



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
CUAUTITLÁN**

**OPERACIÓN Y CONTROL AUTOMATIZADOS  
DE UN GENERADOR DE ONDAS DE CHOQUE**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:**

**INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA**

**PRESENTA:**

**ARTURO MÉNDEZ RUBIO**

**ASESOR: FIS. FRANCISCO FERNÁNDEZ ESCOBAR**

**CUAUTITLÁN IZCALLI, EDO. DE MÉXICO**

**2005**

m. 344818



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.



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AVENIDA 11  
MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN  
UNIDAD DE LA ADMINISTRACIÓN ESCOLAR  
DEPARTAMENTO DE EXÁMENES PROFESIONALES

U. N. A. M.  
FACULTAD DE ESTUDIOS  
SUPERIORES-CUAUTITLÁN  
ASUNTO: VOTOS APROBATORIOS



DR. JUAN ANTONIO MONTARAZ CRESPO  
DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLÁN  
P R E S E N T E

ATN: Q. Ma. del Carmen García Mijares  
Jefe del Departamento de Exámenes  
Profesionales de la FES Cuautitlán

Con base en el art. 28 del Reglamento General de Exámenes, nos permitimos comunicar a usted que revisamos la TESIS:

"Operación y control automatizados de un generador de ondas de choque".

que presenta el pasante: Arturo Méndez Rubio  
con número de cuenta: 8840597-9 para obtener el título de :  
Ingeniero Mecánico Electricista

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO.

A T E N T A M E N T E  
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"

Cuautitlán Izcalli, Méx. a 11 de enero de 2005

PRESIDENTE Fis. Francisco Fernández Escobar

VOCAL Ing. Juan González Vega

SECRETARIO Ing. Diana Fabiola Arce Zaragoza

PRIMER SUPLENTE Ing. Petra Medel Ortega

SEGUNDO SUPLENTE Ing. Anatolio Mendoza González

## AGRADECIMIENTOS

Tengo mucho que agradecer y a mucha gente, pero principalmente quiero hacerlo a las dos personas más importantes para mí, mis papás, Edgar Méndez y Ana Martha Rubio, por su cariño, comprensión y sacrificio para que yo consiguiera terminar esta etapa de mi vida, a mi hermana Analy, simplemente por ser ella y por estar siempre ahí. A toda mi familia.

Al Dr. Victor M. Cástano, Director del Centro de Física Aplicada y Tecnología Avanzada (CFATA) de la UNAM y al Dr. Fernando E. Prieto (q.e.p.d.), fundador del ahora Laboratorio de Ondas de Choque, al Dr. José Luis Aragón, jefe del Departamento de Nanotecnología del CFATA, por todo su apoyo y la oportunidad que me brindaron de participar en su grupo de trabajo.

Al Dr. Achim M. Loske, jefe del Laboratorio de Ondas de Choque y al Fis. Franciso Fernández por la paciencia que han tenido conmigo, por todo lo que he aprendido trabajando con ellos y principalmente por su amistad.

Al Ing. Juan González, Ing. Diana F. Arce, Ing. Petra Medel y al Ing. Anatolio Mendoza, profesores de la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán y que formaron parte del jurado, por tomarse la molestia de leer este trabajo y por sus comentarios que fueron de gran ayuda para su terminación; al M.en C. Ulises Mora, quien me aclaró las dudas en la parte referente a la conservación de alimentos; al Sr. Rene Preza, jefe del taller mecánico del CFATA por su apoyo en el uso de maquinaria, herramienta y material; al M. en I. Domingo Rangel, encargado del Laboratorio de

Instrumentación y Desarrollo, por las facilidades prestadas para la elaboración de los circuitos impresos.

A todos mis amigos, los incondicionales de siempre (ellos saben a quienes me refiero) que han estado conmigo en todo momento y también a los nuevos, que espero lo sean para siempre.

A mis compañeros, con quienes compartí momentos muy padres; a todos mis profesores.

A la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán y a la Universidad Nacional Autónoma de México.

## ÍNDICE GENERAL

<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
 <b>CAPÍTULO 1</b>	
CONCEPTOS GENRALES DE LAS ONDAS DE CHOQUE.....	3
1.1 Generación y concentración de la onda de choque.....	7
1.2 Aplicaciones de las ondas de choque.....	14
1.3 Interacción de las ondas de choque con la materia.....	20
1.4 Presentación del trabajo. Antecedentes, justificación y objetivos.....	23
 <b>CAPÍTULO 2</b>	
EL GENERADOR DE ONDAS DE CHOQUE EXPERIMENTAL MEXILIT II <sup>+</sup> .....	26
2.1 El MEXILIT II <sup>+</sup> .....	27
2.2 Funcionamiento del circuito eléctrico.....	30
2.3 Modo de operación manual.....	33
2.3.1 Preliminares de operación.....	33
2.3.2 Operación manual del equipo.....	34
2.4 Delimitación de las señales de interés.....	39
 <b>CAPÍTULO 3</b>	
EL EQUIPO DE CÓMPUTO.....	42
3.1 La tarjeta de adquisición de datos.....	42

3.2 Operación de la tarjeta $\mu$ CDAS-16G.....	46
3.3 La conversión digital-analógica (D/A).....	50
3.4 Programa de operación de la fuente de alto voltaje.....	52

## **CAPÍTULO 4**

### **DESARROLLO DE LA INSTRUMENTACIÓN Y**

PROGRAMACIÓN.....	54
4.1 Criterios de diseño de la instrumentación.....	54
4.2 Instrumentación de arranque.....	60
4.3 Instrumentación de operación.....	63
4.4 Desarrollo de la programación.....	67

## **CAPÍTULO 5**

EVALUACION Y RESULTADOS.....	68
5.1 Evaluación del equipo.....	68
5.2 Evaluación de la eficiencia de fragmentación.....	70
5.3 Perspectivas de desarrollo.....	72

