de eventos a registrar (3375), lo que justificó el diseño de un sistema para controlar el disparo del generador y la adquisición y almacenamiento de los perfiles de presión obtenidos, dejando el cambio de posición del transductor y los ajustes del osciloscopio en manos del experimentador. Para ello se utilizó la interfase GPIB del osciloscopio descrito, a la cual se conectó una tarjeta PCI-GPIB que fue instalada en una computadora personal. Posteriormente se diseñó e implementó un primer instrumento virtual con el paquete LabView de la marca “National Instruments”, que permitió la gestión de las señales de disparo y el almacenamiento de los datos correspondientes a cada frente de choque generado.

En la figura 2.6 se muestra el panel frontal de dicho instrumento virtual, en el que se incluyeron únicamente 3 controladores y dos testigos. Los controladores se habilitaron para manejar las funciones básicas de asignar un nombre al archivo generado, manejar la cantidad de disparos a registrar (fijado en 15 disparos por evento) y definir la frecuencia de los mismos.



**Figura 2. 6 Panel frontal del primer instrumento virtual desarrollado.**

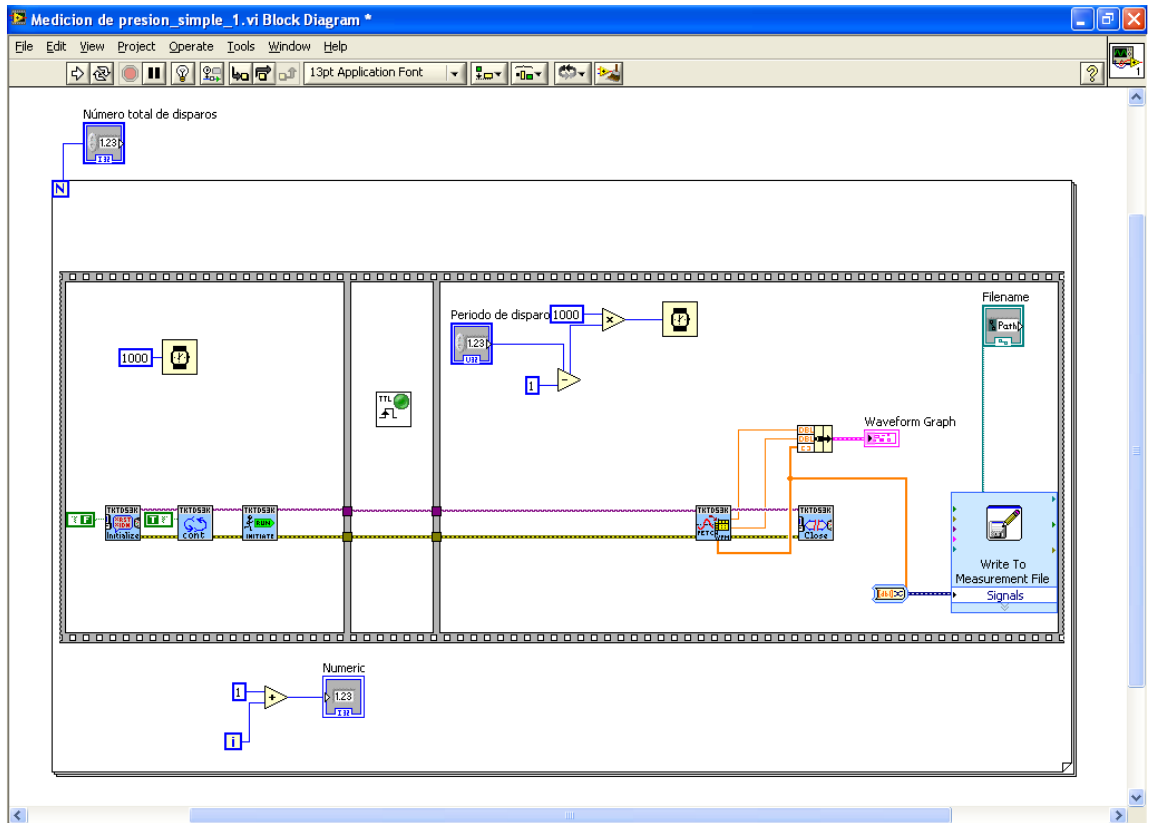
Los testigos se incluyeron para verificar que las mediciones se efectuaran de manera correcta. El primero de ellos mostraba una gráfica burda del perfil de presión capturado, mientras que el segundo desplegaba el número de índice correspondiente a cada disparo.

La frecuencia de los disparos, o en forma equivalente el período de tiempo entre los mismos, se fijó de acuerdo al tiempo de recarga de los condensadores del generador, el cual fue determinado en la sección 1.3 del capítulo 1, con un valor mínimo de 1.33 segundos.

Para la programación de dicho instrumento virtual, inicialmente se incluyeron instrucciones para establecer comunicación con el osciloscopio y activar el modo “single sequence” antes descrito. Posteriormente se anexó un

segundo instrumento virtual para efectuar el disparo del generador de manera remota, lo cual se describe en la sección siguiente. Finalmente se agregaron los bloques necesarios para desplegar y almacenar los perfiles de presión correspondientes a cada frente de choque generado, tarea que fue completada mediante la herramienta “write to measurement file” (escribir a archivo de medición), según se muestra en la figura 2.7.

Cada archivo de medición con su respectivo nombre secuencial asignado, se configuró para dos columnas de datos: una para el tiempo relativo de cada medición (se muestra como un índice de 0 a 9999) y la otra para el voltaje registrado por el hidrófono a través del osciloscopio. Adicionalmente se incluyeron encabezados de datos generales tales como la fecha y hora en la que se llevaron a cabo las mediciones, el nombre del usuario, etc.



**Figura 2. 7 Diagrama de los bloques incorporados para el despliegue y almacenamiento de los perfiles de presión.**

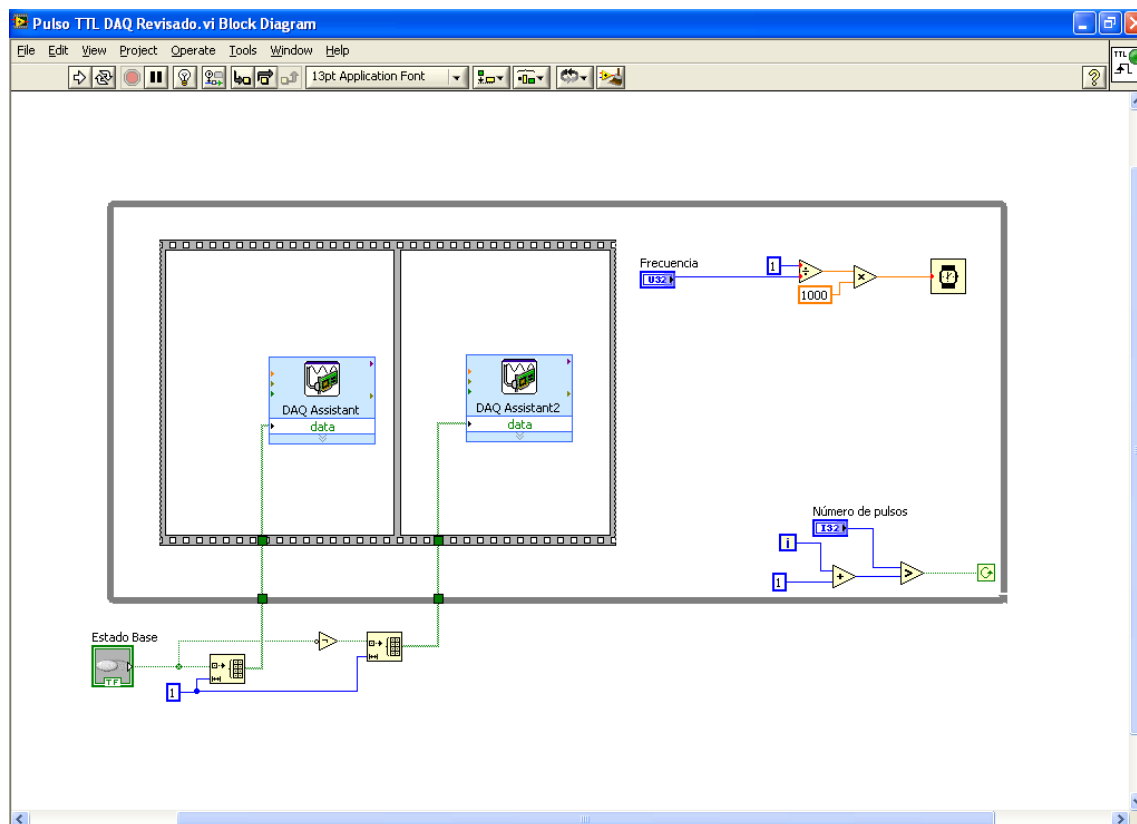
## *2.6 Control remoto de disparo de los frentes de choque.*

Las señales para disparar cada frente de choque en el generador electrohidráulico, también fueron generadas mediante el paquete LabView. Para ello se utilizó una tarjeta de conversión digital-analógica tipo DAQ, modelo NI-USB 6008, manufacturada por la empresa National Instruments. Entre las características principales de esta tarjeta se destaca su puerto I/O (entrada-salida), el cual es capaz de proveer naturalmente la señal necesaria.

De manera análoga al primer instrumento virtual antes descrito, se usaron los controladores suministrados por dicha empresa para elaborar otro instrumento virtual dedicado a manejar la fuente de disparo original del



generador, mediante el control del estado del puerto digital de la tarjeta mencionada. Se incluyeron tres bloques en una estructura secuencial, donde el bloque inicial se encarga de colocar el puerto digital en su estado base (0), seguido de una instrucción para ubicar un estado 1 (5 volts), finalizando con un último bloque para regresar nuevamente al estado 0. Así, se generaron pulsos de voltaje con el inconveniente de que su ciclo de trabajo (ancho) depende de las características del sistema formado por la computadora personal, la tarjeta antes mencionada y la interface utilizada. En la figura siguiente se muestra los bloques de este segundo instrumento virtual.



**Figura 2. 8 Generación de las señales de disparo de los frentes de choque.**

Al probar el disparo remoto implementado, se encontró que la señal enviada por la tarjeta excedía el ciclo de trabajo requerido por la fuente de disparo original de los frentes de choque. En otras palabras, el pulso generado

digitalmente fue demasiado ancho para las características originales del control analógico de los disparos.

Para solventar este último problema, se diseñó e incorporó una etapa de acoplamiento electrónico entre la tarjeta mencionada y la entrada de la fuente de control original, cuyo circuito se muestra en la figura 2.9 y corresponde a una configuración típica de un multivibrador monoestable no re-disparable, con una constante de tiempo (ciclo de trabajo del pulso de salida) de 50  $\mu$ s.

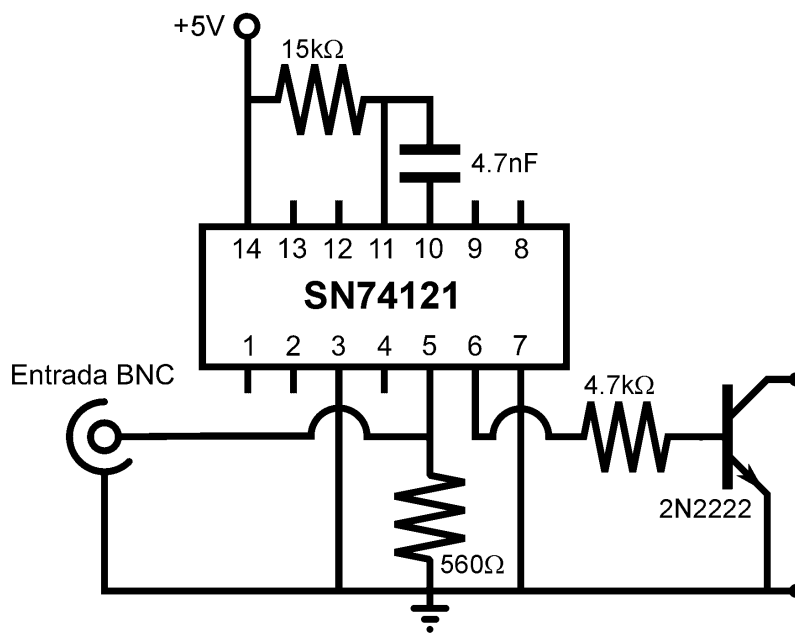


Figura 2. 9 Etapa de acoplamiento para la señal de disparo generada digitalmente.

## Capítulo 3

---

La gran totalidad de resultados obtenidos en forma numérica (valores promedio de cada caso analizado, con sus respectivas desviaciones estándar y coeficientes de variación), aún cuando se lograron resumir en las tablas incluidas en el apéndice 1 de este trabajo, estas no permiten una presentación ágil de las tendencias encontradas en cada combinación de variables. Por ello, se dedicó este capítulo a la exposición en forma gráfica de dichos resultados, a fin de tener un panorama general del comportamiento de la presión en las ubicaciones espaciales descritas en el capítulo anterior (tabla 2.1 de la sección 2.2), contemplando los cambios que producen las variaciones de los parámetros de generación de los frentes de choque (capacidad, voltaje).

Tales resultados gráficos se organizaron a partir de los valores de capacidad empleados (80, 160 y 500 nF), dedicando una sección de este capítulo a cada uno de ellos. Así, los resultados mostrados en cada sección corresponden a una capacidad fija y permiten mostrar los cambios de la presión para diversas combinaciones espaciales, ordenadas según los voltajes de descarga utilizados (16, 18, 20, 22 y 24 kV).

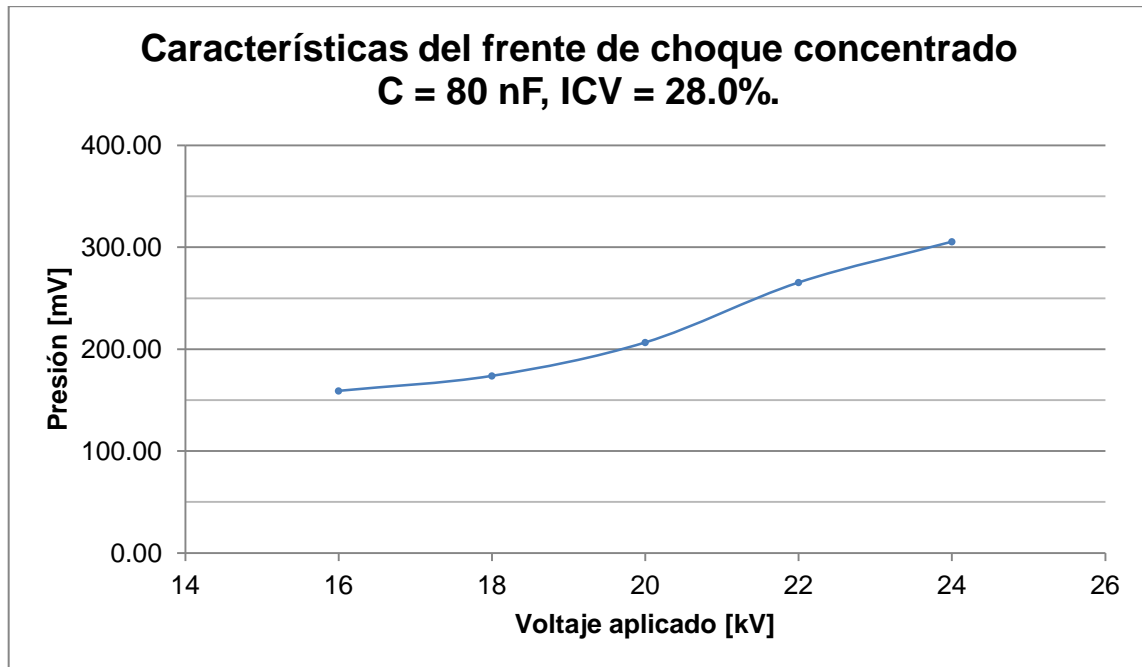
Las líneas que unen los puntos en cada gráfica, no son líneas de tendencia y sólo se incluyeron para facilitar la distinción entre los diversos comportamientos agrupados conforme a lo mencionado en el párrafo anterior. Por el mismo motivo, tampoco se incluyen las incertidumbres (barras de error) correspondientes a cada punto graficado. Como un simple indicador de estas últimas, se ha incluido en cada gráfica una variable numérica llamada “indicador del coeficiente de variación” (ICV), que es un promedio simple de los coeficientes de variación encontrados en cada resultado.

Previo a cada grupo de gráficas y para fines de referencia, cada sección empieza con el perfil de presiones concentradas (en el punto focal, utilizando reflector) para después mostrar lo análogo (presión vs voltaje) pero sin reflector,

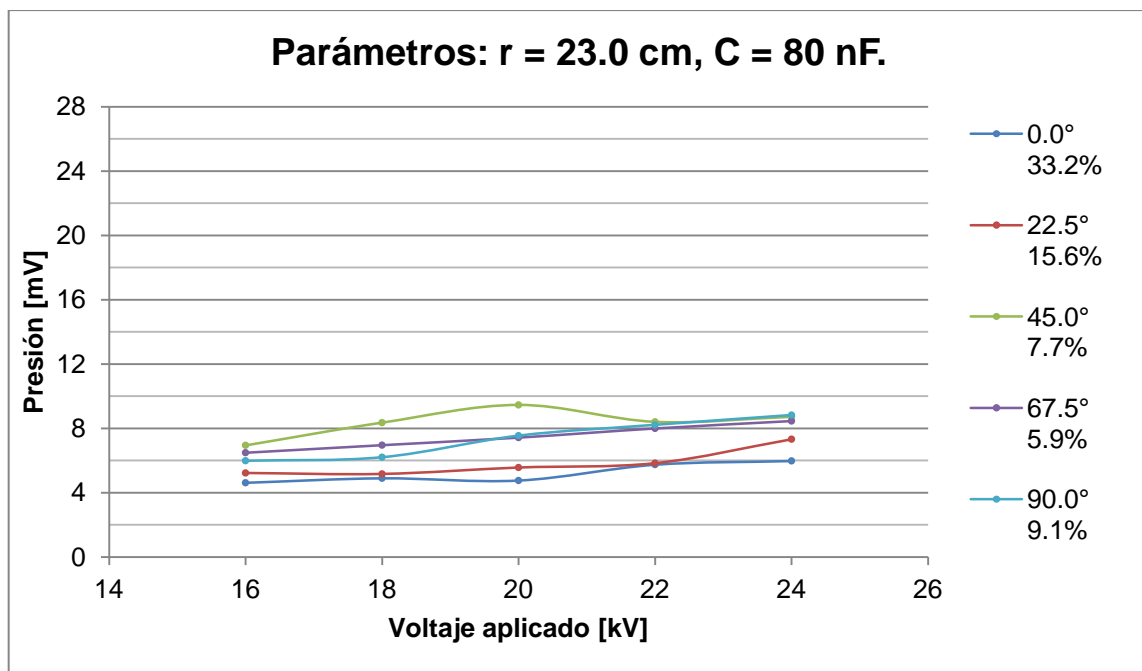
para tres magnitudes de distancia (23, 17.3 y 11.5 cm) en los que el ángulo quedó de forma paramétrica.

Se incluyen algunos breves comentarios después de cada grupo de datos presentados, para mostrar la evolución de los análisis hechos sobre los mismos, los cuales finalmente se presentan en el capítulo 4 de forma más sintetizada.

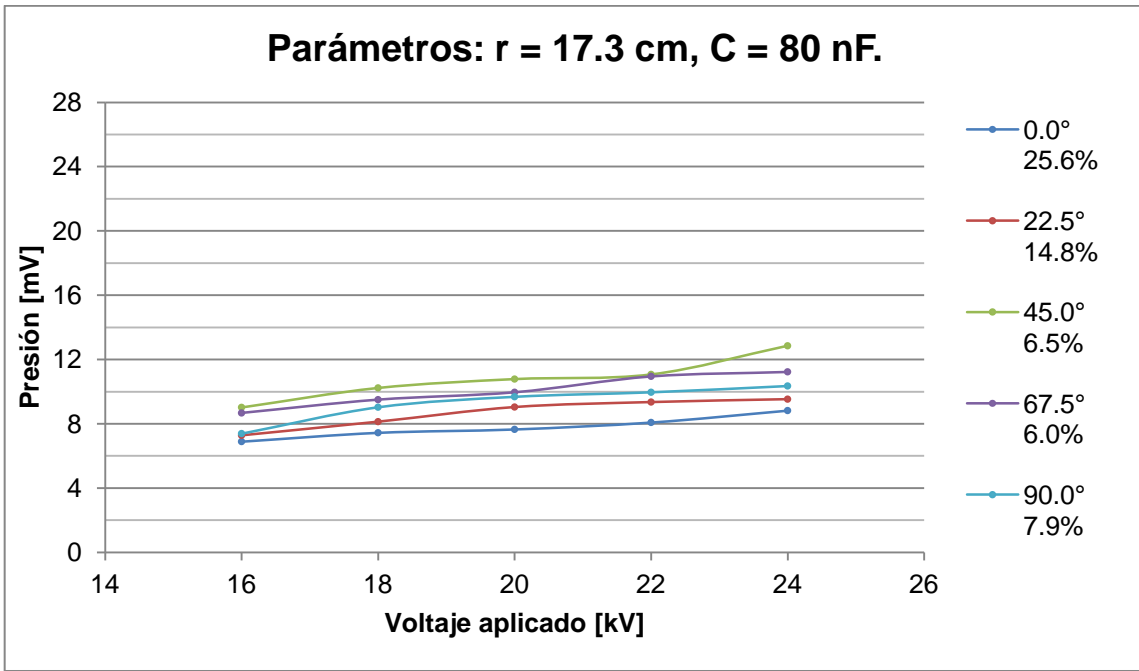
### 3.1 Resultados para $C = 80\text{nF}$ .



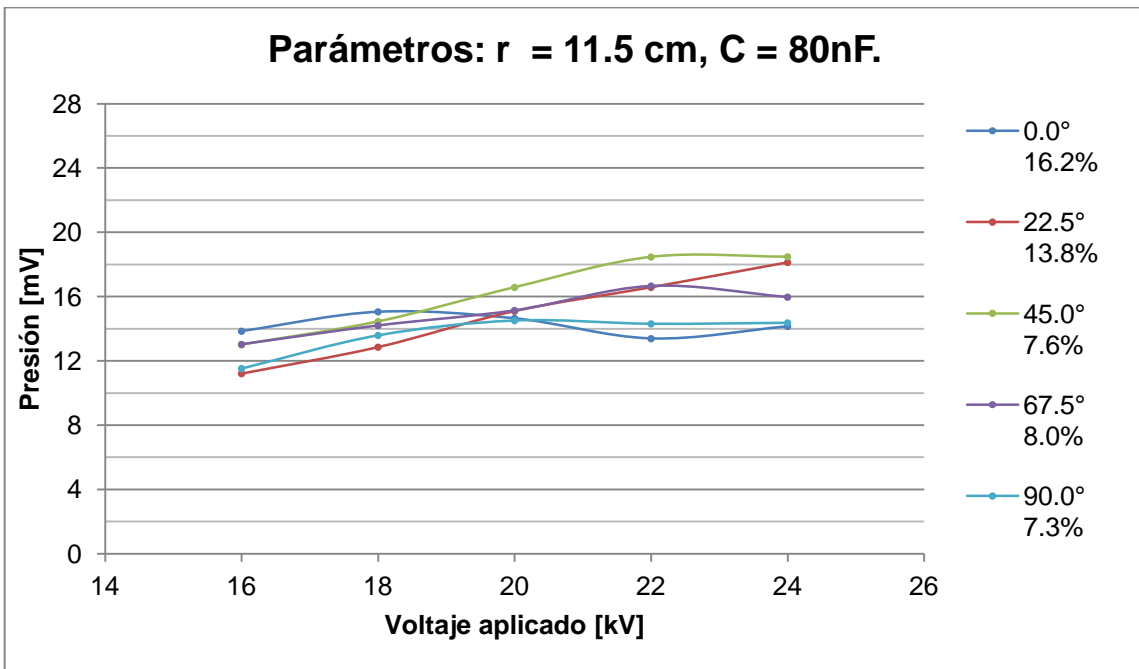
Gráfica 1



Gráfica 2



Gráfica 3



Gráfica 4

En la gráfica 1 se observa la variación de la presión con respecto del voltaje aplicado para un frente de coque concentrado. Dicho frente fue generado al almacenar energía en un banco de condensadores de 80 nF. Se puede observar el crecimiento de la presión al aumentar el voltaje, dicha presión se encuentran entre 150 y 300 mV.

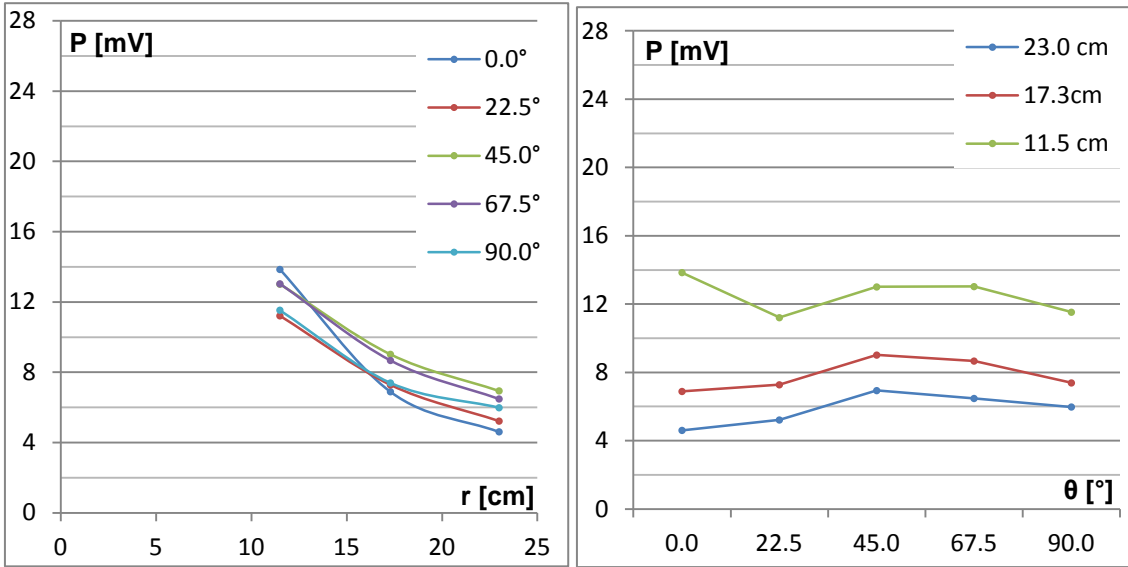
Posteriormente se muestran las gráficas correspondientes a las mediciones de presión para frentes de choque sin concentración. En primer lugar se mostraron los datos correspondientes a la presión detectada en el punto focal, pero sin el uso de reflector (23 cm encima de la bujía). Se observa nuevamente que en general la presión aumenta con el crecimiento en el voltaje aplicado. Es lógico notar que las presiones medidas en frentes de choque sin concentrar son considerablemente más bajas que aquellas causadas con frentes de choque concentrados. A 23 cm de distancia, las presiones varían en un intervalo entre 4 y 8 mV al variar el voltaje entre 16 y 24 kV.

Los datos obtenidos a 17.3 y 11.5 cm (gráficas 4 y 5) son consistentes con lo descrito en el párrafo previo, es decir la presión aumenta en general al aumentar el alto voltaje de descarga con la diferencia de que los intervalos de presión medida se desplazan hacia valores más altos: en el caso de los 17.3 cm se obtienen presiones entre 6 y 14 mv, mientras que a 11.5 cm, la presión se encuentra entre los 10 y los 18 mV.

Del primer grupo de datos se puede observar que la presión aumenta con el voltaje aplicado y de manera inversa con la distancia desde la bujía; esto es, la presión aumenta al disminuir la distancia.

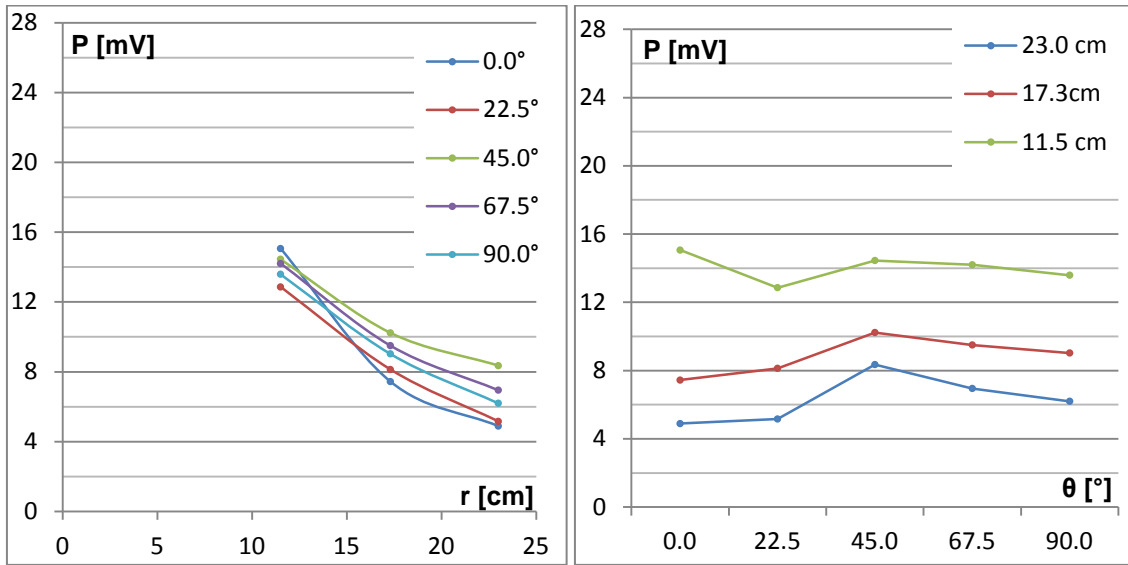
A continuación se muestran los mismos resultados anteriores, pero graficados de manera distinta.

**Características del frente para  $V = 16 \text{ kV}$ ,  $C = 80 \text{ nF}$ .**



**Gráfica 5 a (izquierda); b (derecha).**

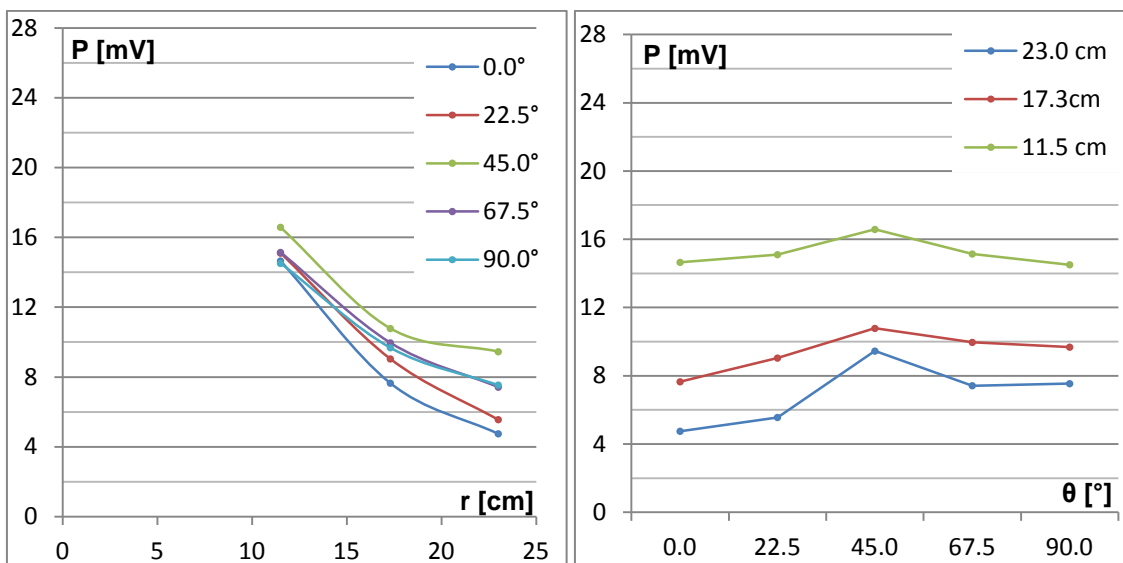
**Características del frente para  $V = 18 \text{ kV}$ ,  $C = 80 \text{ nF}$ .**



**Gráfica 6 a (izquierda); b (derecha).**

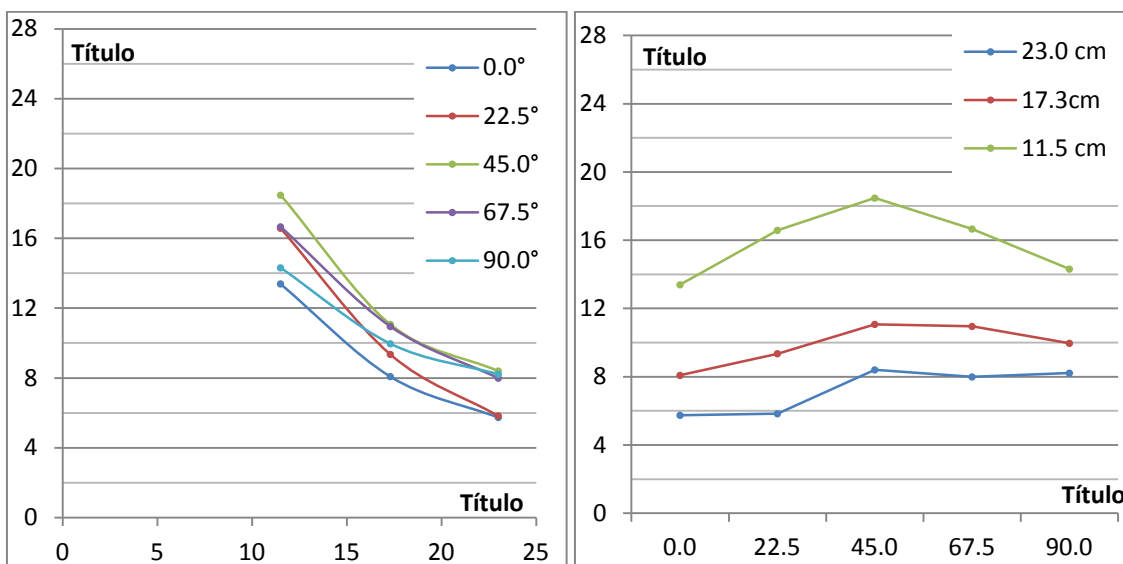


### Características del frente para $V = 20 \text{ kV}$ , $C = 80 \text{ nF}$ .



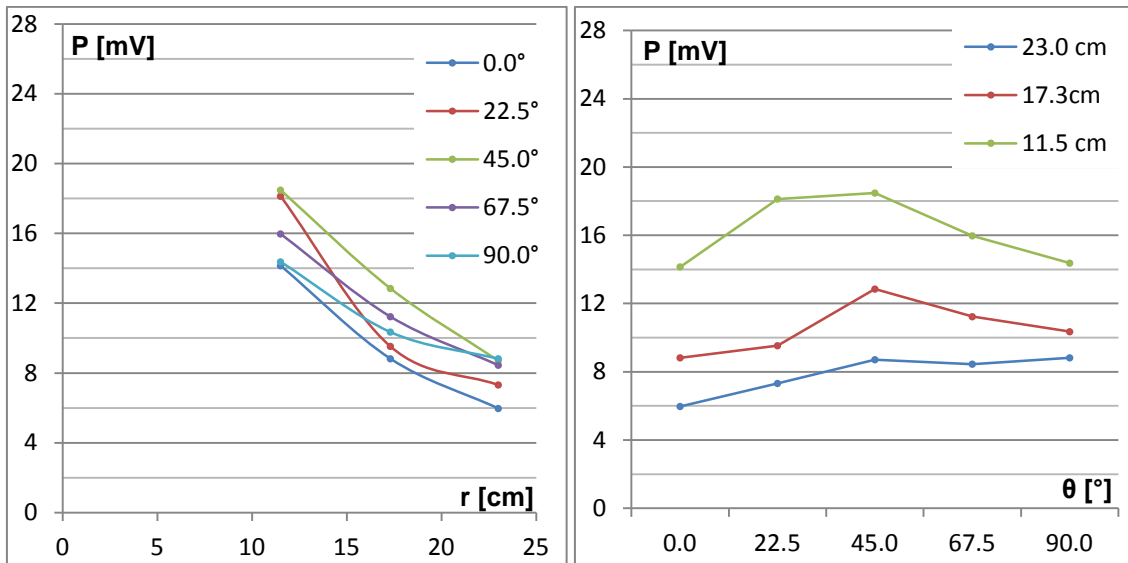
Gráfica 7 a (izquierda); b (derecha).

### Características del frente para $V = 22 \text{ kV}$ , $C = 80 \text{ nF}$ .



Gráfica 8 a (izquierda); b (derecha).

### Características del frente para $V = 24 \text{ kV}$ , $C = 80 \text{ nF}$ .

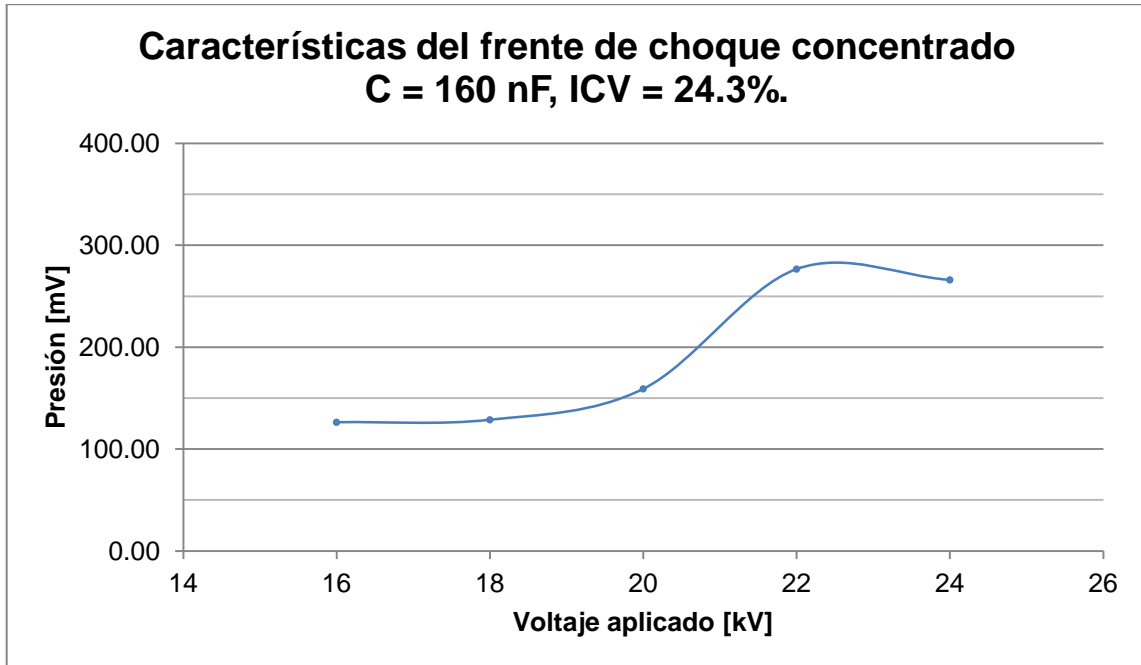


Gráfica 9 a (izquierda); b (derecha).