## **CAPÍTULO 6**

CONCLUSIONES.....	75
-------------------	----

APÉNDICE A.....	77
-----------------	----

APÉNDICE B.....	79
-----------------	----

BIBLIOGRAFÍA.....	81
-------------------	----

## ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS

### CAPÍTULO 1

Figura 1.1 Esquema de frentes de onda y dirección de propagación.....	4
1.2 Explosión atómica que produce un frente de onda.....	6
1.3 Concentración de una onda de choque utilizando un reflector elipsoidal.....	8
1.4 Generación y concentración de una onda de choque por el método electrohidráulico.....	9
1.5 Diagrama de bloques de un generador de ondas de choque electrohidráulico.....	11
1.6 Generador de ondas de choque piezoeléctrico.....	13
1.7 Diagrama de un generador de ondas de choque piezoeléctrico...	14
1.8 Variación de presión causada por una onda de choque.....	21
1.9 Dibujo esquemático de la fragmentación de un cálculo por efecto Hopkinson.....	22
1.10 Cavitación generada por una onda de choque.....	23

### CAPÍTULO 2

Figura 2.1 Generador de ondas de choque experimental MEXILIT II <sup>+</sup> .....	27
2.2 Tina de pruebas y reflectores del MEXILIT II <sup>+</sup> .....	28
2.3 Circuito eléctrico de descarga del MEXILIT II <sup>+</sup> .....	29
2.4 Diagrama a bloques del circuito eléctrico del MEXILIT II <sup>+</sup> .....	30
2.5 Localización de F <sub>2</sub> en el reflector E4.....	34
2.6 Módulo de controles del MEXILIT II <sup>+</sup> .....	35
2.7 Activación del relevador de alto voltaje.....	36



2.8 Secuencia de la fragmentación de un modelo artificial de cálculo renal expuesto a las ondas de choque.....	38
---	----

### **CAPÍTULO 3**

Figura 3.1 Fuente de voltaje de precisión de 5Vcd.....	44
3.2 Tarjeta de expansión del puerto de salida.....	45
3.3 Diagrama de bloques de la tarjeta $\mu$ CDAS-16G.....	47
3.4 Configuración y conexiones de los convertidores D/A.....	50
3.5 Entradas y salidas del conector DB-37 y señales de conexión....	53
Tabla 3.1 Direcccionamiento de la tarjeta $\mu$ CDAS-16G en las I/O de la computadora.....	49

### **CAPÍTULO 4**

Figura 4.1 Activación de la fuente de alto voltaje.....	56
4.2 Diagrama de conexiones para control remoto de voltaje y corriente en la fuente de alto voltaje.....	58
4.3 Diagrama del circuito de encendido primario del MEXILIT II <sup>+</sup> para su operación en modo manual o por medio de la computadora.....	61
4.4 Energizado de la fuente de alto voltaje, retardo de 4.7 s y activación de la salida de alto voltaje.....	64
4.5 Circuito de activación para el relevador de alto voltaje mediante optotriac.....	65
4.6 Modificaciones al transmisor de fibra óptica del oscilador del módulo de controles.....	67

Tabla 4.1 Tabla de verdad para la activación de las salidas digitales de la tarjeta $\mu$ CDAS-16G.....	59
---	----

## CAPÍTULO 5

Figura 5.1 Diagrama del circuito de expansión para las salidas digitales de la tarjeta $\mu$ CDAS-16G.....	73
Tabla 5.1 Registro de los modelos utilizados y resultados del coeficiente de fragmentación después de la exposición a ondas de choque.....	72

## INTRODUCCIÓN

Este trabajo tuvo como objetivo principal el desarrollar, construir y adaptar la tecnología eléctrica-electrónica necesaria para operar y controlar en forma automatizada un generador de ondas de choque experimental, existente en el Laboratorio de Ondas de Choque del Centro de Física Aplicada y Tecnología Avanzada (CFATA) de la UNAM, en el *campus* de Juriquilla, Querétaro. Dicho generador, denominado MEXILIT II<sup>+</sup>, desde finales de la década de los ochentas y hasta finales del 2004, ha sido operado y controlado manualmente en su totalidad.

El enfoque de esta tesis se dirigió a la instrumentación básica necesaria, para que de manera alternativa dicho generador mantuviera su forma de operación manual ó pudiera ser manejado a través de una tarjeta de adquisición de datos con una microcomputadora tipo PC, la cual fue dedicada exclusivamente para tal fin.

La presentación del trabajo es conforme al desarrollo cronológico del mismo. Para empezar, como marco teórico propedéutico, fue necesaria la preparación en el área de las ondas de choque (tema de física), sus formas de generación y sus aplicaciones en otras ciencias naturales como la Medicina, Biología y Química; lo cual se describe en el capítulo uno.

Posteriormente, se tuvo que asimilar el funcionamiento y la operación del MEXILIT II<sup>+</sup>, delimitando los parámetros y señales de interés a controlar (capítulo dos), para después (capítulo tres) dedicarse al conocimiento y comprensión del equipo de cómputo designado, incluyendo la tarjeta de

intercambio de datos analógico-digitales y la programación preliminar correspondiente.

Con base en lo anterior, en el capítulo cuatro se describen el diseño, construcción y adaptación de la instrumentación electrónica necesaria para operar y controlar automáticamente el MEXILIT II<sup>+</sup>, de forma alternativa a su manejo manual. Se incluye el diagrama de flujo de la programación general del sistema.

En el capítulo cinco, se presentan las evaluaciones y los resultados del trabajo, tanto en lo referente a la instrumentación desarrollada, como en el comportamiento general del sistema automatizado ante un típico experimento de fragmentación de modelos artificiales de cálculos renales. Finalmente, en el capítulo seis, se mencionan las conclusiones generales de esta tesis.