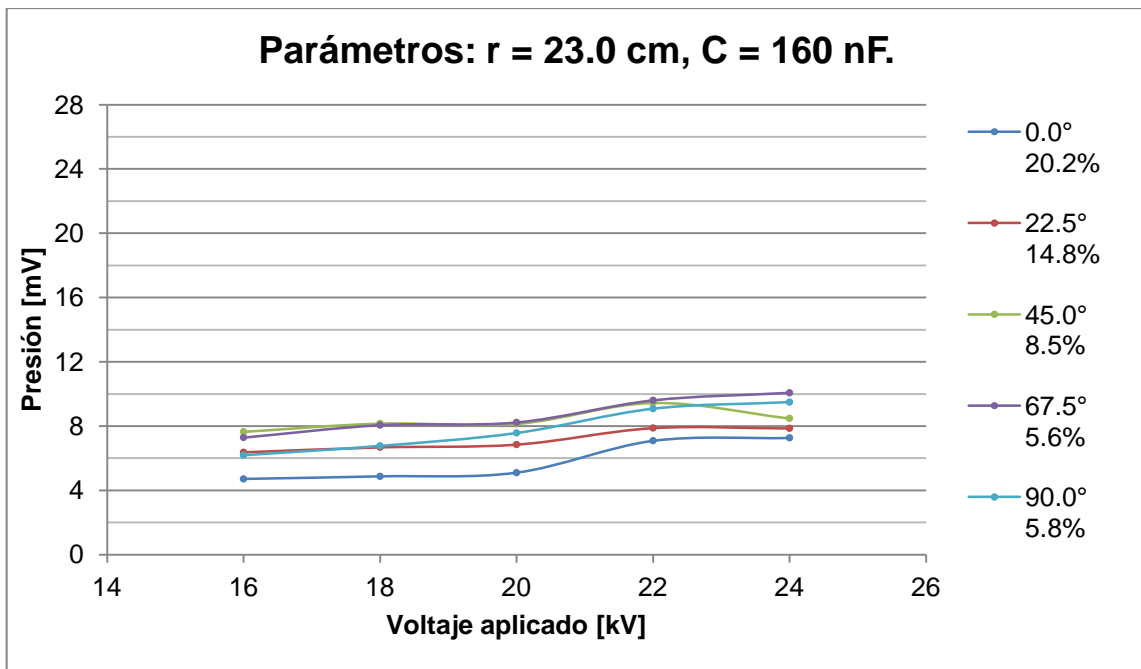
Este segundo grupo de datos corresponde a las variaciones de presión con respecto de la distancia y el ángulo para distintos valores de alto voltaje aplicado. En la gráfica 5 se observa una disminución de la presión al aumentar la distancia desde el origen de la perturbación. El comportamiento de los datos es similar en  $22.5^\circ$ ,  $45.0^\circ$  y  $90.0^\circ$  encontrado las presiones más elevadas en la serie de  $45.0^\circ$ . En  $0.0^\circ$  el comportamiento difiere del primer grupo con un aumento más notorio en la presión de 17.3 a 11.5 cm respecto de los demás ángulos (esto se puede notar en la gráfica 5b). Como es de esperarse, a 11.5 cm se alcanzan las presiones más grandes del conjunto.

En los casos de 18, 20, 22 y 24 kV (gráficas 6, 7, 8 y 9 respectivamente) se ven comportamientos similares al descrito anteriormente, la presión crece al disminuir la distancia. En general se nota que las mayores presiones se encuentran a  $45.0^\circ$  ya sea total o parcialmente. A  $0.0^\circ$  y  $90^\circ$  las presiones son menores. La presión más alta del conjunto completo es alcanzada en el conjunto de parámetros 24 kV, 11.5 cm y  $45.0^\circ$  y es de aproximadamente 18 kV, siendo entre el 6 y 12% de la presión que se logra concentrando la onda de choque.

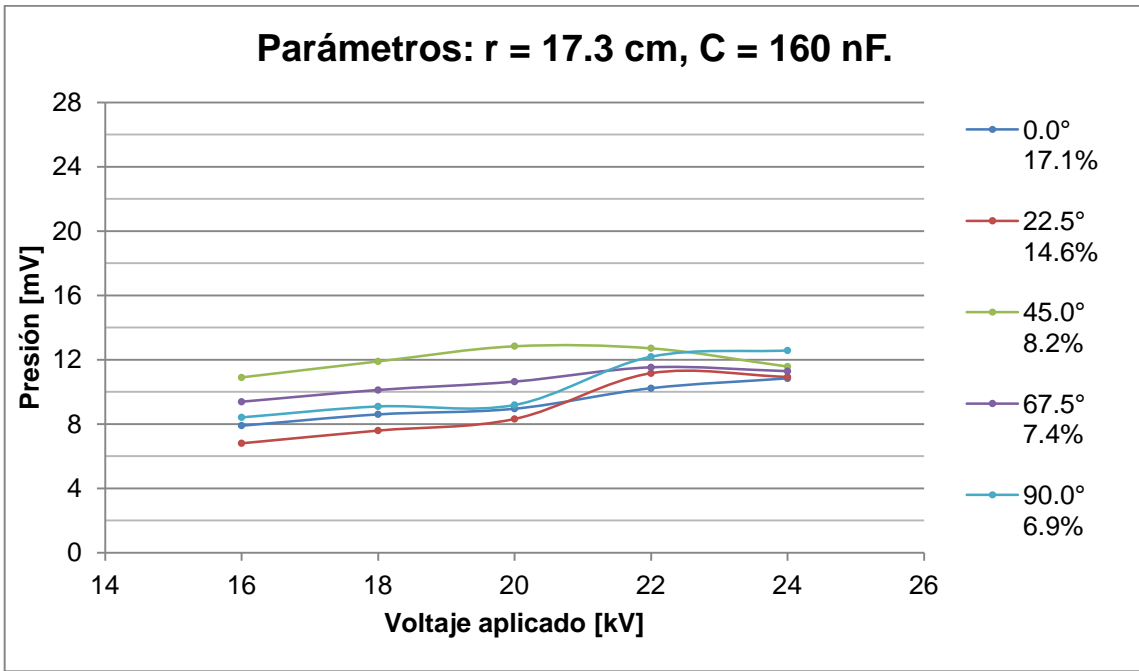
### 3.2 Resultados para $C = 160\text{nF}$ .



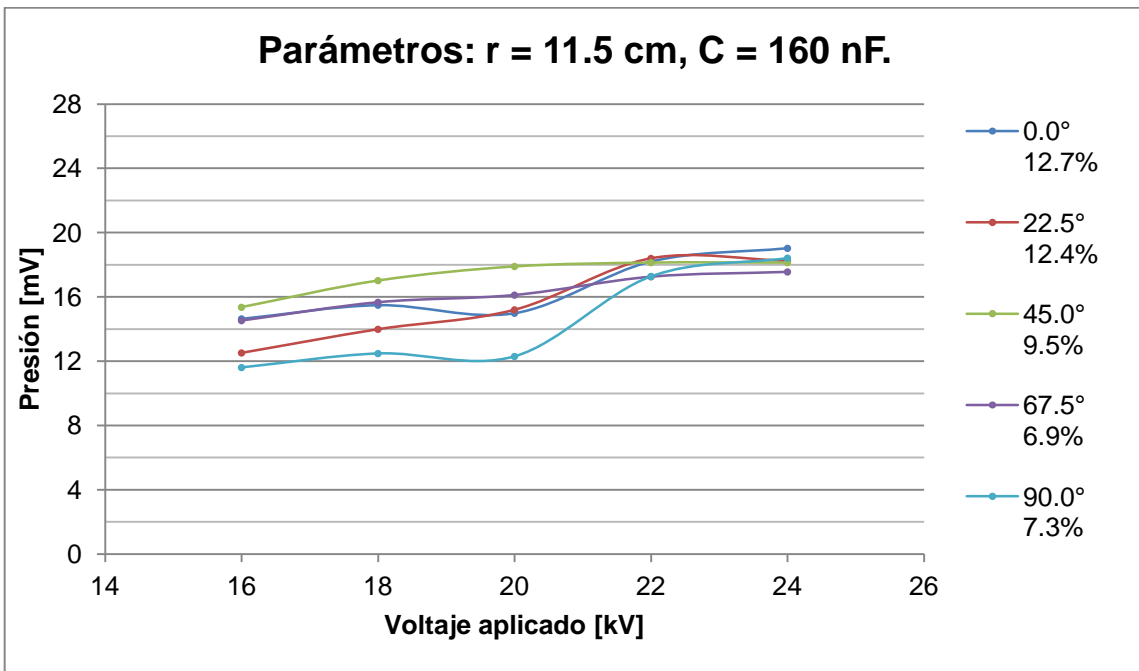
Gráfica 10



Gráfica 11



Gráfica 12



Gráfica 13

En la gráfica 10 se encuentran las mediciones de presión de un frente de choque concentrado, generado con 160 nF de capacidad a diferentes voltajes. De manera análoga con el primer grupo de datos (correspondiente a 80 nF) se observa el incremento de la presión a medida que se aumenta el voltaje, este incremento es más notorio en el paso de 20 a 22 kV. De 16 a 18 kV y de 22 a 24kV, la presión prácticamente se mantiene.

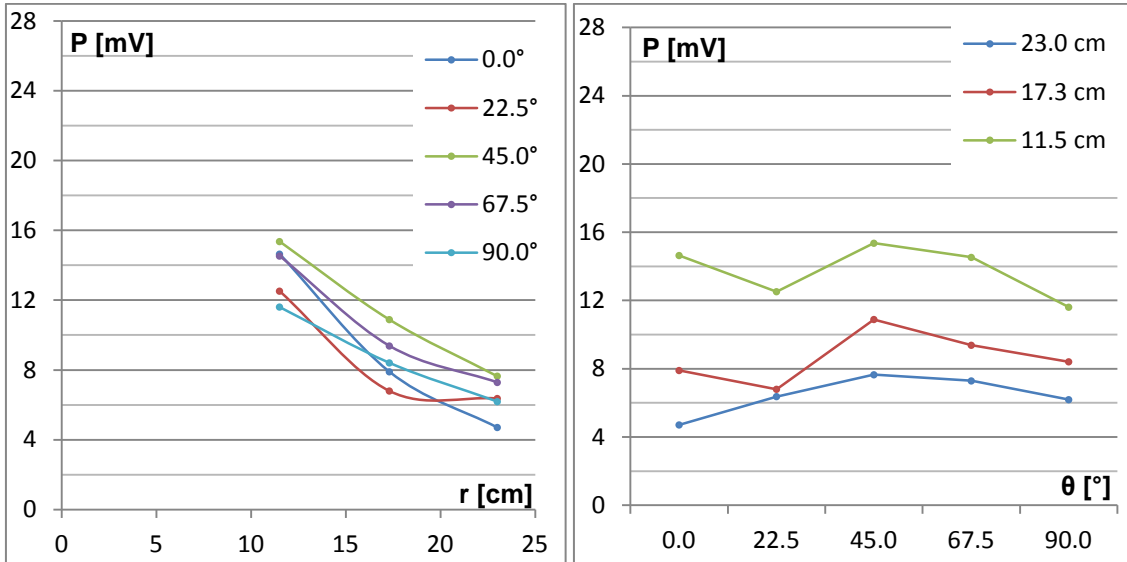
Los perfiles de presión causados por frentes de choque sin concentrar muestran comportamientos cualitativos similares que aquellos que se obtienen a partir de frentes concentrados, esto es, la presión aumenta con el incremento del voltaje aplicado y decrece cuando se mide a mayor distancia desde el origen de la perturbación. Los cambios de presión son sutiles, incrementado su valor aproximadamente 1 mV por cada 2 kV de voltaje aplicado (gráfico 11). Nuevamente se nota que en la parte central (a 45.0° y 67.5°) se obtienen presiones ligeramente superiores que en las regiones periféricas (0.0° y 90.0°).

En la gráfica 12 la serie dominante es la de 45.0° en el intervalo [16,22] kV. Se aprecian comportamiento similares en las series de 22.5° y 90°; en ambos casos, el aumento de presión es mayor en el intervalo [20,22] kV.

Las tendencias son más complejas en la gráfica correspondiente a 11.5 cm (gráfico 13) que en los casos anteriores. En los extremos (0.0° y 90.0°) los datos muestran relaciones similares, así como en 45.0° y 67.5°. Las presiones más elevadas se muestran en 45.0° sin embargo, en los voltajes más elevados las presiones se nivelan con aquellas medidas en los otros ángulos; a 24 kV la presión más elevada es a 0.0°.

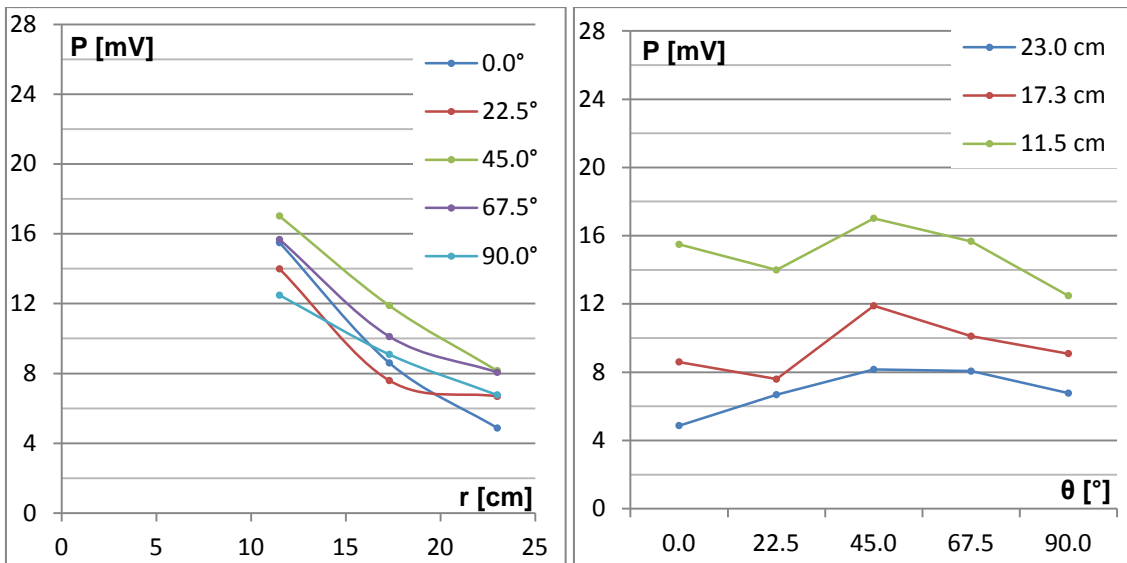
Consecuentemente con lo descrito en la sección 3.1, las presiones más elevadas del conjunto se encuentran en las distancias más pequeñas (11.5 cm) y con los voltajes más elevados (24 kV), dichas presiones alcanzan valores de alrededor de 18 mV, entre 6 y 12% de la presión de referencia.

**Características del frente para  $V = 16$  kV,  $C = 160$  nF.**



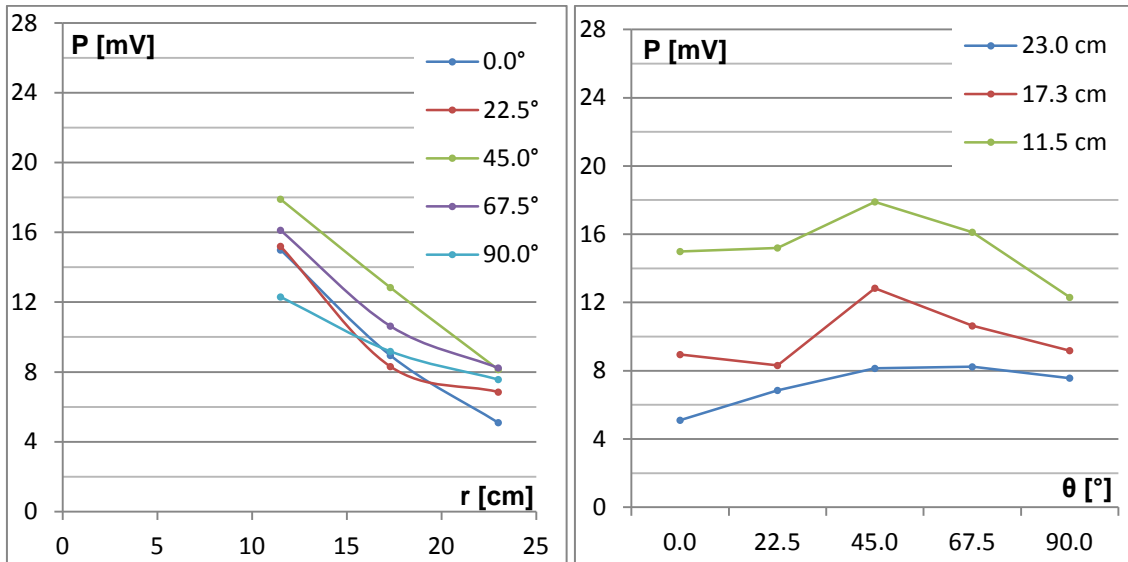
**Gráfica 14 a (izquierda); b (derecha).**

**Características del frente para  $V = 18$  kV,  $C = 160$  nF.**



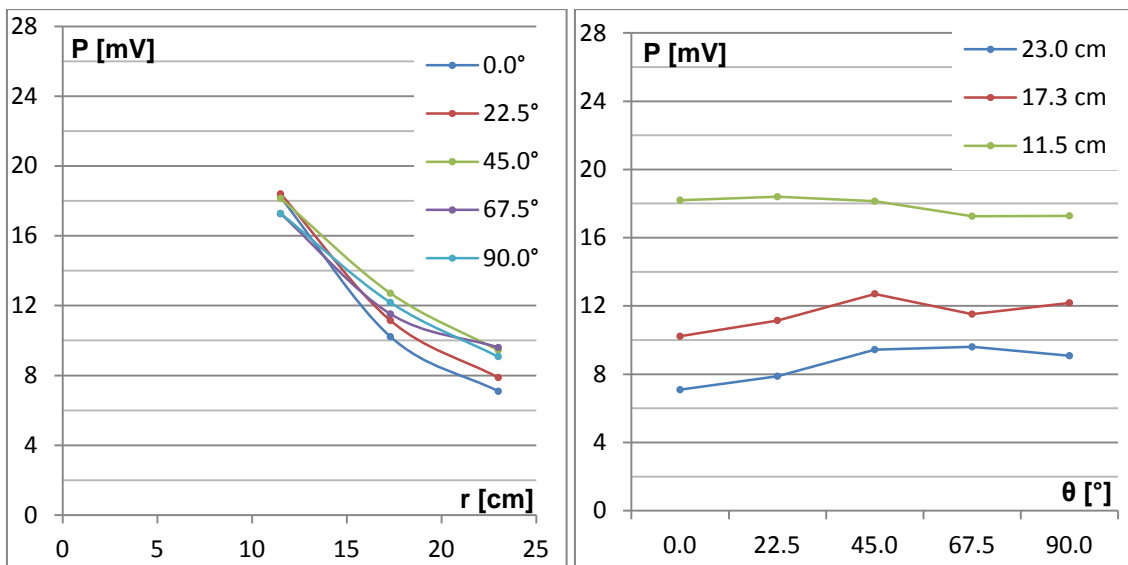
**Gráfica 15 a (izquierda); b (derecha).**

**Características del frente para  $V = 20 \text{ kV}$ ,  $C = 160 \text{ nF}$ .**



**Gráfica 16 a (izquierda); b (derecha).**

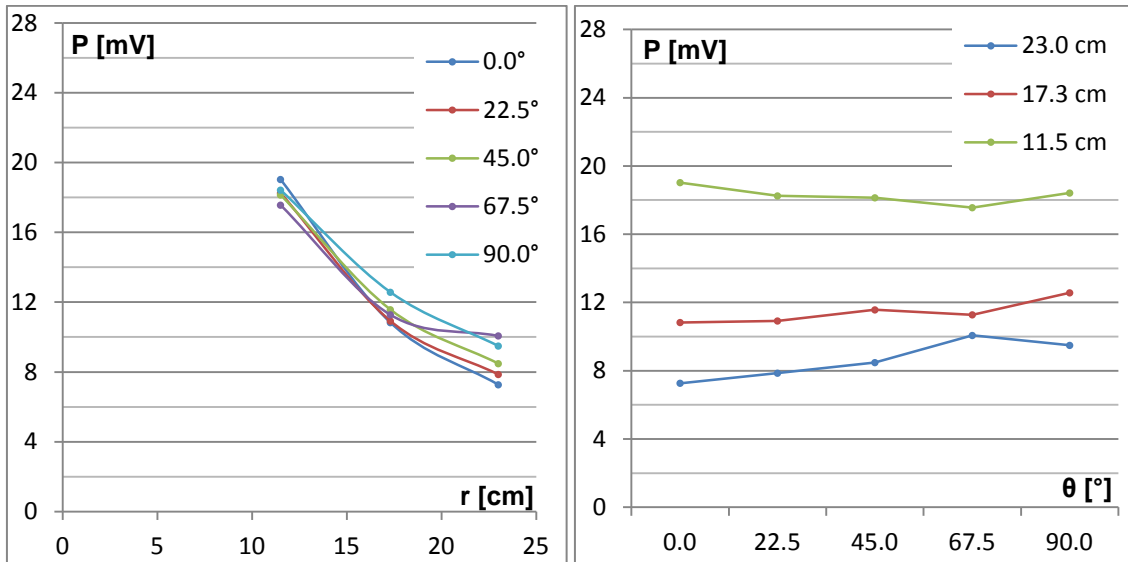
**Características del frente para  $V = 22 \text{ kV}$ ,  $C = 160 \text{ nF}$ .**



**Gráfica 17 a (izquierda); b (derecha).**



### Características del frente para $V = 24 \text{ kV}$ , $C = 160 \text{ nF}$ .



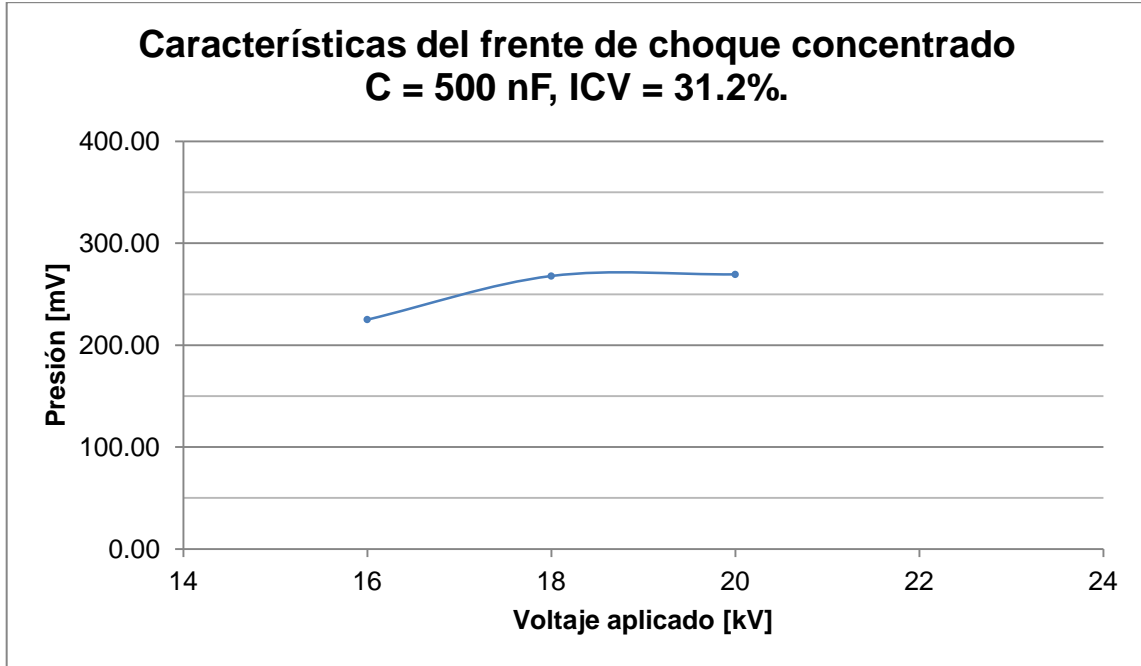
Gráfica 18 a (izquierda); b (derecha).