## CAPÍTULO 1

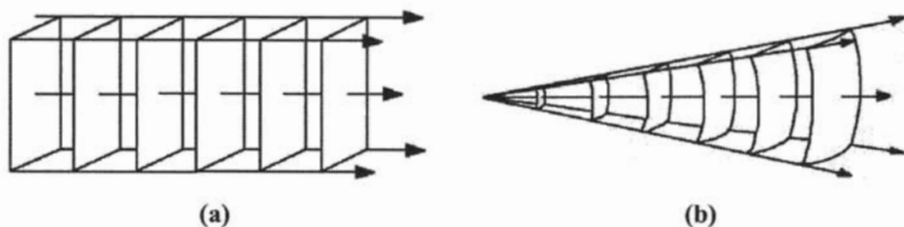
### CONCEPTOS GENERALES DE LAS ONDAS DE CHOQUE

Dentro de los diferentes tipos de ondas que aparecen en la naturaleza se pueden mencionar dos grandes tipos, las mecánicas y las electromagnéticas. Se denominan ondas mecánicas <sup>[4]</sup> aquellas que sólo se propagan a través de un medio ya sea sólido, líquido ó gaseoso, e inclusive un plasma; en estos casos, las partículas del medio oscilan alrededor de un punto fijo sin desplazarse en la dirección de propagación de la onda, sin transportar la materia que compone el medio. Las ondas electromagnéticas no requieren de medio alguno para su propagación, como es el caso de la luz que puede propagarse aún en el vacío.

Formalmente <sup>[4]</sup> se pueden definir las ondas mecánicas como aquellas que viajan de un lugar a otro a través de un medio material, originando una perturbación temporal en este medio, sin que el medio a su vez se transporte de un lugar a otro. Es un hecho que en los fenómenos ondulatorios, aún cuando no hay transporte de materia, si hay transporte de energía.

Si se arroja un objeto a una alberca, se pueden ver las ondas que se forman en la superficie del agua como una serie de círculos que se alejan del lugar donde cayó el objeto. En cada uno de estos círculos, todos los puntos están en el mismo estado de movimiento y definen una superficie llamada *frente de onda*. Si la densidad del medio es uniforme, la dirección de propagación de las ondas será perpendicular al frente de onda. Una línea perpendicular a los frentes de onda, en la dirección del movimiento de las

ondas, se denomina rayo. Cuando las perturbaciones viajan en una sola dirección, se tiene una onda plana, la cual se caracteriza porque en un determinado instante, las condiciones son las mismas en todas las partes de un plano cualquiera, perpendicular a la dirección de propagación. En el caso de las ondas esféricas, generadas por una fuente de onda puntual, se tiene una situación tridimensional originada por un movimiento que se propaga en todas las direcciones (figura 1.1).<sup>[4]</sup>



**Figura 1.1. Esquemas de frentes de onda y dirección de propagación.**<sup>[4]</sup> (a) Onda Plana. Cada plano representa un frente de onda espaciado una longitud de onda, en tanto que las flechas representan rayos. (b) Onda esférica. En este caso los frentes de onda, también espaciados una longitud de onda, son superficies esféricas en tanto que los rayos aparecen en dirección radial.

Dependiendo de la dirección del movimiento de oscilación con respecto a la dirección de propagación de la onda, éstas se pueden clasificar como:

- Onda longitudinal: Aquella en la que el movimiento de oscilación es paralelo a la dirección de propagación de la onda, como en el caso del sonido.

- Onda transversal: Aquella en la que el movimiento de oscilación es perpendicular a la dirección de propagación de la onda, como las ondas electromagnéticas, o las olas del mar.

Entre los fenómenos que ocurren en la propagación de las ondas se pueden mencionar los siguientes:

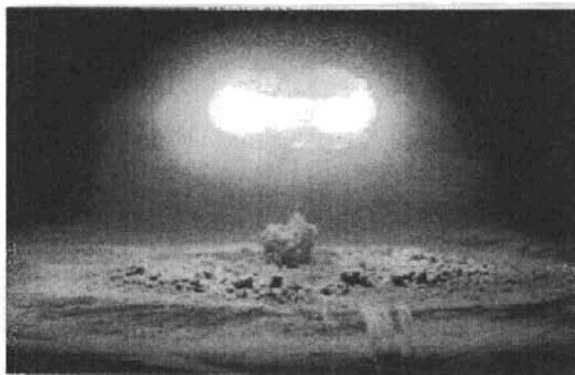
- Reflexión. Ocurre cuando una onda, al encontrarse con un nuevo medio que no puede atravesar, cambia de dirección de propagación.
- Refracción. Ocurre cuando una onda cambia de dirección de propagación al entrar en un nuevo medio en el que viaja a distinta velocidad.
- Difracción. Ocurre cuando una onda, al incidir en el borde de un obstáculo, cambia su dirección de propagación y deja de ir en línea recta.
- Interferencia. Ocurre cuando dos ondas se combinan al encontrarse en el mismo punto del espacio.

Es común encontrar en la literatura la expresión “onda de choque”. Estrictamente hablando, el término no es totalmente correcto, ya que en realidad cuando se menciona “onda de choque”, se hace referencia al concepto *frente de choque*. En otras palabras, el término onda de choque no es más que la propagación de un frente de choque, caracterizado por un cambio súbito del estado termodinámico del medio, es decir, por variaciones abruptas de la

presión, la densidad y la temperatura. Un frente de choque viaja a una velocidad mayor que la del sonido en el medio. <sup>[11]</sup> El ejemplo más común de un frente de choque puede entenderse como la “envolvente” de una explosión, según se ilustra en la figura 1.2.

Aclarado lo anterior, en este trabajo se usarán indistintamente los términos onda de choque y frente de choque, para referirse a lo antes explicado.

Además de los efectos destructivos de las ondas de choque (figura 1.2), existen diversas aplicaciones de las mismas, benéficas para la humanidad, en varios campos de la Física, Biología, Química y Medicina. <sup>[13,17]</sup> Tales aplicaciones, que se desglosan en la sección 1.2, requieren tanto de la generación repetible de las ondas de choque como de su concentración adecuada en una región pequeña del espacio. Los métodos y técnicas para lograr esto, se describen a continuación.



**Figura 1.2. Explosión atómica que produce un frente de choque.**



## 1.1 Generación y concentración de la onda de choque

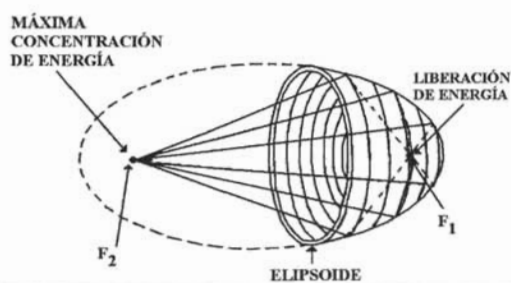
Todas las ondas de choque que se tratan en este trabajo son generadas y propagadas en agua, dado el campo de estudio y las aplicaciones específicas con organismos, entre los que se encuentra el ser humano. Esto se justifica con más detalle en la sección 1.2.

Para generar una onda de choque en agua, es decir, para provocar un cambio abrupto del estado termodinámico de tal líquido, existen varios métodos, entre los cuales se pueden mencionar el micro explosivo, el electrohidráulico y el piezoeléctrico.

En el método microexplosivo, se hace detonar una pequeña carga de unos cuantos miligramos de ázida de plata, inmersa en agua, cubierta con un material impermeable. La detonación es mediante un circuito de descarga de 30 V <sup>[17,24]</sup>. La explosión produce una onda de choque esférica que se propaga radialmente desde el punto donde se generó. En este caso, se dice que la fuente de generación es 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.

La utilidad de las ondas de choque está en su concentración adecuada, lo cual se hace de acuerdo al método de generación. En los casos de fuentes puntuales, como la descrita en el párrafo anterior, se utilizan reflectores elipsoidales, ya que la geometría de éstos permite captar gran parte de la onda de choque (más del 50%) y concentrarla en una región reducida del espacio (décimas de centímetro cúbico), logrando ahí presiones “puntuales” de

alrededor de 150 MPa ( $\sim 1500$  atmósferas) a partir de aproximadamente 20 Joules de energía liberada por el microexplosivo en unos cuantos microsegundos. En otras palabras, si el microexplosivo se detona en uno de los focos ( $F_1$ ) del reflector elipsoidal (ver figura 1.3), 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, cuyas aplicaciones se detallan en la sección 1.2.



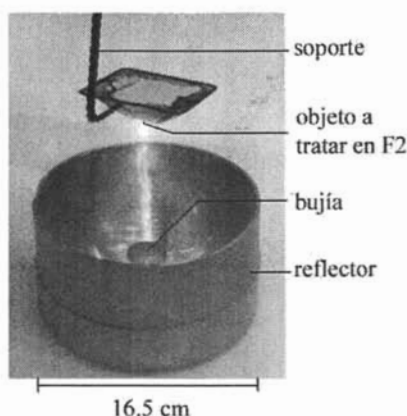
**Figura 1.3. Concentración de una onda de choque utilizando un reflector elipsoidal.**

En el método electrohidráulico, la onda de choque se genera mediante una descarga eléctrica abrupta de alto voltaje, con magnitud entre 18 y 30 kV, previamente almacenados en un condensador de capacidad  $C$ . La descarga ocurre entre dos electrodos inmersos en agua o en algún electrolito, situados en el primer foco ( $F_1$ ) del reflector, a fin de concentrar gran parte de la energía que se libera en  $F_1$  hacia el segundo punto focal ( $F_2$ ).

La descarga eléctrica forma un plasma (canal de gas ionizado) entre los electrodos debido a la diferencia de potencial entre éstos y fluye una corriente a través del medio líquido, aumentando su temperatura y expandiéndose. Esto comprime el agua circundante, formando así un frente de onda esférico, el

cual al ser concentrado por el reflector tiene la suficiente energía para generar presiones elevadas. La fuente de generación en este método se considera puntual, por lo que para concentrar la onda de choque también se utiliza un reflector elipsoidal (figura 1.4). La relación que existe entre la energía eléctrica  $E$ , liberada por la descarga, la capacidad  $C$  y el voltaje  $V$  aplicado, es proporcional al cuadrado de éste último, según la expresión (1).

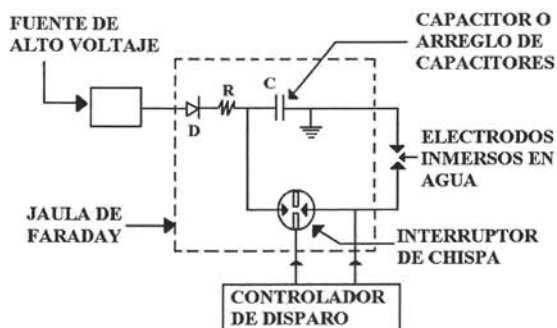
$$E = \frac{1}{2} CV^2. \quad (1)$$



**Figura 1. 4. Generación y concentración de una onda de choque por el método electrohidráulico.**

Para lograr la descarga eléctrica, se utiliza el circuito mostrado en la figura 1.5. Inicialmente, la fuente de alto voltaje carga lentamente ( $\sim 0.5$  s) el arreglo de capacitores  $C$ , a través del diodo  $D$  y la resistencia  $R$ , a un voltaje entre 18 y 30 kV con respecto a tierra. La descarga abrupta del voltaje así almacenado en  $C$  y por consiguiente la generación de la onda de choque, se produce posteriormente en los dos electrodos inmersos en agua (uno de éstos

está referido a tierra y el medio es prácticamente conductor), mediante el interruptor de chispa o “*spark gap*”, que se encarga de cerrar el circuito de descarga. Este elemento merece atención especial, ya que funciona como un interruptor muy rápido (tiempo de respuesta menor a  $10^{-7}$  s) y bien controlado para conmutar voltajes altos. Cabe mencionar, que el cierre del circuito de descarga, por las magnitudes de la tensión (30 kV) y la corriente involucrada ( $>100$  A), no puede efectuarse mediante interruptores mecánicos, electromecánicos o de estado sólido, debido a los efectos de corona y arco, además de la potencia liberada. Tal interruptor de chispa está formado por tres electrodos en aire o gas inerte, de los cuales, los dos más extremos están separados una distancia mayor a 3 cm, de tal modo que al aplicar hasta un voltaje de 30 kV (valor máximo), no ocurran efectos de corona o de arco. El tercer electrodo del interruptor de chispa está ubicado aproximadamente en la parte media o central con respecto a los electrodos extremos, de tal forma que si en éste se aplica un pulso de 40 kV o más, con respecto al electrodo extremo de salida (que conecta a uno de los electrodos inmersos en agua), se produce ionización del medio existente entre dichos electrodos (central y de salida), lo que equivale a “acercar” los electrodos extremos del interruptor de chispa, liberando por arco abrupto la alta tensión almacenada en el arreglo de capacitores *C*. El pulso de disparo proviene de una fuente de alto voltaje pulsado que también se conoce como controlador de disparo ó “*spark gap driver*”; cuyo principio de funcionamiento es similar al sistema de “encendido” de las bujías en los motores de combustión interna a gasolina desarrollados hasta hace poco más de 15 años.