En este grupo de datos se observan nuevamente las características cualitativas generales puntualizadas en los comentarios previos. La presión disminuye al aumentar la distancia con presiones más elevadas en la serie de 45.0°. En la gráfica 14 se puede notar que las series de 22.5° y 67.5° muestran tendencias que sugieren relaciones no lineales entre los parámetros involucrados (presión, distancia y ángulo).

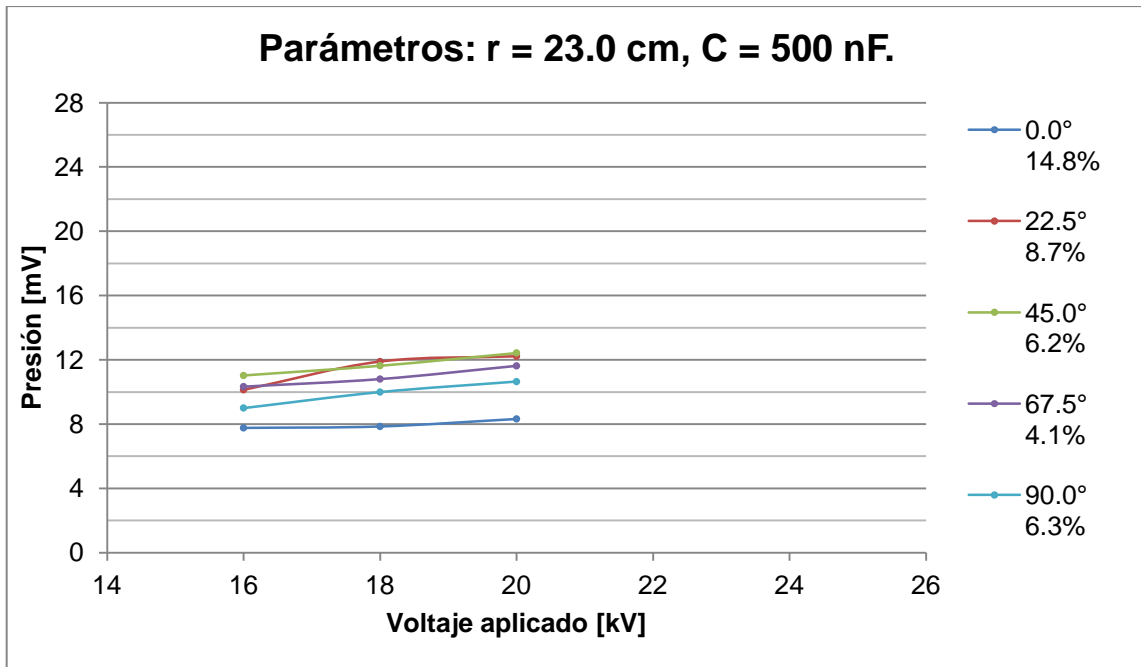
Los datos correspondientes a 18 kV (gráfica 15) se comportan de manera similar que aquellos obtenidos con 16 kV (gráfica 14). La serie de 45.0° es nuevamente la serie dominante de todo el conjunto. La diferencia entre los datos es evidente en las presiones máximas alcanzadas: a 16 kV se alcanzan presiones máximas por debajo de los 16 mV, mientras que con 18 kV se logran presiones de alrededor de 17 mV.

En la gráfica 16 (160 nF @ 20 kV) se repiten los comportamientos mencionados no obstante, la distinción de las series es notoriamente más marcada. En contraste, en las gráficas 17 y 18 resulta complicada la determinación de la serie de datos dominante, se observan dos grupos de datos separados por menos de 1 mV (gráfica 17), a 45.0°, 67.5° y 90.0° los datos de presión difieren poco a radios iguales; por otro lado, a 0.0° se encuentran los datos con la presión más baja.

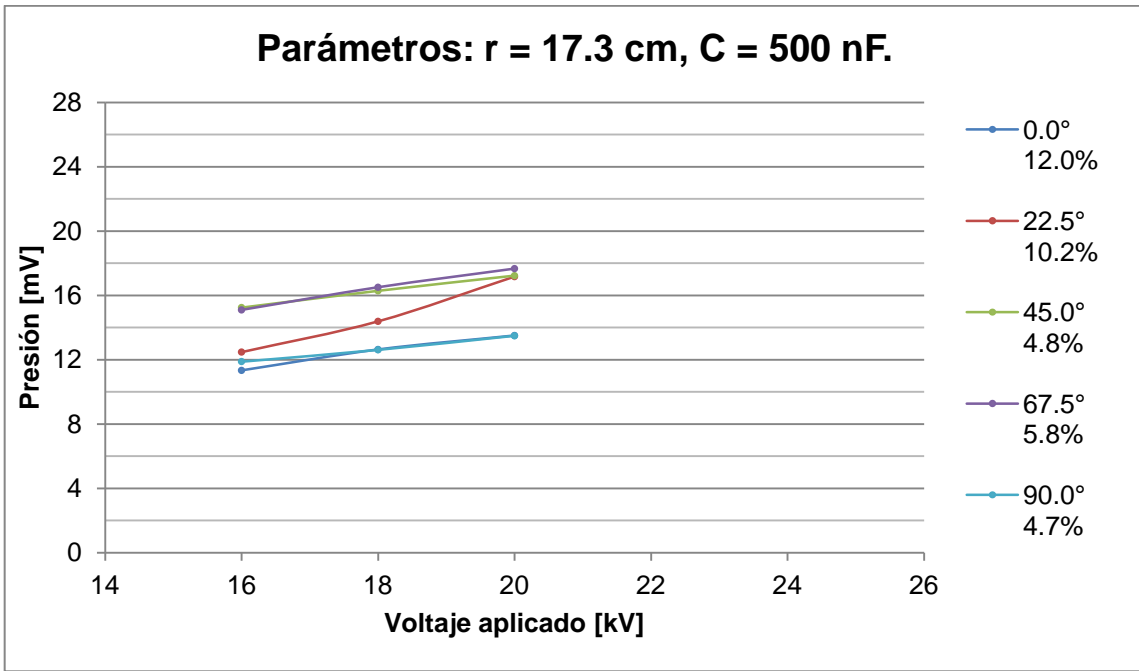
### 3.3 Resultados para $C = 500\text{nF}$ .



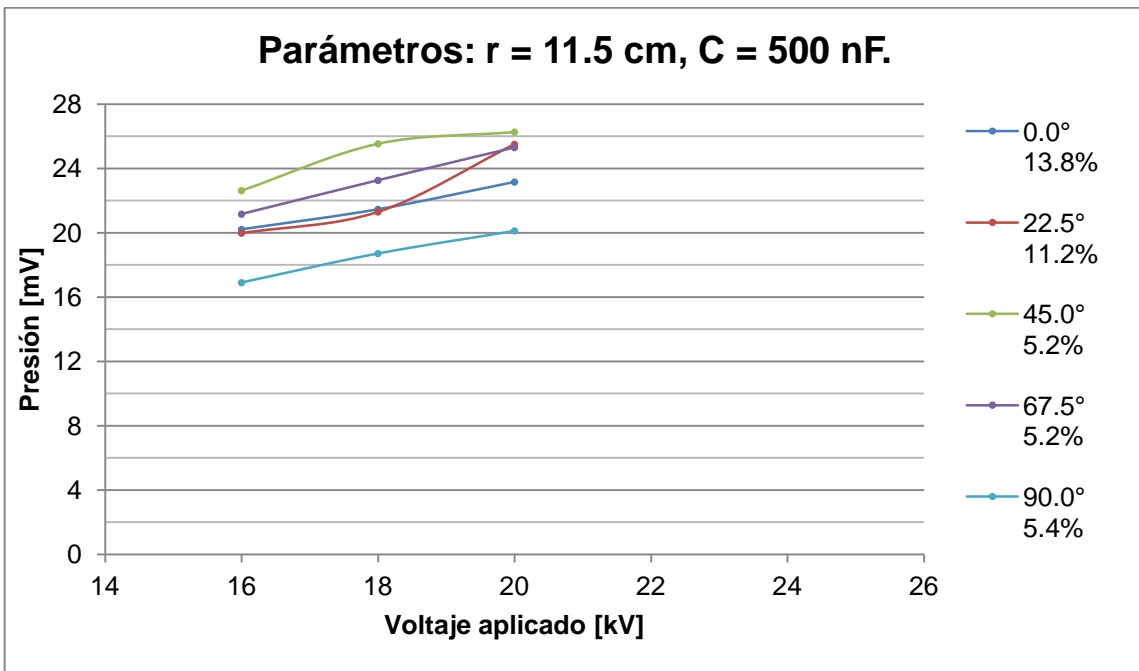
Gráfica 19



Gráfica 20



Gráfica 21



Gráfica 22

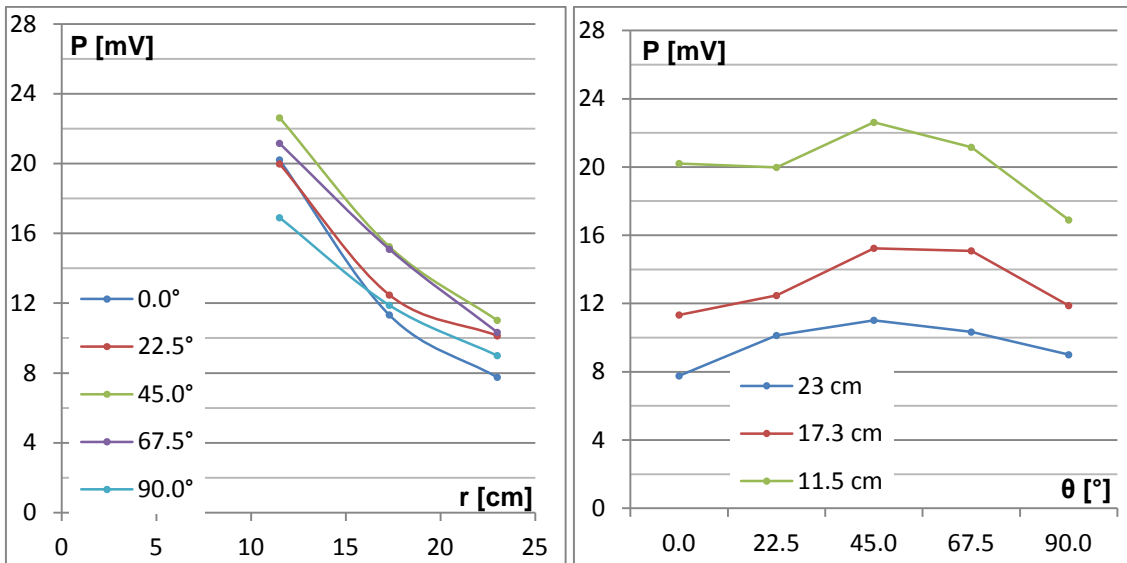
El grupo de datos mostrado previamente incluye los datos de presión obtenidos en frentes de choque generados a partir de 500 nF de capacidad. Se lograron obtener dichos datos hasta los 20 kV logrando alcanzar 100 Joules de energía liberada. A voltajes (energías) más elevados el equipo excedió sus capacidades mecánicas, ocasionando la ruptura de la bujía, hecho que se explica con mayor detalle en la siguiente sección.

Los datos se presentan de la misma manera que en las secciones previas. En analogía con estas, se observa que la presión aumenta con el crecimiento del voltaje, con la peculiaridad de que en el caso mostrado en este grupo de resultados, los cambios de presión son más tenues que en los casos previos, ya que para frentes de choque concentrados se sabe que la presión se satura al aumentar la energía almacenada. Este hecho es notorio en la gráfica 29, la cual corresponde la presión medida por un frente de choque concentrado, generado a partir de una descarga de energía almacenada en un banco de condensadores de 500 nF.

De igual manera es importante notar que la presión más alta de toda la sesión experimental se encuentra en este conjunto de datos y es de aproximadamente 26 mV. Esta se encuentra en la distancia más pequeña utilizada, con el voltaje más alto y, consecuentemente con los resultados discutidos hasta el momento, a 45.0°.

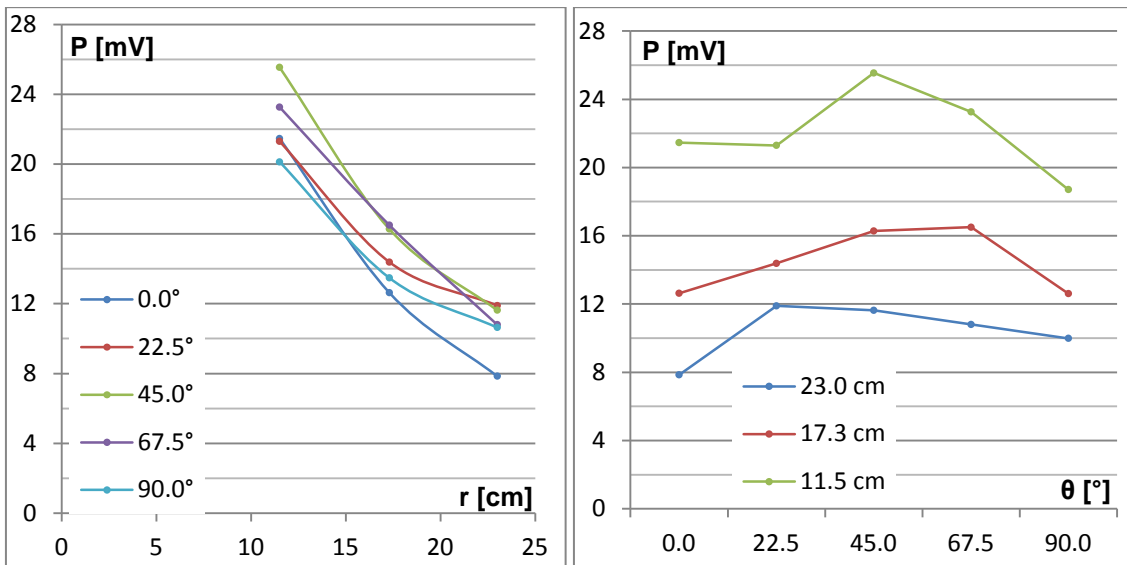
Con esto se comprueba que al almacenar y liberar abruptamente 100 Joules de energía se forma un frente de choque con el cual es posible alcanzar presiones de entre 250 y 300 mV al concentrar la onda en un punto específico y que a 11.5 cm de la fuente se logran presiones de 26 mV (entre 8.5 y 17% de la presión que logra un dispositivo electrohidráulico similar al usado en aplicaciones médicas).

**Características del frente para  $V = 16 \text{ kV}$ ,  $C = 500 \text{ nF}$ .**



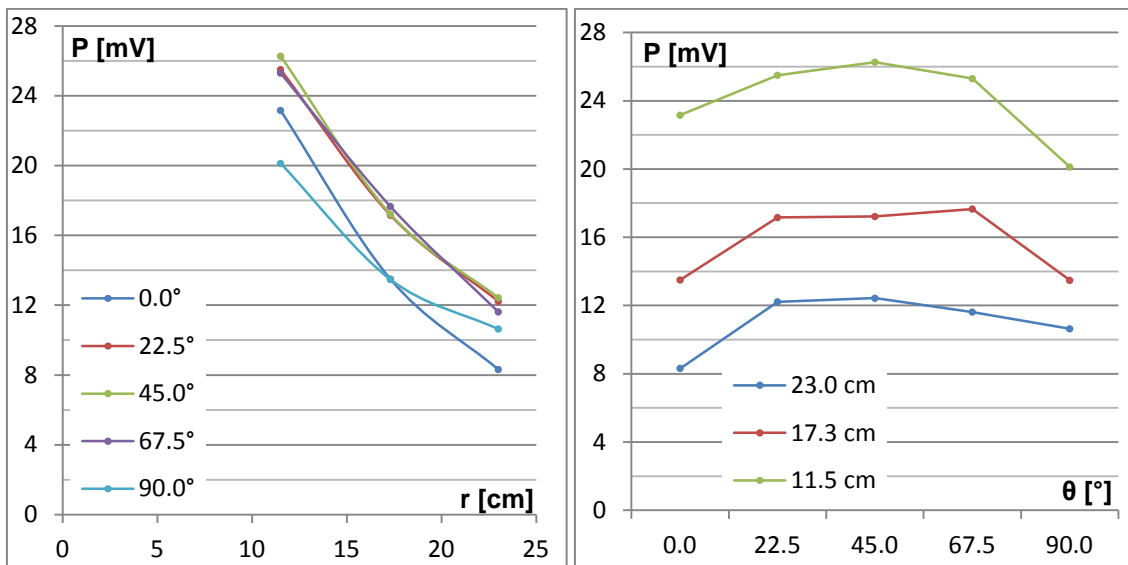
**Gráfica 23 a (izquierda); b (derecha).**

**Características del frente para  $V = 18 \text{ kV}$ ,  $C = 500 \text{ nF}$ .**



**Gráfica 24 a (izquierda); b (derecha).**

### Características del frente para $V = 20 \text{ kV}$ , $C = 500 \text{ nF}$ .



Gráfica 25 a (izquierda); b (derecha).

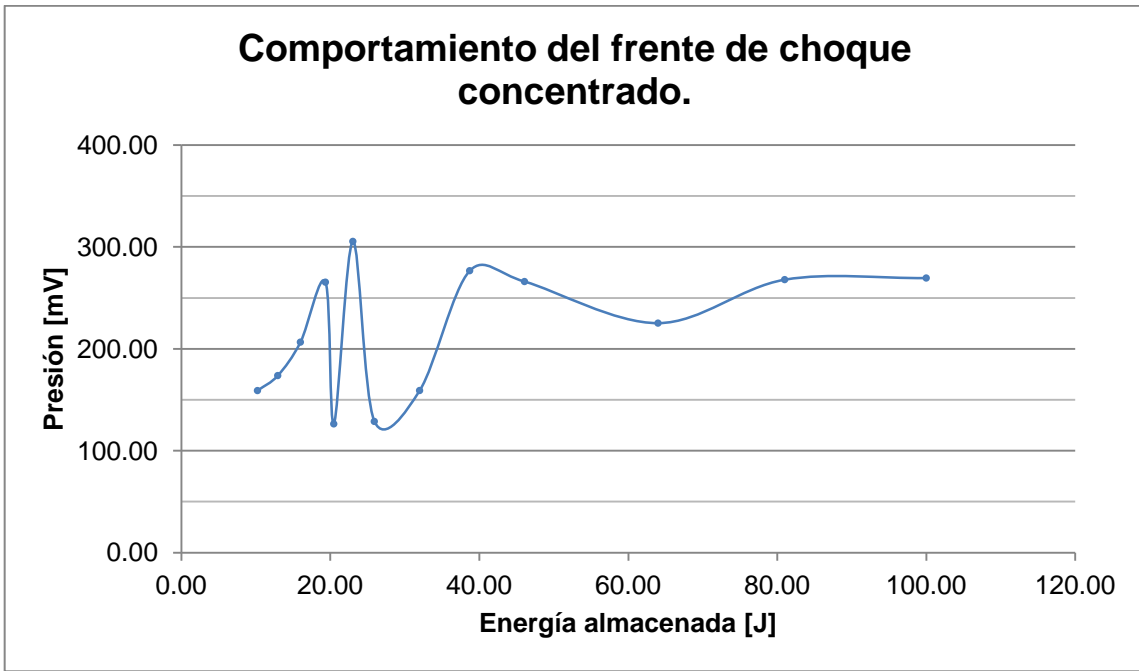
En este último conjunto de datos se verifican las observaciones hechas en las secciones previas, esto es, que las presiones más elevadas se concentran en las series de la parte media angular del área espacial estudiada con un dominio de la serie de  $45.0^\circ$ .

En la gráfica 22 se observa en conjunto más pendiente en el cambio de presión con respecto del voltaje que en los casos previos.

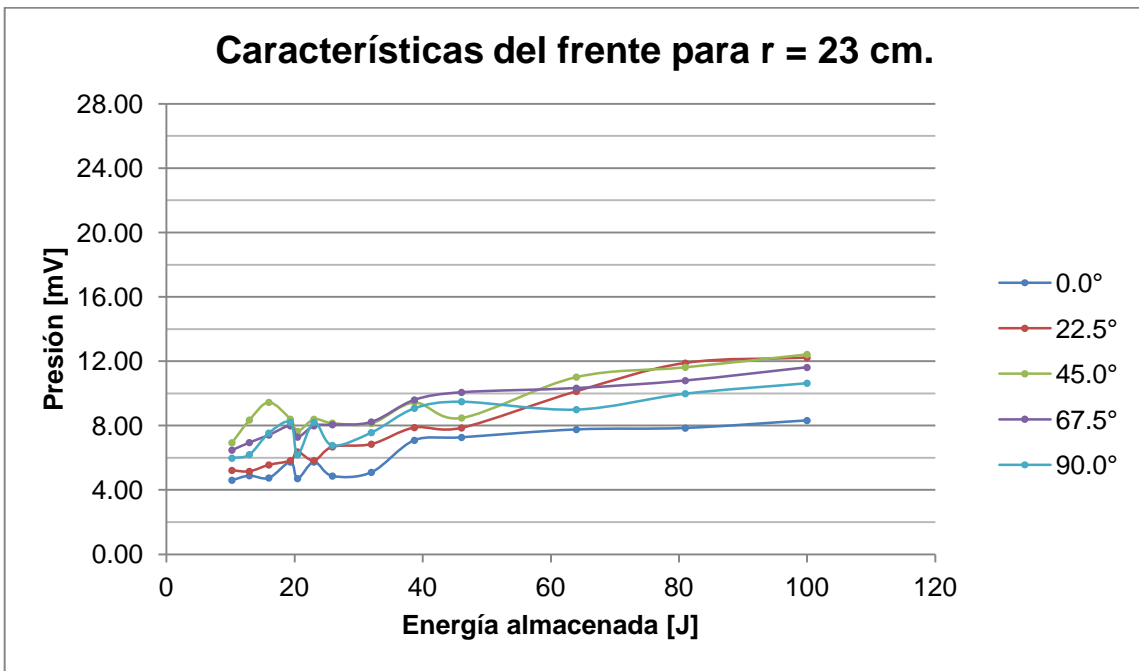
Las diferencias entre las series son menos notorias en comparación con aquellas de los datos de 80 y 160 nF (secciones 3.1 y 3,2).

Considerando entonces la exposición de los resultados es posible llegar a la conclusión de que los perfiles de presión presentan un máximo a una latitud de  $45.0^\circ$ ; además se verifica que la presión disminuye al aumentar la distancia y que existe una relación proporcional entre esta y el voltaje aplicado.

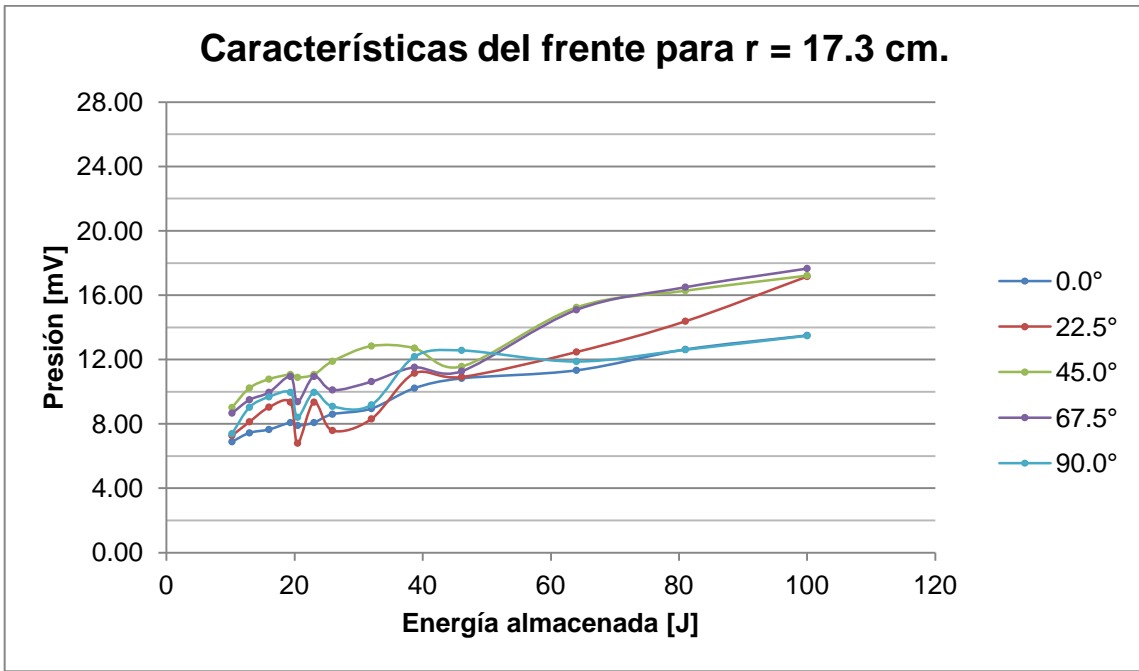




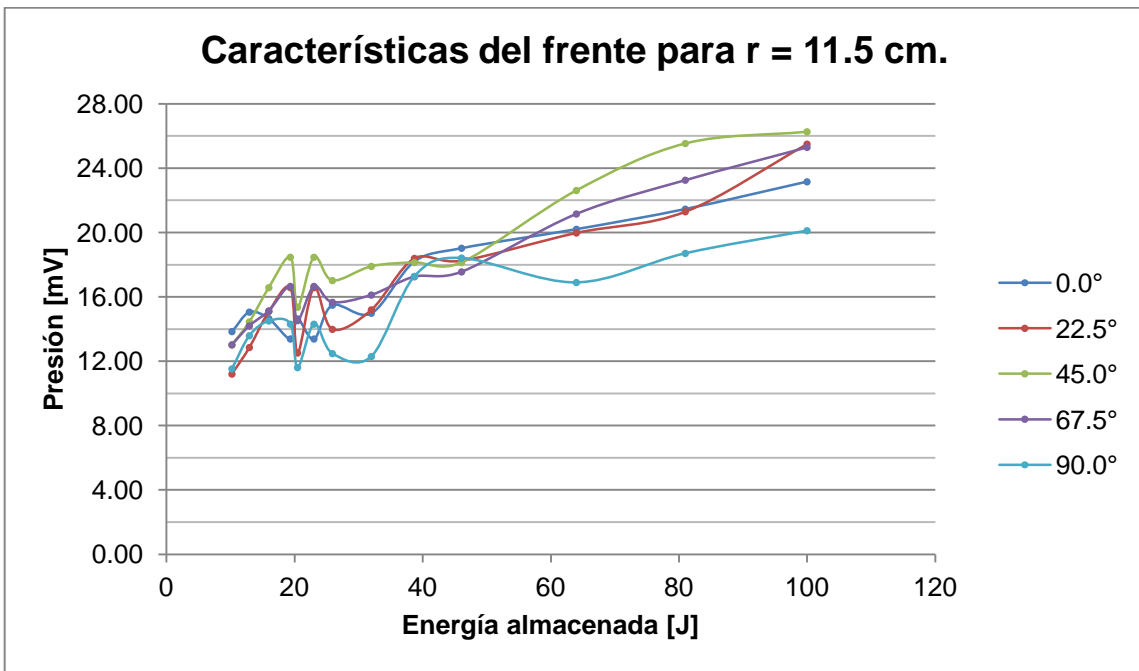
Gráfica 26



Gráfica 27



Gráfica 28



Gráfica 29

### *3.4 Límite de energía almacenada para el generador experimental Mexilit II.*

En las gráficas de la serie de 500nF (sección 3.3) se puede observar la falta de los datos correspondientes a los voltajes altos (específicamente de 22 y 24 kV), tanto para la medición de la presión en el punto focal usando el reflector, como en los datos que se usaron para determinar las características del campo de presión.

Dicha falta de datos fue ocasionada por la observación de la ruptura de la base plástica aislante (fabricada con nylamid) del electrodo inferior de la bujía, según se muestra en las figuras siguientes. Esta ruptura se presentó consistentemente en 3 bujías distintas, al aplicar 22kV a los 500nF de capacidad, los cuales representan 121 Joules de energía almacenada en los condensadores del generador. En los 3 casos, la vida útil de la bujía no superó los 100 disparos.



**Figura 3. 1 Fotografía de la ruptura de la base de la bujía, vista desde la parte superior de la misma.**



**Figura 3. 2 Fotografía de los fragmentos de la base de la bujía.**

## Capítulo 4

---

A continuación se mostrará un análisis más profundo de los resultados presentados en el capítulo previo. El objetivo particular de esto es la búsqueda de las relaciones entre los distintos parámetros aplicados en el experimento, en particular entre aquellos que influyen directamente en la intensidad del campo de presiones.

### *4.1 Geometría del campo de presiones.*

El primer resultado importante que se puede deducir después de analizar los resultados presentados es con referencia a la relación entre la presión y el ángulo polar (latitud).

En las gráficas expuestas (subíndice b)) se muestra de manera clara que las series correspondientes a los  $45.0^\circ$  se encuentran en todo momento, total o parcialmente por encima de los datos correspondientes a los demás ángulos evaluados, independientemente de la distancia desde el origen de la perturbación. En la mayoría de los casos es a  $45.0^\circ$ , con la distancia, voltaje y capacidad constantes, donde se alcanzan las presiones más elevadas, sin embargo para algunos conjuntos de parámetros se observan diferencias, con puntos de las series de  $22.5^\circ$  y  $67.5^\circ$  dominando el conjunto. Este comportamiento se puede atribuir a la incertidumbre y variabilidad de las mediciones realizadas.

Es importante mencionar que a  $0.0^\circ$  y  $90^\circ$ , esto es, en los límites angulares donde se realizó la medición, se encuentran los puntos de mínima presión. Esto es de esperarse si se considera que en el caso de  $0.0^\circ$  el camino acústico entre la fuente de la perturbación y el transductor de presión esta obstaculizado por la presencia del electrodo superior de la bujía, atenuando la el frente de choque en esa dirección. El caso correspondiente a las mediciones

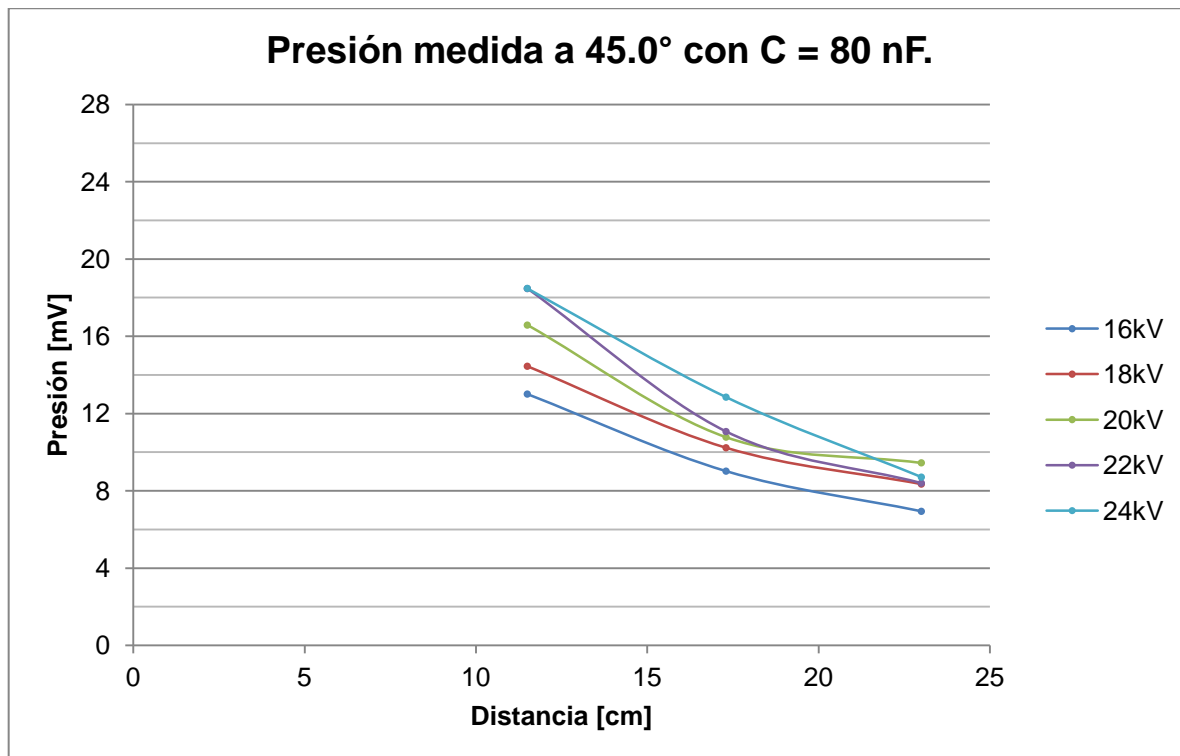
a  $90.0^\circ$  no es tan evidente. En principio, el camino acústico entre la fuente y el hidrófono está totalmente libre esto es, el camino entre la fuente y el punto de interés contiene solamente el medio de propagación. Entonces, la atenuación de la presión con respecto de los ángulos intermedios no puede explicarse por la presencia de interfases entre medios con diferentes densidades, no obstante, es importante mencionar que los puntos correspondientes a los  $90.0^\circ$  son los más cercanos al fondo de la tina del conjunto. El fondo resulta un material más denso que el agua con lo cual se forma una interfase que causa la reflexión de un frente de choque incidente. El frente reflejado interfiere con la onda directa originando un patrón de interferencia que, dependiendo del punto donde se haga la medición, puede modificar el valor de la presión de manera constructiva o destructiva. En el caso específico del experimento aquí expuesto, la interferencia destructiva podría explicar el descenso en la presión al acercarse al fondo de la tina del generador. Dicha hipótesis no puede ser evaluada con los datos obtenidos.

Apoyado en los resultados expuestos en el párrafo previo, se centrará la atención de la investigación a los datos de las series de  $45.0^\circ$ . El análisis que se expondrá puede ser extendido fácilmente a los puntos de los demás ángulos, sin embargo no se abordará en el presente.

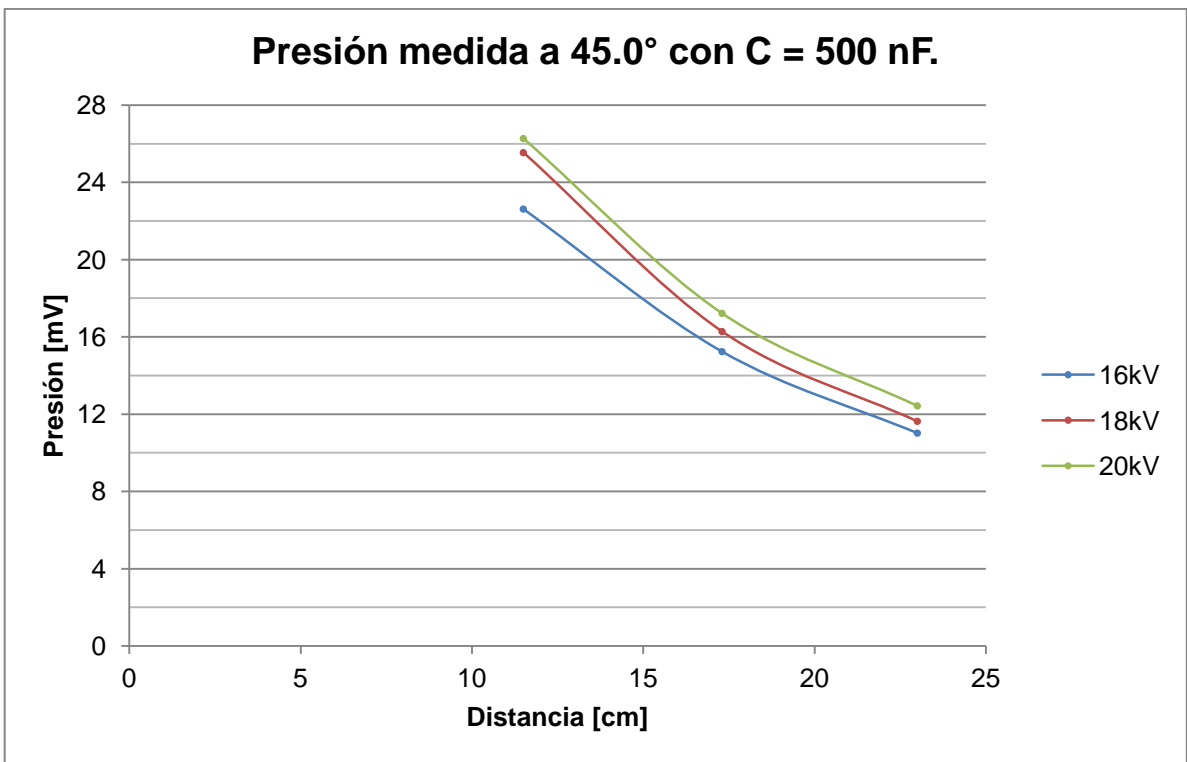
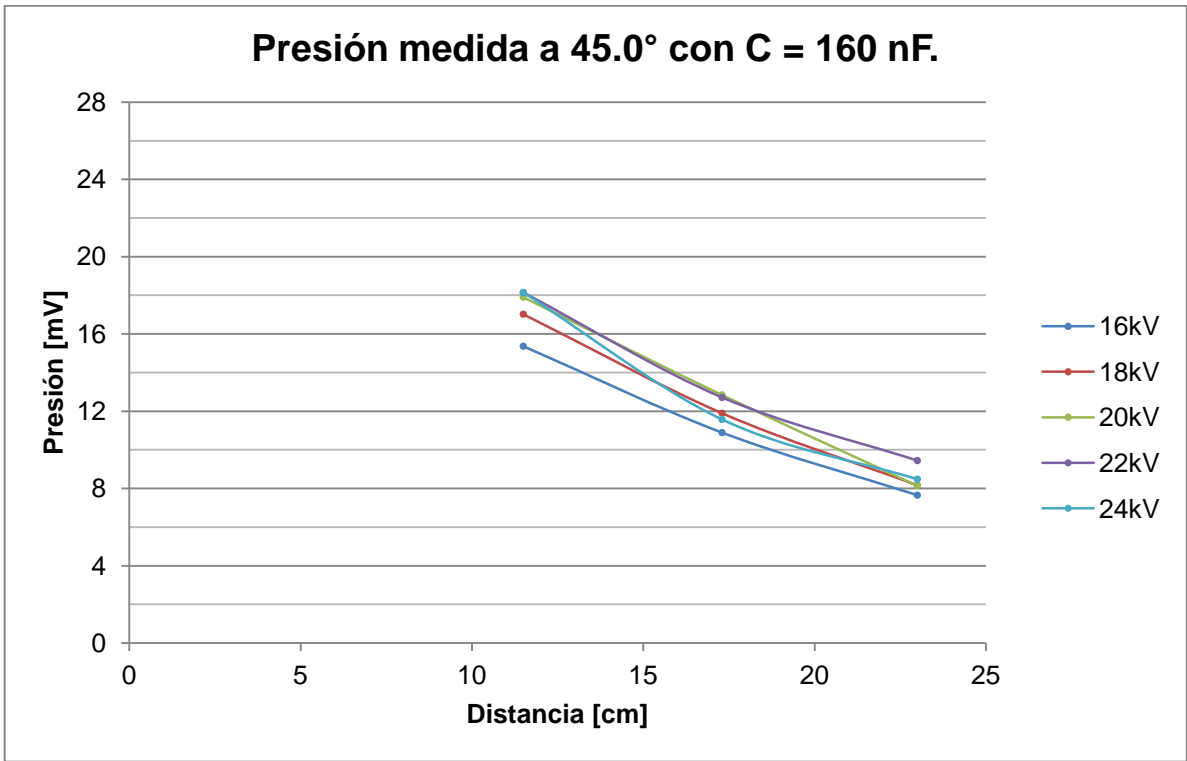
En analogía con otros fenómenos físicos que involucran campos de fuerza central (gravitación, campo eléctrico de una carga puntual) es de esperarse que la presión esté relacionada, de manera inversamente proporcional con una función de la distancia entre el punto en cuestión y el origen de la perturbación que genera el frente de choque.