**Figura 1.5. Diagrama de bloques del circuito eléctrico de un generador de onda de choque electrohidráulico.**

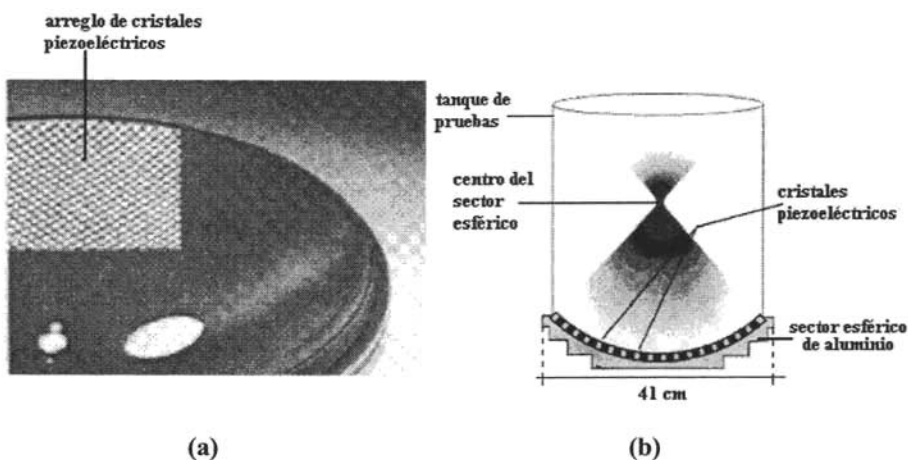
En el método de generación de ondas de choque piezoeléctrico, la palabra “piezo” se deriva de la palabra Griega:  $\pi\epsilon\zeta\omega$  que significa estrechar, apretar u oprimir. En 1880, Jaques y Pierre Curie descubrieron que al aplicar presión a un cristal de cuarzo se establecían cargas eléctricas en éste; llamaron a este fenómeno “efecto piezoeléctrico”. Tiempo después, verificaron que al aplicar un campo eléctrico al cristal, éste presentaba una deformación y se refirieron a este efecto como “efecto piezo inverso”. Por lo tanto, los materiales piezoeléctricos se pueden utilizar para convertir energía eléctrica en mecánica y viceversa. Se puede encontrar el efecto piezoeléctrico en la vida diaria, por ejemplo en los encendedores. Al aplicar una presión a un cristal piezoeléctrico con un pequeño golpe, se crea un campo eléctrico suficientemente fuerte para producir una chispa y así encender el gas. En relojes con alarma, al aplicar un voltaje de C. A., el material piezoeléctrico vibra a la frecuencia de dicho voltaje y el sonido resultante es utilizado como alarma. En el campo de la ingeniería, el uso más común de este fenómeno es en actuadores piezoeléctricos, que son dispositivos que producen movimiento

(desplazamiento) aprovechando el fenómeno físico de la piezoelectricidad, principalmente aplicado para nanoposicionamiento.

Como el efecto piezoeléctrico presentado por materiales naturales como el cuarzo, la turmalina, la sal de Rochelle, etc., es muy pequeño, se han desarrollado materiales con propiedades mejoradas, por ejemplo los materiales cerámicos ferroeléctricos policristalinos, como el  $\text{BaTiO}_3$  (titanato de bario) y el zirconato titanato de plomo (PZT).<sup>[1]</sup>

Los generadores piezoeléctricos están formados por un circuito de carga y disparo análogo al del método electrohidráulico, pero en este caso la descarga en lugar de ocurrir entre electrodos inmersos en agua, actúa sobre un plato esférico que contiene un arreglo de aproximadamente 3000 cristales piezoeléctricos (figura 1.6-a). Todos los cristales están conectados en paralelo y cubiertos por una capa de material aislante e impermeable al agua; esto último porque la superficie de los cristales generalmente es el fondo de un contenedor o tanque de pruebas (figura 1.6-b).

Al generar la descarga, se aplica abruptamente una diferencia de potencial eléctrico a los cristales, que los deforma momentáneamente transmitiéndose una energía mecánica al agua del contenedor. Debido a que los cristales están distribuidos sobre la superficie de un sector esférico (fondo del tanque), la energía liberada por cada uno de los cristales se concentra en el centro (o foco) de dicho sector, logrando así presiones puntuales elevadas (entre 30 y 100 MPa).<sup>[24]</sup>



**Figura 1.6. Generador de onda de choque piezoeléctrico. (a) Fotografía que muestra parte del arreglo de cristales piezoeléctricos del generador Piezolith 2300 (Richard Wolf, Knittlingen, Alemania) y (b) esquema simplificado de un generador de ondas de choque piezoeléctrico.**

Como ya se mencionó, el circuito de descarga para la excitación de los cristales piezoeléctricos es similar al circuito electrohidráulico y se ilustra en la figura 1.7. La fuente de alto voltaje carga al capacitor  $C_1$  a través de la resistencia  $R_1$ , a un voltaje de entre 5 y 10 kV; el cual posteriormente se descarga al ionizar el “spark gap” debido al pulso que recibe del controlador de disparo (“spark gap driver”). La resistencia  $R_2$  limita la corriente que recibe el arreglo de cristales durante la descarga.