La hipótesis planteada se verifica con los datos mostrados en las gráficas con subíndice a) de las secciones previas. En las cuales se observa que la presión disminuye al aumentar la distancia desde el origen. En la mayoría de los casos (indistintamente del ángulo) los datos muestran tendencias que

difieren del comportamiento lineal (acorde con la hipótesis), con un posible ajuste de orden superior como una mejor alternativa de modelado. No obstante en algunos casos, la línea recta representa un modelo adecuado de los datos encontrados (poner en qué casos).







Considerando en primer lugar a la línea recta como modelo del comportamiento de la presión contra la distancia se propuso la ecuación:

$$P = mr + b$$

Donde:

$r \equiv$  distancia a partir del origen de la perturbación

$P \equiv$  presión esperada a distancia  $r$

$m, b \equiv$  parámetros del modelo, independientes de  $r$  (a determinar)

Los parámetros  $m$  y  $b$  se determinaron mediante la aplicación de la regresión lineal usando el método de los mínimos cuadrados encontrando los valores que se muestran a continuación (véase Tabla 1). Se muestra también el coeficiente de correlación de Pearson al cuadrado ( $R^2$ ), el cuál fue considerado como una medida de la precisión del ajuste realizado, en el sentido del porcentaje de la varianza explicado por el modelo aplicado.

<b>Serie a 45.0°</b>	<b>m [mV/cm]</b>	<b>b [mV]</b>	<b><math>R^2</math></b>
<b>80nF@16kv</b>	-0.528	18.779	0.9698
<b>80nF@18kv</b>	-0.531	20.179	0.9553
<b>80nF@20kv</b>	-0.621	22.995	0.8874
<b>80nF@22kv</b>	-0.877	27.786	0.9340
<b>80nF@24kv</b>	-0.850	28.022	0.9932
<b>160nF@16kv</b>	-0.671	22.881	0.9925
<b>160nF@18kv</b>	-0.771	25.665	0.9926
<b>160nF@20kv</b>	-0.849	27.615	0.9997
<b>160nF@22kv</b>	-0.757	26.502	0.9813
<b>160nF@24kv</b>	-0.841	27.249	0.9605
<b>500nF@16kv</b>	-1.009	33.723	0.9774
<b>500nF@18kv</b>	-1.211	38.721	0.9665
<b>500nF@20kv</b>	-1.205	39.438	0.9711

Tabla 1 Parámetros para ajustes lineales sobre los datos correspondientes a las series de 45.0°. En la tabla se incluye el valor del coeficiente de correlación de Pearson al cuadrado ( $R^2$ ).

El modelo lineal constituye solamente una primera aproximación que arroja valores esperados conservadores (véase Tabla 2). Para un modelado más complejo que involucre una función que se ajuste de mejor manera a los datos experimentales y a la teoría de fondo (inversamente proporcional con una potencia de la distancia), los valores esperados a distancias cortas (~5cm) serán mayores que los que se obtienen mediante la extrapolación del modelo lineal. De manera que los resultados reportados deben entenderse como un límite inferior del valor de presión en esos puntos.

	<b>Distancia desde el origen de la perturbación [cm]</b>					
<b>Series a 45.0°</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>
<b>80nF@16kV</b>	16.14	15.61	15.08	14.55	14.02	13.50
<b>80nF@18kV</b>	17.52	16.99	16.46	15.93	15.40	14.87
<b>80nF@20kV</b>	19.89	19.27	18.65	18.03	17.40	16.78
<b>80nF@22kV</b>	23.40	22.53	21.65	20.77	19.90	19.02
<b>80nF@24kV</b>	23.77	22.92	22.07	21.22	20.37	19.52
<b>160nF@16kV</b>	19.53	18.86	18.19	17.52	16.84	16.17
<b>160nF@18kV</b>	21.81	21.04	20.27	19.50	18.73	17.96
<b>160nF@20kV</b>	23.37	22.52	21.67	20.83	19.98	19.13
<b>160nF@22kV</b>	22.72	21.96	21.20	20.45	19.69	18.93
<b>160nF@24kV</b>	23.04	22.20	21.36	20.52	19.68	18.84
<b>500nF@16kV</b>	28.68	27.67	26.66	25.65	24.64	23.63
<b>500nF@18kV</b>	32.67	31.46	30.25	29.04	27.83	26.61
<b>500nF@20kV</b>	33.42	32.21	31.01	29.80	28.60	27.39

**Tabla 2 Valores de presión [mV] obtenidos al aplicar los modelos lineales para distancias de entre 5 y 10 cm en pasos de 1 cm. A distancias pequeñas (5~) se pueden considerar como el límite inferior de la presión esperada o la presión que se obtiene al aplicar ajustar una relación inversamente proporcional a los datos medidos.**

Al comparar estas presiones con las que se obtienen con una onda de choque concentrada con parámetros de operación típicos (Gráfica x.x) de ESWL (litotricia extracorpórea mediante la aplicación de ondas de choque) se puede notar que éstos constituyen alrededor del 15% de la presión de un frente

de choque concentrado (16.18% al comparar 500nF@20kV contra 80nF@20kV concentrados).

La aplicación de un modelo con una relación inversamente proporcional entre la presión y la distancia es posible.

$$P = \frac{A}{r^2} + B$$

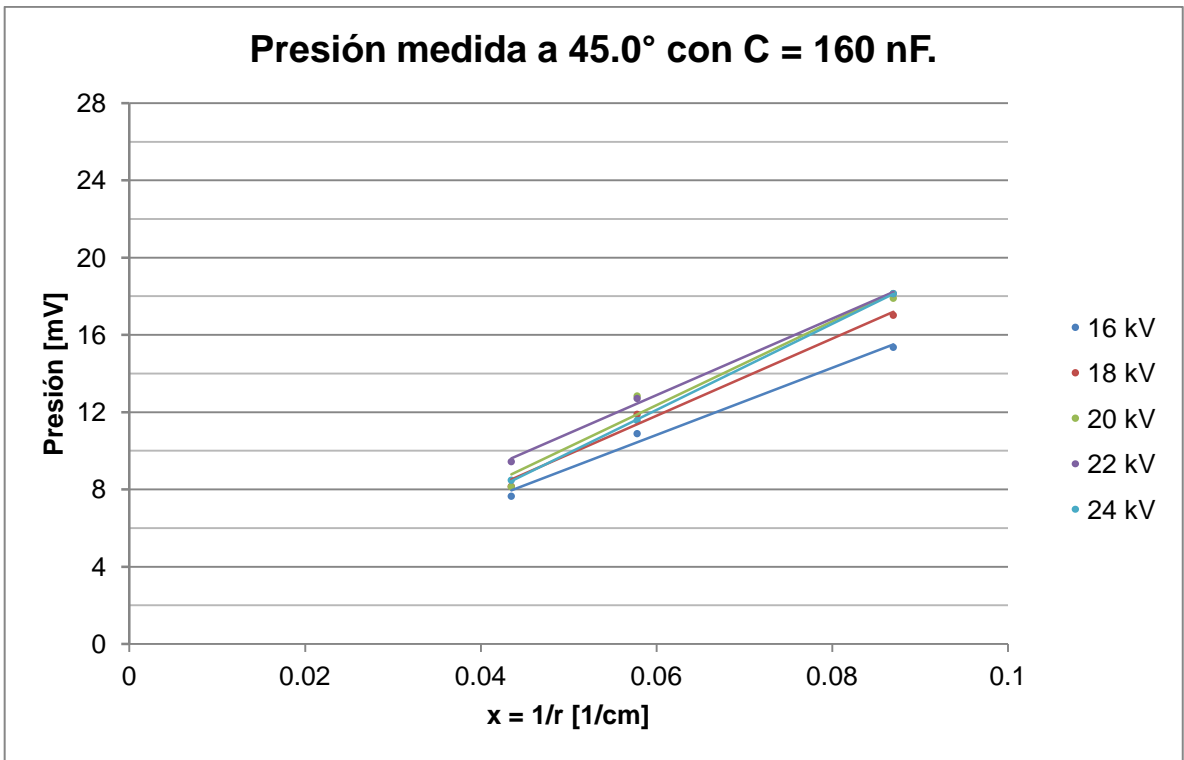
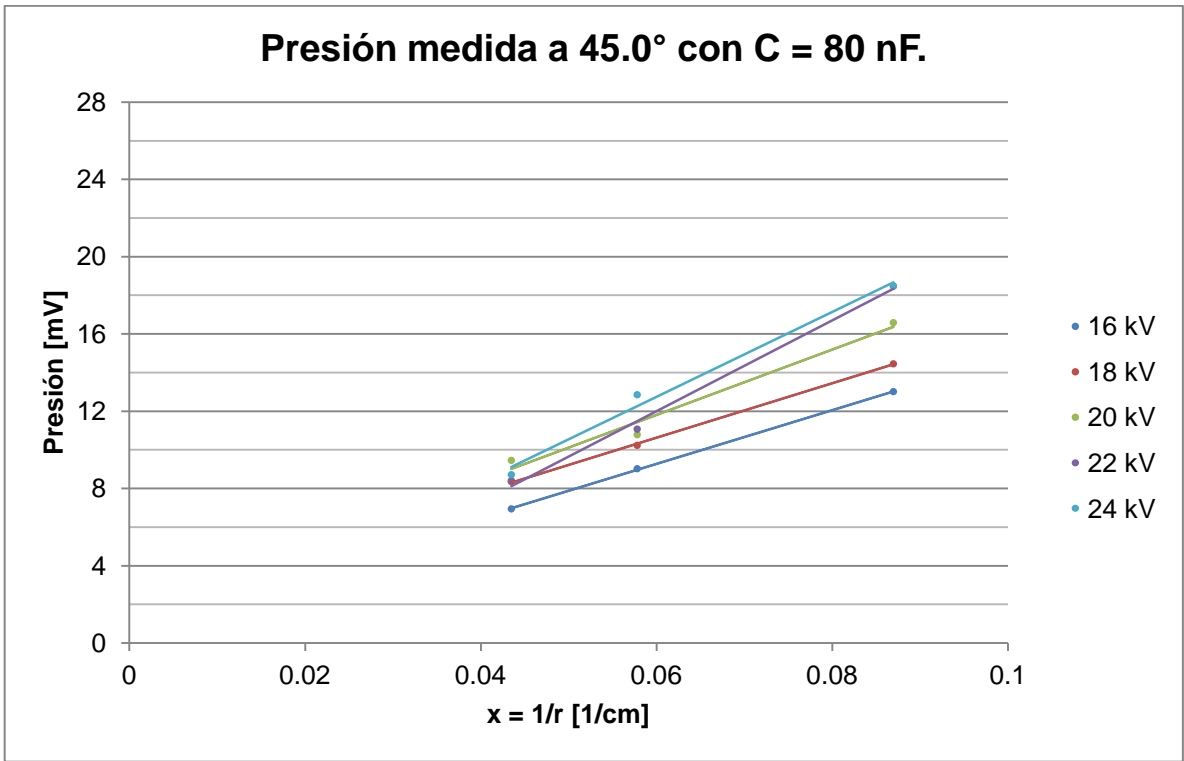
*Donde:*

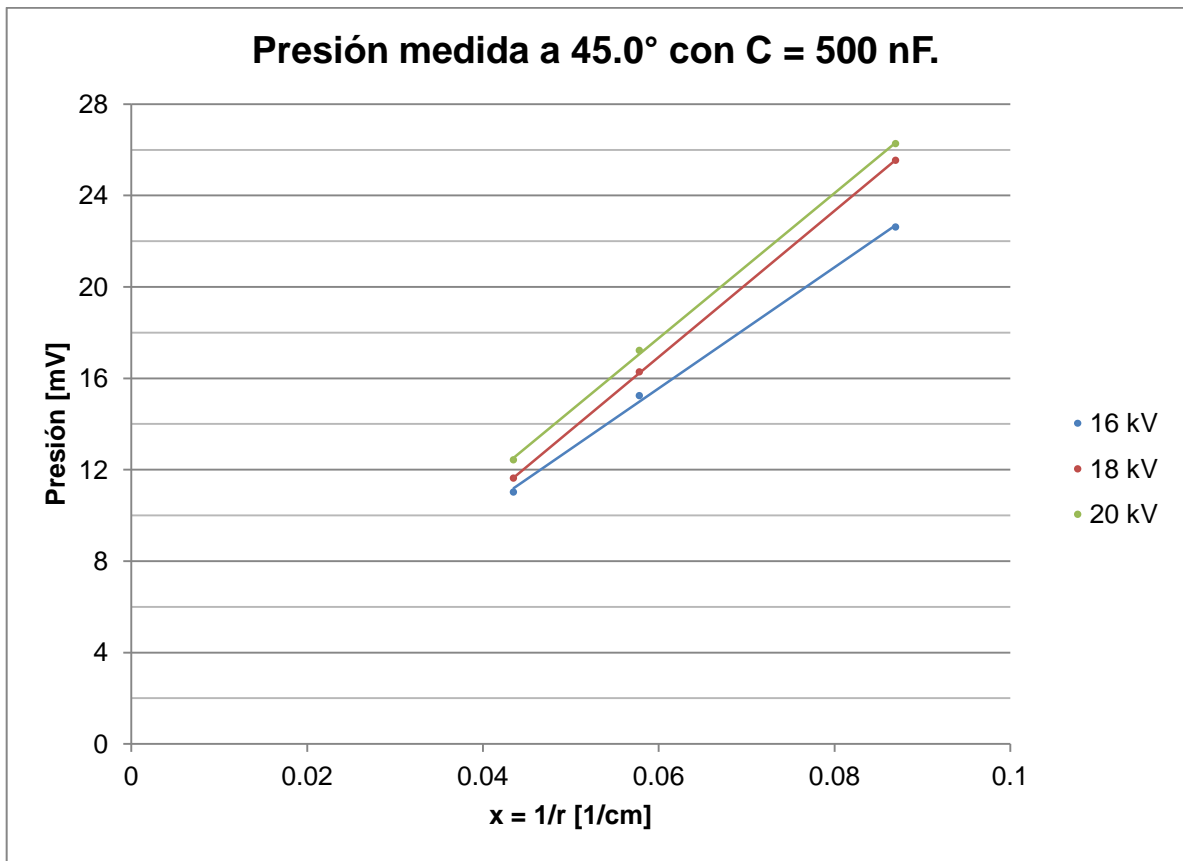
*A, B ≡ parámetros del modelo, independientes de r (a determinar)*

Realizando el cambio de variable  $1/r^2 \rightarrow x$  la ecuación previa se transforma en:

$$P = Ax + B$$

La cual es una ecuación lineal sobre x. Los parámetros A y B fueron determinados nuevamente mediante la aplicación de la regresión lineal usando el método de los mínimos cuadrados. Los resultados obtenidos se muestran a continuación.





Serie a 45.0°	A [ $\text{mV cm}^2$ ]	B [mV]	$R^2$
80nF@16kV	139.21	0.92	0.9998
80nF@18kV	140.95	2.17	0.9994
80nF@20kV	169.12	1.66	0.9768
80nF@22kV	234.87	-2.09	0.9951
80nF@24kV	220.07	-0.46	0.9887
160nF@16kV	173.81	0.39	0.9895
160nF@18kV	199.70	-0.17	0.9893
160nF@20kV	217.01	-0.66	0.9703
160nF@22kV	198.07	1.00	0.9973
160nF@24kV	222.65	-1.24	0.9999
500nF@16kV	264.80	-0.32	0.9985
500nF@18kV	319.59	-2.24	1.0000
500nF@20kV	317.16	-1.26	0.9997

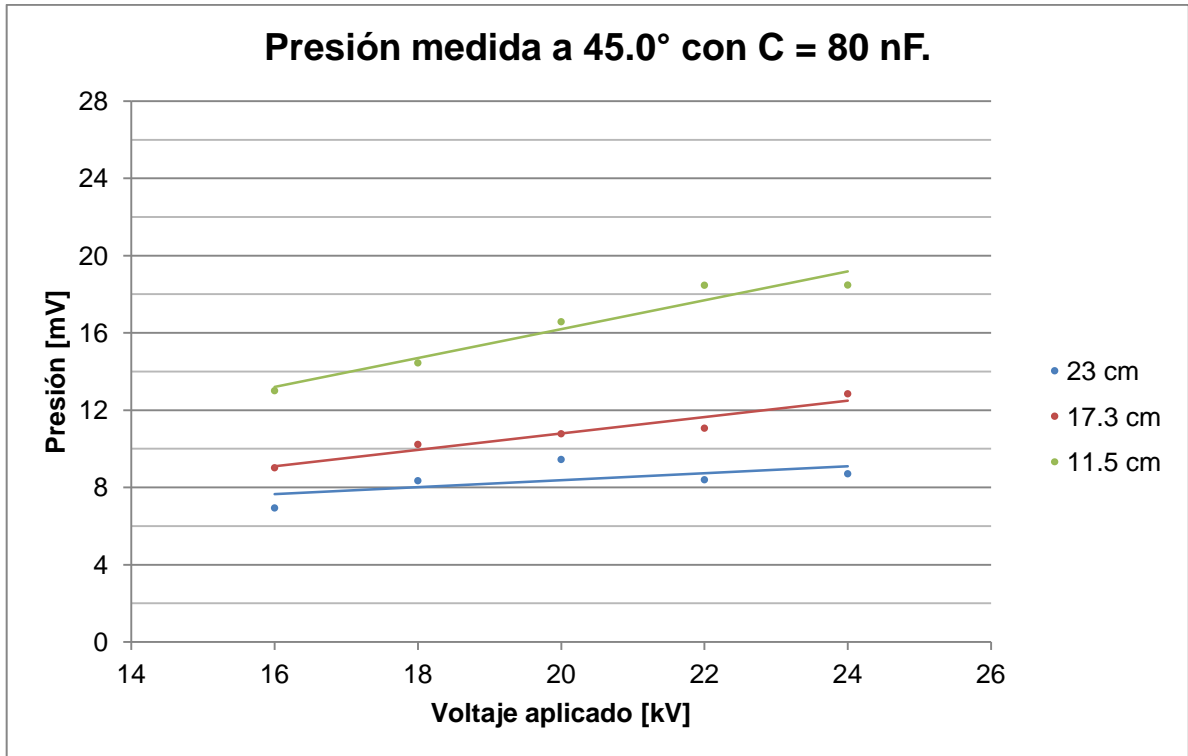
<b>Serie a 45.0°</b>	<b>Distancia [cm]</b>					
	5	6	7	8	9	10
<b>80nF@16kV</b>	28.76	24.12	20.81	18.32	16.39	14.84
<b>80nF@18kV</b>	30.36	25.66	22.30	19.78	17.83	16.26
<b>80nF@20kV</b>	35.48	29.85	25.82	22.80	20.45	18.57
<b>80nF@22kV</b>	44.88	37.05	31.46	27.27	24.01	21.40
<b>80nF@24kV</b>	43.55	36.22	30.98	27.05	23.99	21.55
<b>160nF@16kV</b>	35.16	29.36	25.22	22.12	19.71	17.78
<b>160nF@18kV</b>	39.77	33.11	28.35	24.79	22.02	19.80
<b>160nF@20kV</b>	42.75	35.51	30.34	26.47	23.46	21.04
<b>160nF@22kV</b>	40.62	34.01	29.30	25.76	23.01	20.81
<b>160nF@24kV</b>	43.29	35.87	30.57	26.59	23.50	21.02
<b>500nF@16kV</b>	52.64	43.81	37.51	32.78	29.10	26.16
<b>500nF@18kV</b>	61.68	51.03	43.42	37.71	33.27	29.72
<b>500nF@20kV</b>	62.17	51.60	44.05	38.38	33.98	30.46

Con los valores de los parámetros correspondientes se calcularon los valores esperados para distancias de entre 5 y 10 cm (Tabla x.x). Se observa que la máxima presión esperada se obtiene al aplicar un voltaje de 20 kV sobre 500 nF de capacidad. Dicha presión es de 62.17 mV y representa 30.10% de la presión que se obtiene con un frente concentrado generado a partir de 20 kV sobre 80 nF (parámetros nominales usados en ESWL).