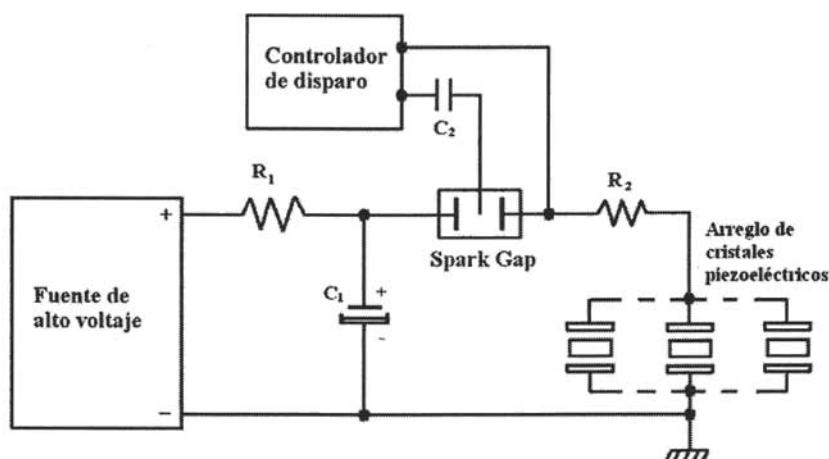


Figura 1.7. Diagrama de un generador de onda de choque piezoeléctrico.

## 1.2 Aplicaciones de las ondas de choque

En el campo de la Física, las ondas de choque se usan, por ejemplo, para investigaciones de resistencia mecánica de materiales; para impulsar proyectiles y estudiar la dinámica de los mismos, así como los fenómenos involucrados en el impacto contra blancos específicos.<sup>[2]</sup>

En Biología, las ondas de choque se usan en investigaciones dirigidas a volver más permeables las membranas de algunas células, con fines de transfección celular; es decir, la onda de choque aplicada genera pequeñas perforaciones tanto en la membrana como en el núcleo de la célula, de tal forma que se facilita la incorporación de material genético exógeno al interior de la estructura celular. Hay perspectivas de que esta técnica, todavía bajo estudio, pueda ser útil para la eliminación de algunos tumores cancerígenos.<sup>[13]</sup>



Dentro de la Química, hay investigaciones exhaustivas encauzadas a la conservación no térmica de alimentos sin el uso de conservadores, ya que la mayoría de los consumidores prefieren alimentos mínimamente procesados, que tengan un mínimo de compuestos químicos y que no pierdan sus propiedades sensoriales (olor, sabor, aroma, apariencia, textura) y nutritivas (contenido de vitaminas, proteínas, minerales, etc.); es decir, lo más parecido posible a los alimentos frescos. Es por esto que en los procesos de envasado no térmico se usan los conservadores (benzoato de sodio, por ejemplo), los cuales tienen la finalidad de actuar como agentes bactericidas o bacteriostáticos y asegurar la inocuidad del alimento. Aún así estos conservadores no dejan de ser una sustancia extraña que a la larga también podría causar daños al organismo humano. Es ya conocido que una alternativa al uso de conservadores es la pasteurización (método térmico), en la que el alimento es sometido a temperaturas altas cuyos efectos bactericidas son indiscutibles. Desde hace aproximadamente una década, surgió la idea de usar sólo altas presiones, sin calor, para la conservación de alimentos. Recientemente se han estudiado los efectos de las ondas de choque para evaluar su potencial como método alternativo de conservación de alimentos; esto es, usar las ondas de choque concentradas sobre el alimento, con fines bactericidas, tratando de lograr un alimento "más natural". [14,19,22]

En el campo de la Medicina, se pueden mencionar las aplicaciones en el área de oftalmología, ortopedia y urología. En la primera, es bien conocido el padecimiento de cataratas, que hasta hace relativamente poco tiempo, sólo era curable mediante cirugía. Actualmente, se usan las ondas de choque generadas por la energía de un rayo láser para removerlas. [13]

En la Ortopedia, se aplican las ondas de choque para acelerar el proceso de regeneración de huesos (osteogénesis) en algunos casos de fracturas en los cuales no se da el proceso de cicatrización normal. Como se sabe, cuando niños y personas jóvenes llegan a sufrir de una fractura, el proceso de recuperación después de reacomodar e inmovilizar el área afectada, es relativamente corto (unas cuantas semanas); en comparación con las personas mayores que llegan a necesitar incluso clavos o placas metálicas para la recuperación, misma que puede tardar varios años e incluso no llegar a sanar totalmente. Actualmente, se están realizando experimentos en vivo con la finalidad de demostrar que la aplicación de ondas de choque a implantes de hidroxiapatita puede acelerar la osteogénesis y con ello la recuperación del paciente. La hidroxiapatita es un biomaterial que se usa comúnmente para sustituir partes de la estructura ósea que el paciente ha perdido por algún padecimiento o accidente. Este biomaterial actúa como puente, permitiendo el paso de células hacia su interior, de manera que después de cierto tiempo, el hueso sustituye al biomaterial y la lesión queda reparada. Esta es una técnica que se usa con éxito desde hace varios años. Debido a que las ondas de choque desencadenan el mecanismo de cicatrización ósea en pacientes con fracturas de cicatrización retardada, se espera que un fenómeno similar ocurra al aplicarle ondas de choque a regiones vecinas sobre un implante del biomaterial mencionado, acelerando la reposición ósea. Otra de las aplicaciones en este campo es la eliminación de calcificaciones en huesos sin necesidad de cirugía.

Dentro de la urología existe un padecimiento llamado *litiasis* que es la formación de piedras o cálculos en el riñón y en las vías urinarias. Se sabe de la existencia de cálculos renales desde hace más de 5000 años y antiguamente

sólo se podían extraer mediante tratamientos invasivos, es decir, realizar una cirugía para poder eliminarlo completamente. A esta técnica se le conoce con el nombre de *litotomía* y se continuó realizando hasta el siglo XIX, cuando se encontraron adelantos y se desarrollaron métodos más seguros como la *litotripsia*, que consiste en introducir catéteres y pequeños instrumentos por vía urinaria o haciendo pequeñas incisiones en el cuerpo del paciente, para destruir los cálculos por medio de pequeños golpes. A partir de la segunda mitad del siglo XX se han utilizado algunas técnicas mediante endoscopia, para lo cual se introduce éste hasta una zona cercana al cálculo. En una de estas técnicas, el endoscopio tiene un par de electrodos en la punta invasiva, entre los cuales se producen descargas de alto voltaje que generan ondas de choque cercanas al cálculo y lo destruyen. En otra técnica, el endoscopio tiene acoplado un láser el cual libera una gran cantidad de energía que destruye al cálculo. Hasta la fecha, se siguen usando estos métodos ya que, aunque invasivos, son seguros y efectivos.<sup>[17]</sup>

Desde principios de los ochentas, se desarrolló una técnica no invasiva para la destrucción de cálculos renales, basada en las observaciones de que al impactar un proyectil no explosivo sobre un blanco, se causaban daños en la superficie y zonas cercanas al lugar del impacto, así como en partes internas del blanco. Esto se debe a que el proyectil al viajar a alta velocidad, llega a generar una onda de choque que se propaga a través del cuerpo golpeado.

Tomando como base tal fenómeno, en Alemania se empezó a trabajar con la idea de destruir cálculos renales de una forma no invasiva utilizando ondas de choque, lo cual dio origen a lo que hoy se conoce como Litotripsia Extracorporal por Ondas de Choque (LEOCH), para lo que se utiliza un

aparato llamado *litotriptor*, el cual genera y concentra ondas de choque sobre el cálculo para pulverizarlo. El paciente elimina posteriormente los residuos por vías naturales. La Litotripsia Extracorporal por Ondas de Choque se realiza hoy en día en más de 30 países con buenos resultados, aunque todavía con algunas excepciones y desventajas.

En 1987, en el Instituto de Física de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), se estableció el Laboratorio de Choques Débiles, con la finalidad de realizar investigaciones en el campo de las ondas de choque enfocadas en la Medicina. En este lugar, hoy Laboratorio de Ondas de Choque, que pertenece al Centro de Física Aplicada y Tecnología Avanzada (CFATA) de la UNAM en el *campus* Juriquilla de la ciudad de Querétaro, se han diseñado y construido dos generadores de ondas de choque; a saber, tres de tipo electrohidráulico (MEXILIT I, II y II<sup>+</sup>) [14,21,23] y uno piezoeléctrico, con los cuales se han realizado investigaciones importantes, que han llevado al desarrollo de nuevas técnicas y equipos que permiten mejorar las características de funcionamiento y la eficiencia de los litotriptores comerciales [12,15,16,18]. Los parámetros de interés físico asociados a los generadores de ondas de choque y particularmente a los litotriptores, son básicamente los siguientes: [8]

- Energía. El propósito de un litotriptor es entregar suficiente energía al cálculo a ser tratado, para reducirlo a fragmentos lo suficientemente pequeños para que puedan ser eliminados del sistema urinario. Esta cantidad de energía necesaria depende del tamaño y composición del cálculo. Sería deseable que toda la energía producida por el generador de ondas de choque fuese utilizada para desintegrar el cálculo; sin

embargo, parte de esta energía es absorbida por órganos y tejido blando que encuentra la onda de choque en su camino hacia el cálculo.

- **Zona focal.** Se define como zona o región focal al volumen dentro del cual cualquier punto es igual al 50% de la presión máxima producida. Una zona focal grande tiene la ventaja que se requiere menor exactitud en el ajuste de la onda de choque sobre el cálculo renal. Por otro lado, tiene la desventaja que una mayor parte del tejido queda expuesto a la energía de las ondas de choque. Cuando la zona focal es pequeña, el riesgo de daño al tejido vecino es menor, pero en este caso se requiere de una focalización exacta de la onda de choque. Los generadores piezoeléctricos tienen zonas focales de pocos milímetros, lo que los hacen adecuados para tratar cálculos pequeños.
- **Rango de energía.** Cuanto mayor sea el rango de energía de un generador de ondas de choque, se pueden adaptar mejor los niveles necesarios a cada caso particular.
- **Frecuencia de repetición de las ondas de choque.** Un factor importante es la frecuencia de repetición, la cual es limitada a no más de 3 Hz en los litotriptores electrohidráulicos. Si bien los litotriptores piezoeléctricos pueden funcionar con frecuencias de repetición mayores, la presión generada por los mismos cae a medida que la frecuencia aumenta. Arriba de 3 Hz el valor medio de presión disminuye alrededor del 50% con respecto al valor de un solo disparo. La frecuencia de repetición de pulsos también influye en el grado de daño al tejido blando. Se ha demostrado que el daño renal asociado a las

ondas de choque es menor a medida que la frecuencia de repetición de pulsos sea menor para el mismo número de pulsos entregados.

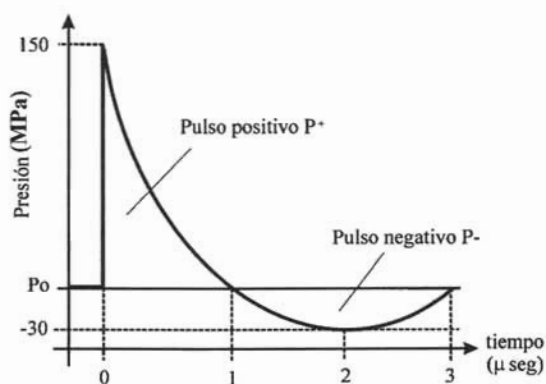
### **1.3 Interacción de las ondas de choque con la materia**

Como parte del espectro de las ondas de choque tiene frecuencias más altas que el ultrasonido, estas tienen un poder de penetración mayor. Además, originan cambios de presión mayores, por lo que es recomendable el uso de ondas de choque en lugar de ultrasonido para ciertas aplicaciones médicas como el caso de la Litotripsia Extracorporal. Debido al surgimiento de la LEOCH, aumentó el interés en estudiar la interacción de las ondas de choque con la materia inmersa en agua; esto último porque el organismo humano está compuesto aproximadamente en un 75% de agua.

Esencialmente hay cuatro efectos implicados en la interacción de las ondas de choque con materiales sólidos, estos son: el efecto de inercia, la compresión directa, la cavitación (formación o estimulación de burbujas en el líquido) y el efecto Hopkinson; los cuales se explican brevemente a continuación.