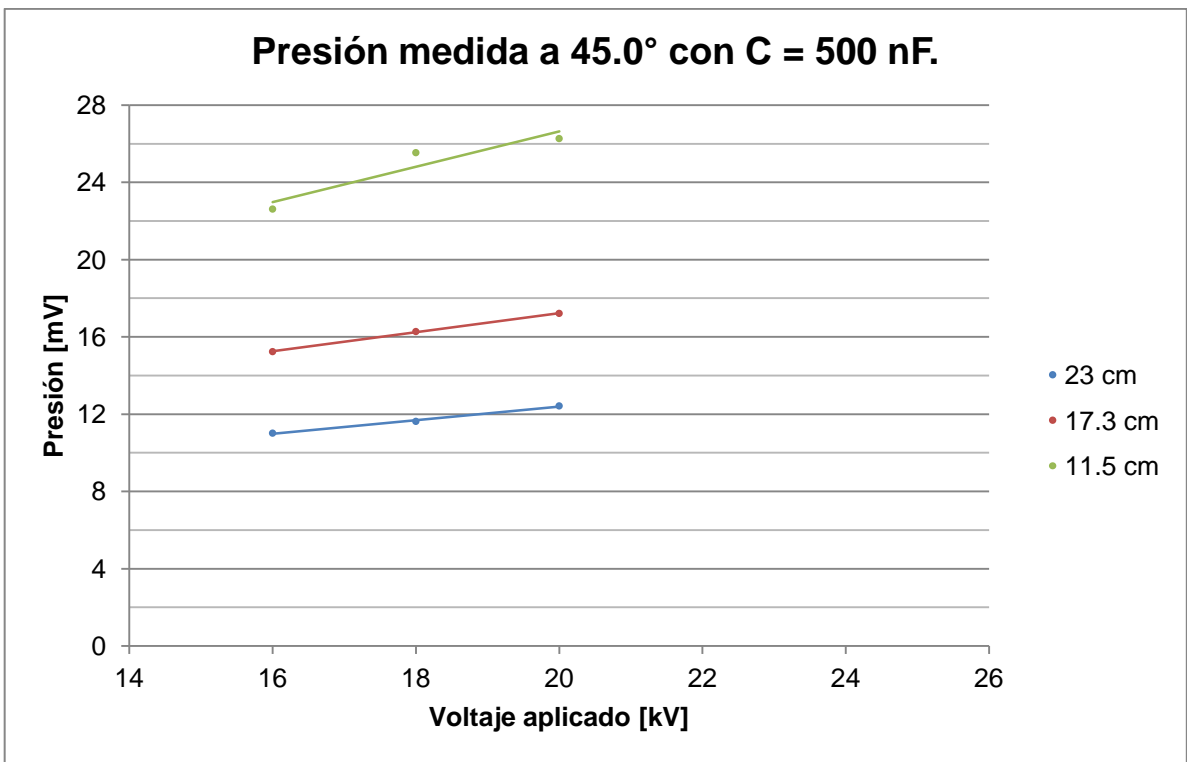
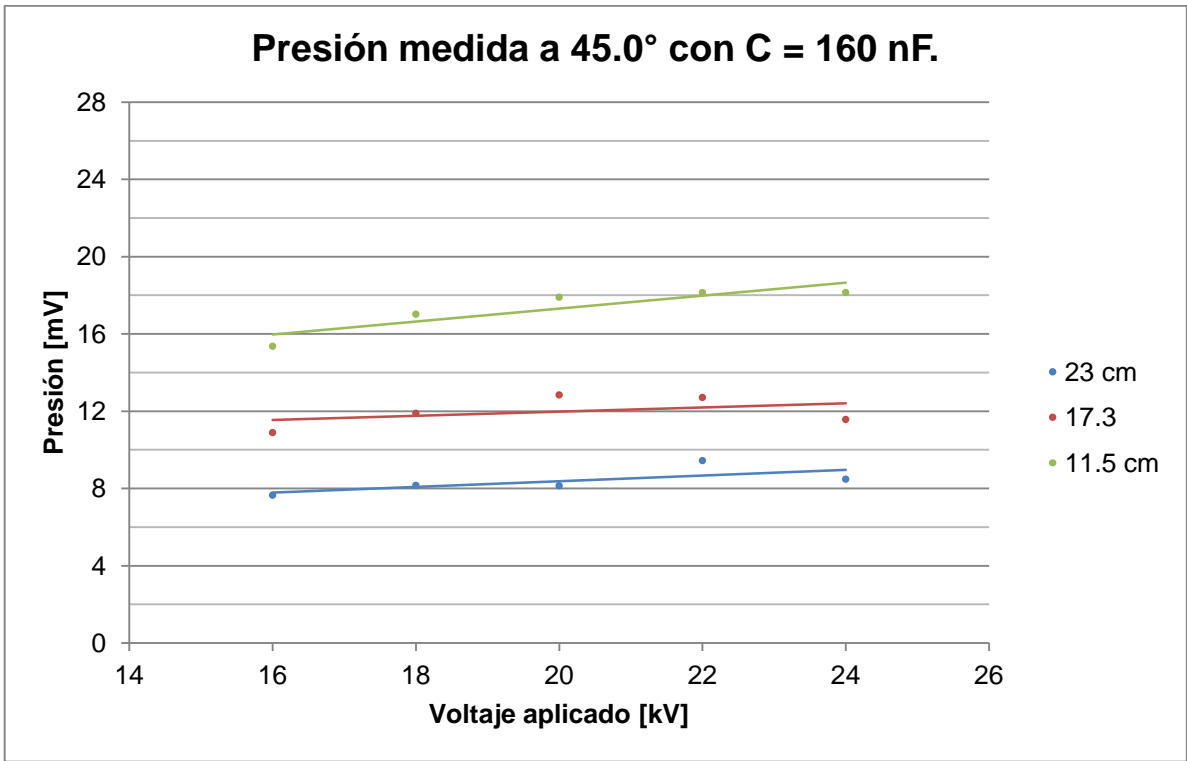
#### *4.2 Comportamiento de la presión medida a 45.0° ante cambios de voltaje.*

El cambio de voltaje también resulta ser un parámetro que deriva en cambios de presión. Esta aseveración se fundamenta en los resultados incluidos en el capítulo 3 del presente en donde se observa que para el frente de choque concentrado, la presión aumenta con el voltaje. La relación que

existe entre las dos variables mencionadas se espera lineal según lo comentado en el capítulo 1.







En las gráficas expuestas, se refuerza en primer lugar las hipótesis manejadas en la sección previa, la presión es mayor a distancias pequeñas (serie verde en las gráficas anteriores). En segundo lugar se observa que la presión tiende a aumentar a medida que el voltaje aplicado crece.

La hipótesis hecha sobre la relación entre el voltaje aplicado y la presión, sostiene que se debe cumplir una relación lineal entre dichos parámetros. Aplicando entonces una regresión lineal sobre los datos obtenidos se obtienen los siguientes resultados.

---

**80 nF**

<b>Distancia [cm]</b>	<b>Pendiente [mV/kV]</b>	<b>Ordenada origen [mV]</b>	<b>al</b>	<b><math>R^2</math></b>
<b>23.0</b>	0.180	4.780	0.3872	
<b>17.3</b>	0.425	2.290	0.9300	
<b>11.5</b>	0.748	1.238	0.9429	

---



---

**160 nF**

<b>Distancia [cm]</b>	<b>Pendiente [mV/kV]</b>	<b>Ordenada origen [mV]</b>	<b>al</b>	<b><math>R^2</math></b>
<b>23.0</b>	0.147	5.434	0.4877	
<b>17.3</b>	0.109	9.800	0.1802	
<b>11.5</b>	0.334	10.632	0.7951	

---



---

**500 nF**

<b>Distancia [cm]</b>	<b>Pendiente [mV/kV]</b>	<b>Ordenada origen [mV]</b>	<b>al</b>	<b><math>R^2</math></b>
<b>23.0</b>	0.353	5.348	0.9940	
<b>17.3</b>	0.495	7.337	0.9992	
<b>11.5</b>	0.913	8.385	0.8929	

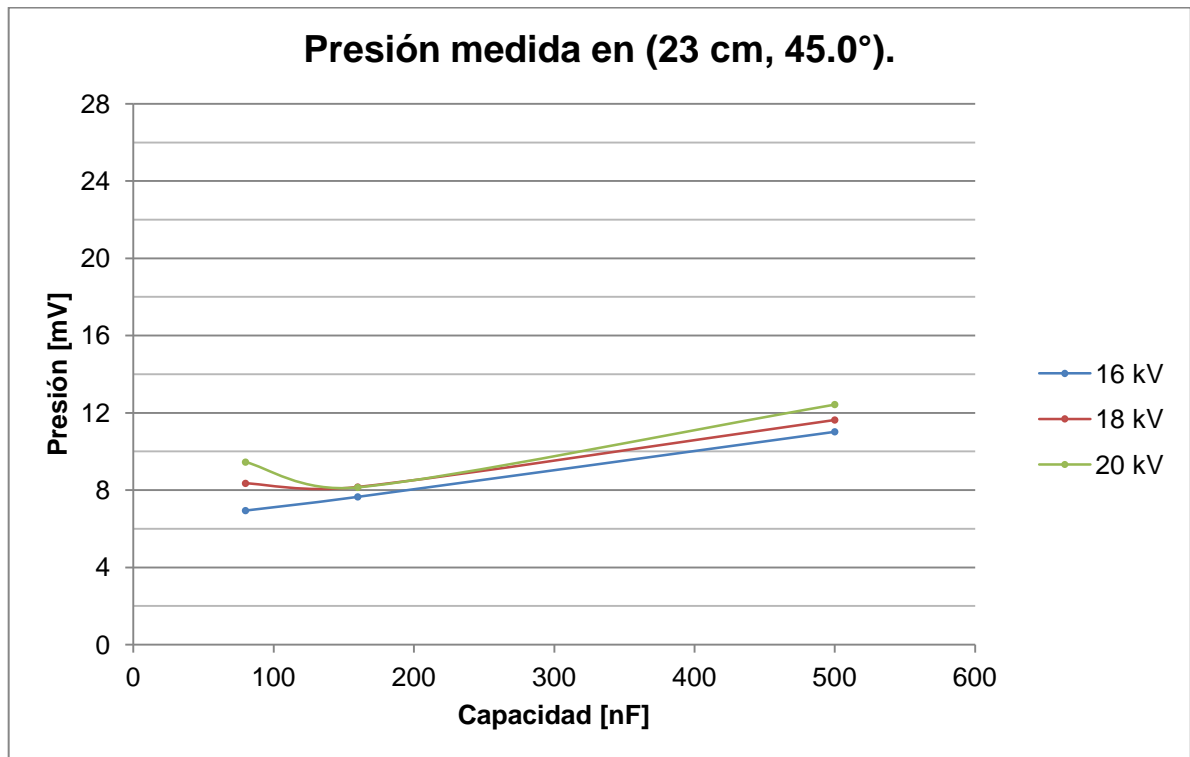
---

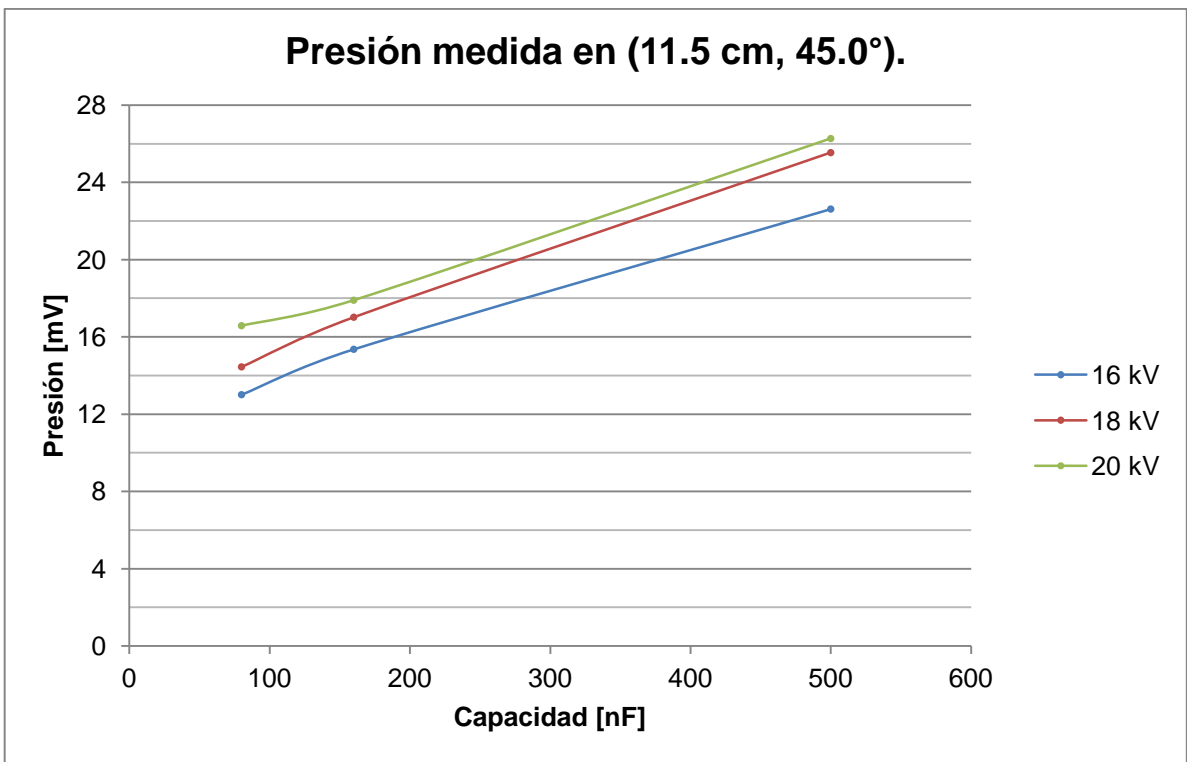
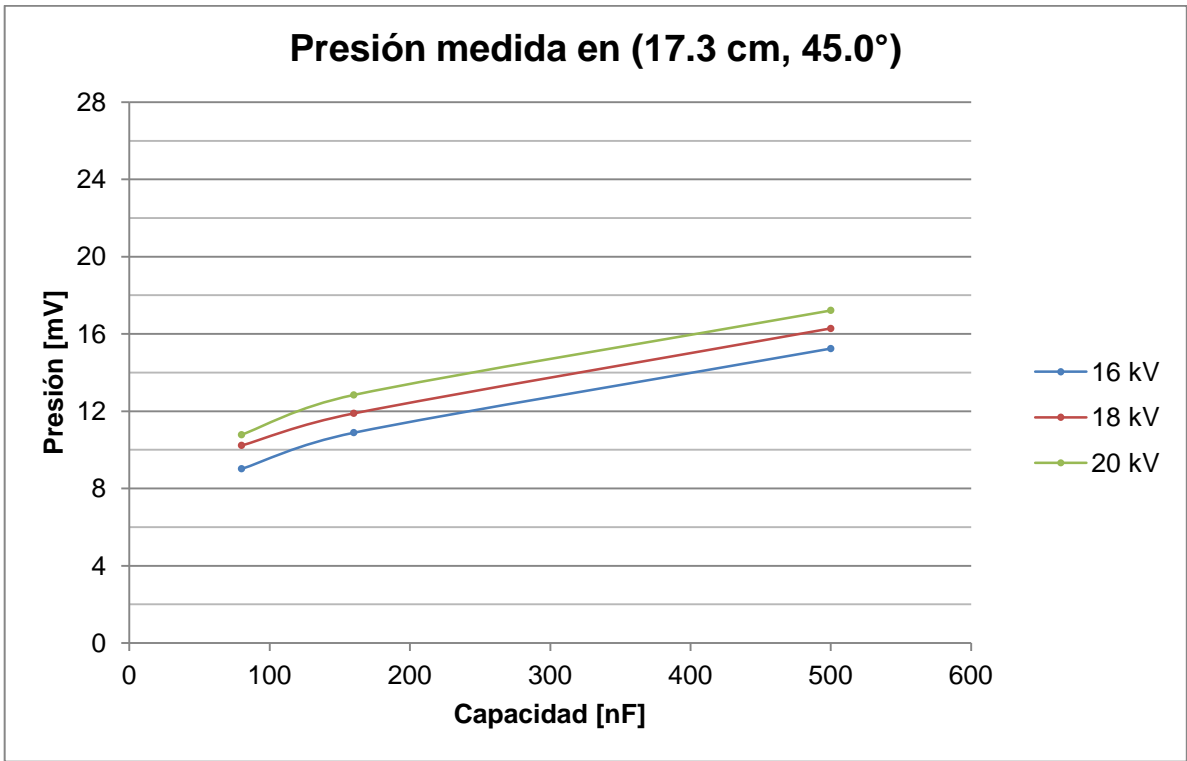
### 4.3 Comportamiento de la presión medida a 45.0° ante cambios de capacidad.

La capacidad del banco de condensadores utilizados para almacenar la energía del sistema se consideró como un parámetro determinante de la presión máxima que se alcanza en un determinado punto del espacio por el cual atraviesa un frente de choque.

De manera análoga con lo presentado hasta el momento, se consideraron solamente los datos de las mediciones realizadas a 45.0° para elaborar un análisis un poco más profundo de la presión con respecto de la capacidad.

Las siguientes gráficas muestran los resultados de tales series de datos para distintas distancias.



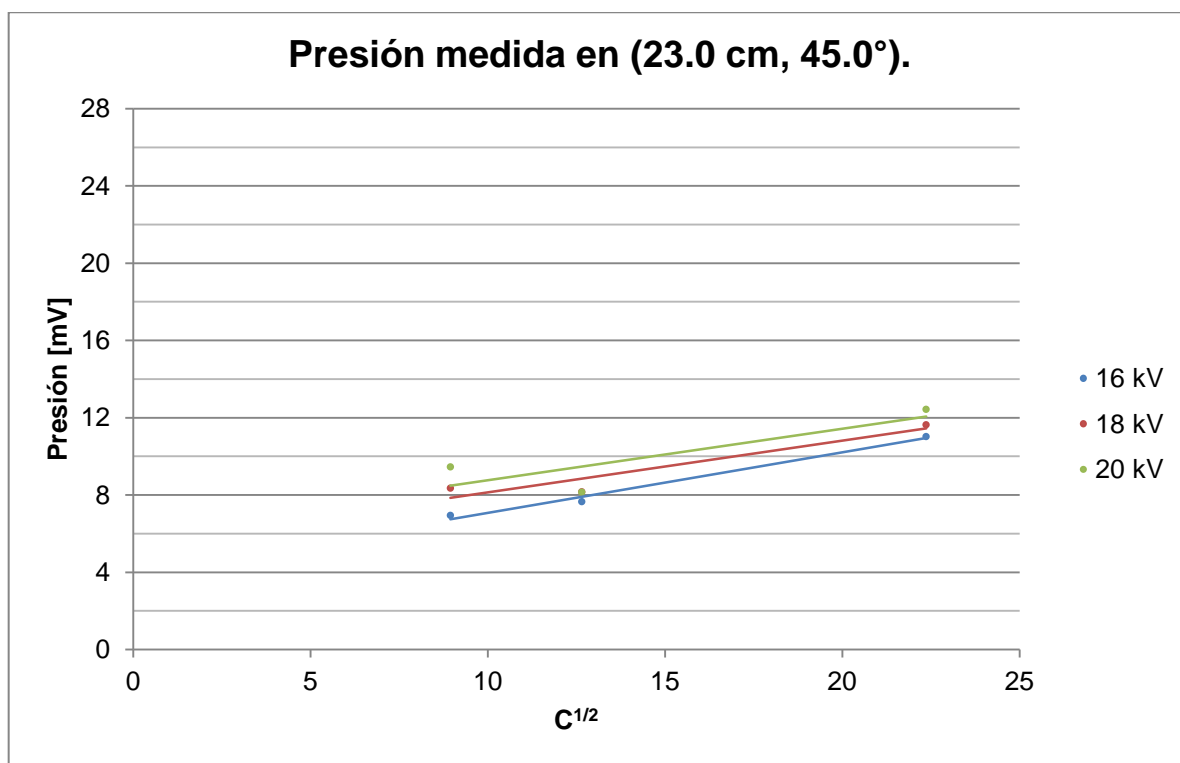


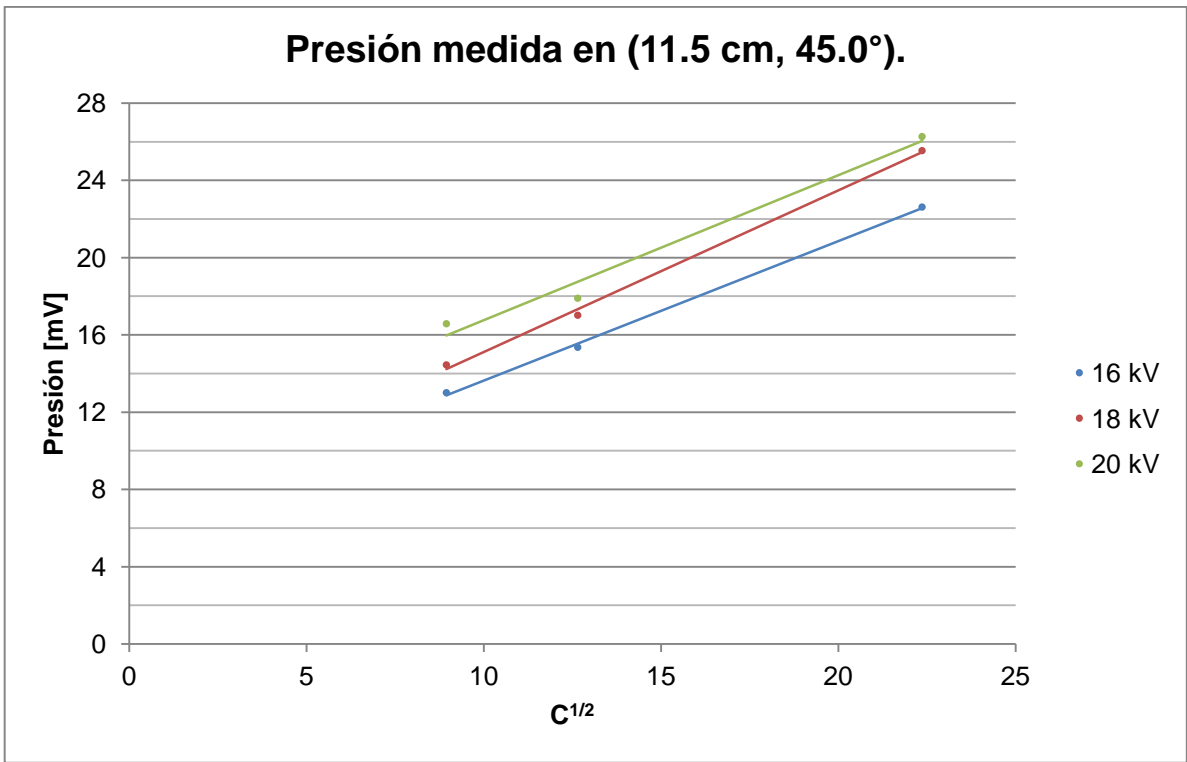
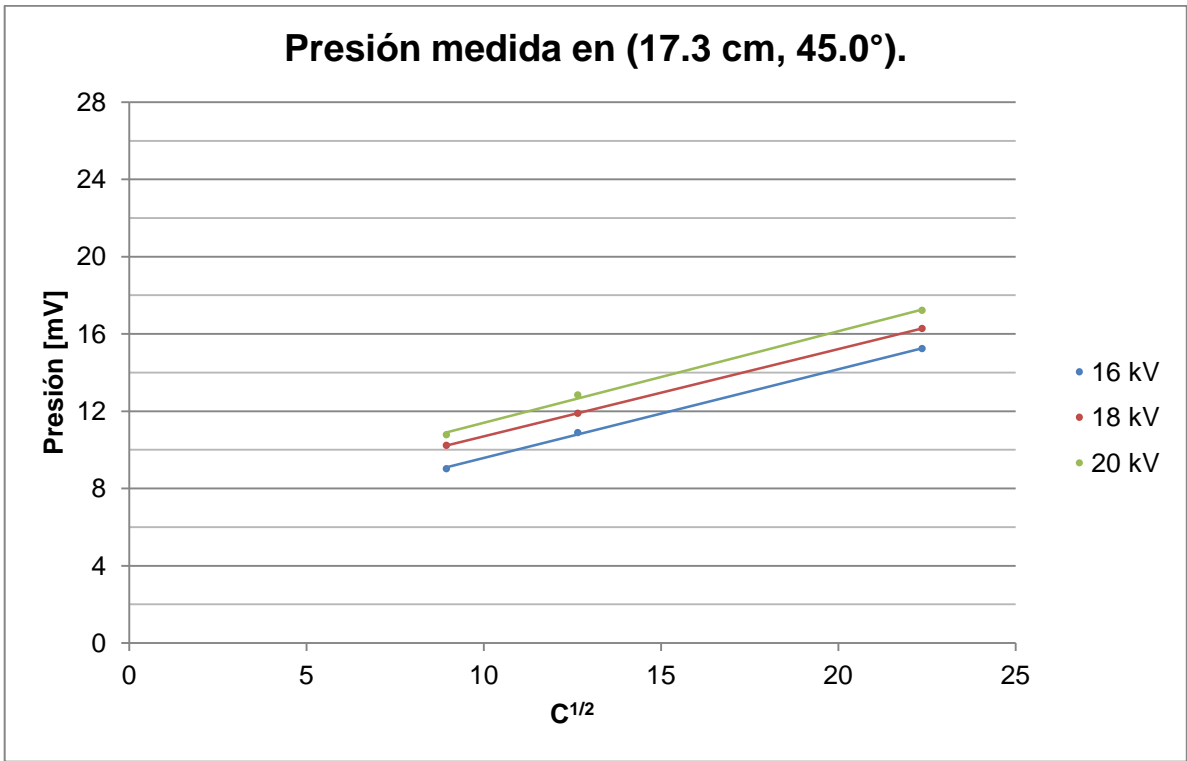
A partir de los datos mostrados en las gráficas previas fue posible realizar un análisis similar al expuesto en las secciones previas es decir, se partió de la hipótesis presentada en el capítulo introductorio y se aplicó el modelo matemático correspondiente para encontrar la relación entre la presión y la capacidad.

La hipótesis es que la presión es proporcional al cuadrado de la energía; a su vez la energía es directamente proporcional a la capacidad y al cuadrado del voltaje aplicado, entonces la presión es directamente proporcional con la raíz cuadrada de la capacidad. Con esto se justifica la aplicación del siguiente modelo:

$$P = A'\sqrt{C} + B'$$

Para visualizar de mejor manera los datos se gráficaron los mismos con respecto a  $\sqrt{C}$ , posteriormente se aplicó el método de regresión lineal a cada conjunto.





Voltaje [kV]	A'	B'	R <sup>2</sup>
16	0.3128	3.9538	0.9886
18	0.2673	5.4633	0.9014
20	0.2666	6.1007	0.7059

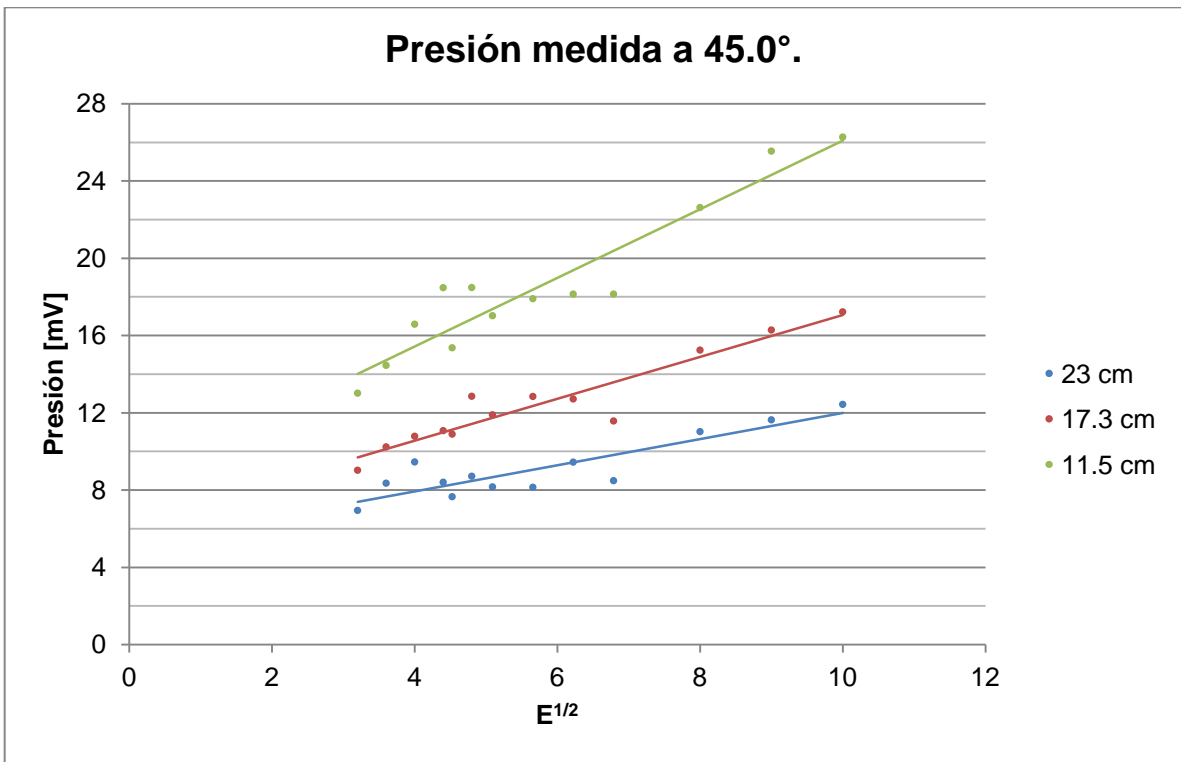
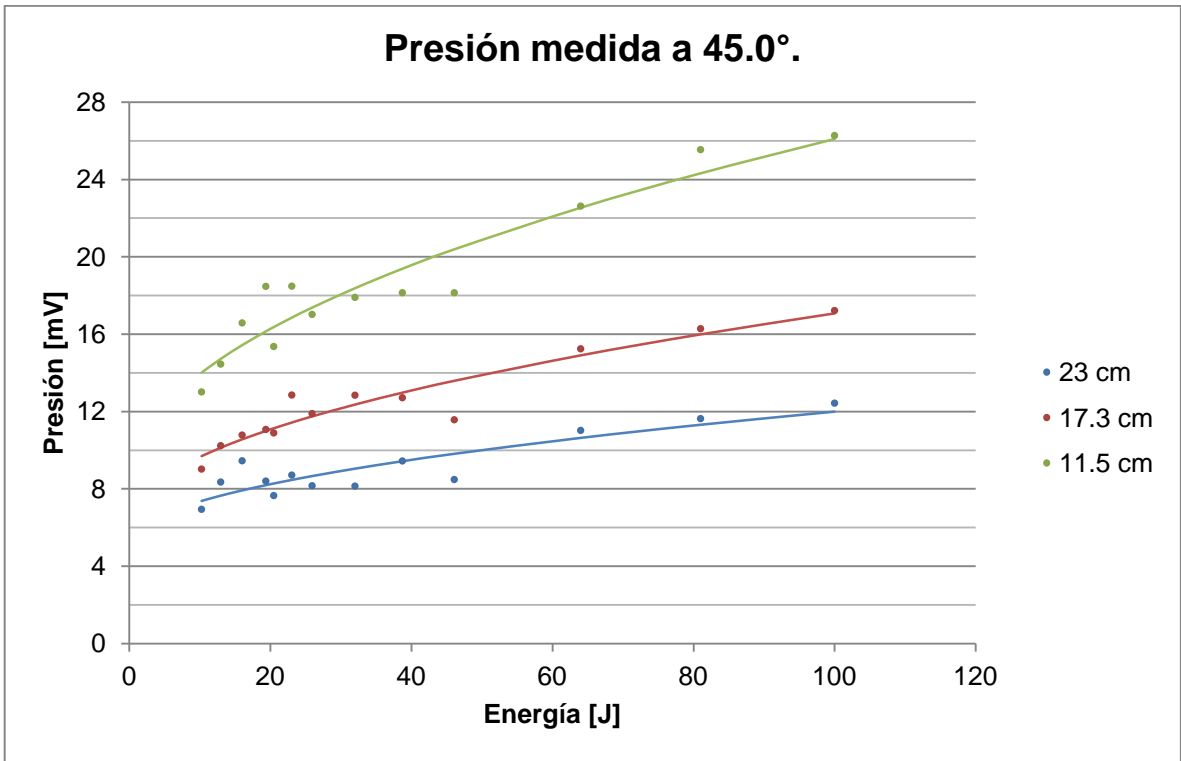
Voltaje [kV]	A'	B'	R <sup>2</sup>
16	0.4604	4.9707	0.9993
18	0.4512	6.1899	1.0000
20	0.4741	6.6666	0.9977

Voltaje [kV]	A'	B'	R <sup>2</sup>
16	0.7226	6.4093	0.9989
18	0.8369	6.7421	0.9978
20	0.7505	9.2538	0.9792

Es importante mencionar que las series de 22 y 24 kV fueron descartadas ya que no fue posible abarcar en la totalidad un espectro de capacidades suficiente para observar y evaluar el comportamiento de la presión. Es decir, para 22 y 24 kV se cuenta con tan solo un par de puntos, los cuales aportan muy poca información al estudio realizado.

#### *4.5 Comportamiento con de la presión con respecto del aumento de energía.*

Los datos mostrados en las secciones previas se condensan al observar el comportamiento de la presión con respecto de la energía liberada. A continuación se exponen las gráficas de los datos con la curva de ajuste correspondiente al modelo propuesto. Seguidas coeficientes involucrados en la aplicación del método de de regresión utilizado.





<b>Distancia [cm]</b>	<b>A''</b>	<b>B''</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
<b>23.0</b>	0.6782	5.2112	0.7844
<b>17.3</b>	1.0840	6.2292	0.8977
<b>11.5</b>	1.7757	8.3306	0.8949

Usando la información obtenida se puede estimar la energía liberada necesaria para obtener presiones del orden de magnitud de aquellas que se obtienen con la ayuda de un método de concentración. Tomando como referencia el valor de presión medido al concentrar un frente de choque generado a partir de 20kV sobre 80 nF (32 Joules) el cual fue de 206.59 mV se tiene.

<b>Distancia [cm]</b>	<b>Energía almacenada esperada [J]</b>
<b>23.0</b>	88118
<b>17.3</b>	34162
<b>11.5</b>	12465

#### *4.6 Conclusiones.*

El trabajo aquí expuesto abordó el objetivo de la medición del campo de presiones ocasionado por un frente de choque generado y propagado en agua. Para cumplir con dicho objetivo fue necesario el diseño e implementación de un sistema de adquisición y almacenamiento suficientemente robusto y confiable.

El sistema desarrollado cumplió con los requisitos mínimos que permitieron la obtención de los datos contemplados en el experimento realizado, esto es: fue posible manejar el disparo a distancia, además se implementó el control sobre la frecuencia de disparo y el control sobre el número de frentes de choque a disparar (con frecuencia preestablecida); también se logró el almacenamiento de los datos de manera adecuada, a pesar de la necesidad de manipulación posterior para extraer los datos relevantes.

Por su parte, el método de análisis de datos descrito complementó al sistema de adquisición de datos, al establecer homogeneidad a las series analizadas.

Con los datos obtenidos se reafirmó la hipótesis de que el cuadrado de la presión es proporcional a la energía liberada en un frente de choque no concentrado. Se determinó que entre latitudes de  $22.5^\circ$  y  $67.5^\circ$  se encuentra la zona con la presión más elevada. La presión es más baja a  $0.0^\circ$  y  $90.0^\circ$  teniendo como posible causa a la interferencia y a un camino acústico obstaculizado por los electrodos de la bujía -por confirmar-.

Las relaciones entre la presión y la distancia y la presión y la capacidad se ajustan al los modelos propuestos de manera adecuada con coeficientes de correlación de Pearson elevados, no así para la relación entre la presión y el voltaje. A pesar de ello consideró que el trabajo realizado fue una primera aproximación, es decir que aún hay mejoras que deben realizarse.

En primer lugar es imprescindible el rediseño del generador de ondas de choque en distintas partes comenzando por las bujías, las cuales requieren ser más robustas para resistir el “recule” ocasionado por frentes de choque con energía liberada mayor a 100 Joules. En el rediseño se puede eliminar el efecto de interferencia del fondo de la tina con un reajuste de la orientación de los electrodos (horizontal en lugar de vertical).

Para la medición de la presión se recomienda mejorar el blindaje electromagnético sobre el transductor y el osciloscopio principalmente. También es deseable la elaboración de un sistema robótico de precisión que permita controlar remotamente la ubicación del transductor (o muestra) dentro del tanque de pruebas, dicha implementación puede disminuir considerablemente la incertidumbre en la posición además de abrir la posibilidad de sesiones más extensivas (en donde se puede medir en más puntos).

Es deseable también la repetición del experimento mostrado ya que, como se ha comentado el trabajo expuesto constituyó un primer acercamiento al problema planteado. En experimentos posteriores se puede abarcar un espectro más amplio tanto para voltajes, como para capacidades de manera que se pueda añadir significancia a los datos y modelos propuestos.

Como se observó con los datos obtenidos, se espera que la presión a distancias menores a 11.5cm y con capacidades mayores a 500 nF alcance los órdenes de magnitud de la presión de los frentes de choque concentrados usados en ESWL, permitiendo zonas amplias con presiones elevadas que pueden ser usadas en las aplicaciones mencionadas.

## Bibliografía

---

1] A. M. Loske, Generación de ondas de choque débiles en agua por rompimiento eléctrico. Tesis de Maestría, F. E. Prieto, Ed., Facultad de Ciencias, UNAM, 1990.

2] C. Chaussy, W. Brendel y E. Schmiedt, «Extracorporeally induced destruction of kidney stones by shock waves,» *Lancet*, nº 2, pp. 1265-1268, 1980.

3] A. M. Loske y F. E. Prieto, Fundamentos Técnicos de Litotripsia Extracorporal, México: JGH Editores, 1999.

4] A. M. Loske, Shock Wave Physics for Urologist, México: Universidad Nacional Autónoma de México, 2007.

5] P. Lorrain y D. Corson, Electromagnetism: principles and applications, New York USA: W. H. Freeman, 1990.

6] J. J. Brophy, Basic electronics for scientist, USA: McGraw-Hill, 1966.

7] F. Fernández, A. M. Loske, H. Zendejas, E. Castaño y M. I. Paredes, «Desarrollo de un litotriptor extracorporal más eficiente,» *Revista Mexicana de Ingeniería Biomédica*, nº 21, pp. 7-15, 2005.

8] F. Fernández, G. Fernández y A. M. Loske, «Treatment time reduction using tandem shock waves for lithotripsy: an in vivo study,» *J Endourol*, nº 23, pp. 1247-1253, 2009.

A. M. Loske, F. E. Prieto, M. L. Zavala, A. D. Santana y E. Armenta,  
9] «Repeated application of shock waves as a possible method for food  
preservation,» *Shock Waves*, nº 9, pp. 49-55, 1999.

A. M. Loske, J. Campos Guillen, F. Fernández y E. Castaño Tostado,  
10] «Enhanced shock wave-assisted transformation of *Escherichia coli*,»  
*Ultrasound Med Biol*, nº 37, pp. 502-510, 2011.