El efecto de inercia se produce ya que el material sólido no tiene una estructura uniforme, por lo cual, el cambio de presión aumenta de forma diferente en las partes que lo componen, generándose tensiones variadas. La compresión directa, debida al pulso positivo de presión (figura 1.8), así como la tracción, que es formada por la parte negativa del pulso (presión cuyo valor es inferior a la presión antes de que pase la onda de choque), provocan

esfuerzos en el interior del cálculo que dañan la cara que está expuesta a la onda de choque que es en la que se observa el daño más grande.<sup>[9,10]</sup>



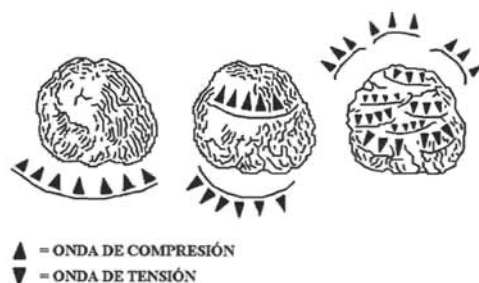
**Figura 1.8. Variación de presión causada por una onda de choque, donde  $P_0$  indica la presión de equilibrio.**

El efecto Hopkinson se manifiesta por el daño en la cara posterior del cálculo (la que no está expuesta directamente a la onda de choque) y es producido por la fractura y desprendimiento del material en esta superficie del cálculo. Como hay diferencia en la impedancia acústica entre líquido y sólido, se tiene una onda transmitida y una que es reflejada; la primera comprime el medio y la segunda presenta un cambio de fase y regresa como onda de tracción (figura 1.9).<sup>[9,10]</sup>

En lo referente a la cavitación, se considera que ésta es el principal mecanismo para la desintegración de los cálculos. Todos los líquidos como el agua, la sangre y la orina tienen gases disueltos y burbujas microscópicas. Con el paso de una onda de choque, las burbujas se comprimen súbitamente por la acción del pulso positivo  $P^+$ . Posteriormente, la presión disminuye drásticamente hasta alcanzar un punto de presión negativo  $P^-$  y las burbujas

aumentan su volumen miles de veces (figura 1.10). El tiempo en el que una burbuja alcanza su volumen máximo es aproximadamente de 50  $\mu\text{s}$  y permanece estable entre 200 y 600  $\mu\text{s}$  hasta que se colapsa violentamente y llega a producir ondas de choque secundarias y pequeños chorros de líquido que alcanzan velocidades entre 150 y 400 m/s. [17,26]

Tales chorros, conocidos también como “microjets”, contribuyen fuertemente a la desintegración del cálculo.



**Figura 1.9. Dibujo esquemático de la fragmentación de un cálculo por efecto Hopkinson.**



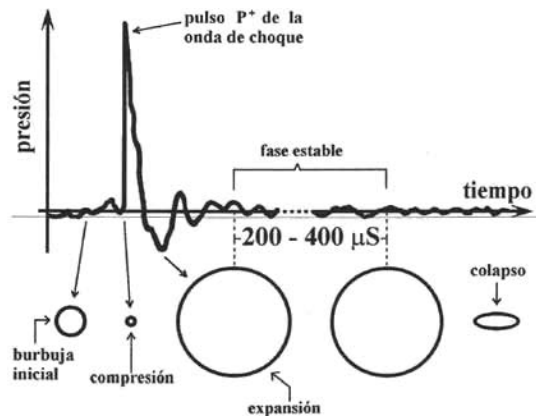


Figura 1.10. Cavitación generada por el paso de una onda de choque.

## 1.4 Presentación del trabajo. Antecedentes, justificación y objetivos

Con los antecedentes y conceptos descritos en las secciones anteriores, se pueden delimitar el área, enfoque y alcances de este trabajo de tesis, el cual se realizó en el Laboratorio de Ondas de Choque del Centro de Física Aplicada y Tecnología Avanzada (CFATA) de la UNAM. Dicho laboratorio, desde su inicio, ha pretendido mantenerse a la vanguardia dentro de su campo de investigación, tanto en lo referente a la instrumentación científica,<sup>[12,14]</sup> como en las aplicaciones biomédicas de las ondas de choque.<sup>[19,20]</sup> Con el cada vez más acelerado desarrollo de la tecnología electrónica (particularmente en el área digital), actualmente es una necesidad la automatización de equipos existentes<sup>[6]</sup> y el desarrollo de nuevos equipos,<sup>[3]</sup> preferentemente “computarizados”. Es por ello que se planteó el desarrollo de este trabajo de tesis, lo que además de satisfacer las necesidades de instrumentación del Laboratorio de Ondas de Choque del CFATA-UNAM,

redunda en la formación de recursos humanos, que es uno de los objetivos primordiales de nuestra Máxima Casa de Estudios.

Específicamente, este trabajo tiene como objetivos primordiales el desarrollar, construir y montar la instrumentación electrónica necesaria para que un generador de ondas de choque (actualmente bajo operación y control manuales), pueda de manera alternativa ser manejado mediante una computadora tipo PC, a través de una tarjeta de adquisición de datos. En otras palabras, preparar el generador mencionado para que pueda interaccionar con dicha computadora dedicada tanto a su operación y control, así como a la adquisición y el manejo de datos de interés.

Lo anterior contempla automatizar tanto las rutinas de encendido y apagado del equipo con las normas de seguridad pertinentes, así como la fijación automática de parámetros preestablecidos en los experimentos a realizar, incluyendo también la adquisición de datos procedentes de los diversos transductores de medición.

El cronograma de las actividades realizadas para el cumplimiento de dichos objetivos, se programó y se desarrolló de acuerdo al índice siguiente:

i) Capacitación en el área de las ondas de choque, funcionamiento de los diversos tipos de generadores. Aplicaciones de las ondas de choque en medicina, química, biología y física.

ii) Descripción y comprensión de la instrumentación electromecánica y electrónica asociada al generador de ondas de choque (en operación manual).

Delimitación de todas las señales de interés (operación, control, seguridad, datos, etc.).

iii) Planeación y desarrollo de la instrumentación complementaria a cada una de las etapas del conjunto, para el enlace con una tarjeta de adquisición de datos a elegir.

iv) Selección y aprendizaje (o repaso) del lenguaje de programación a usar (preferentemente lenguaje C). Diseño de la programación necesaria. Pruebas de cada una de las etapas del conjunto.

v) Ensamblado del generador de ondas de choque “computarizado”. Evaluación final tanto a nivel instrumentación como de física aplicada en un experimento típico. Reporte escrito de todas las actividades realizadas.

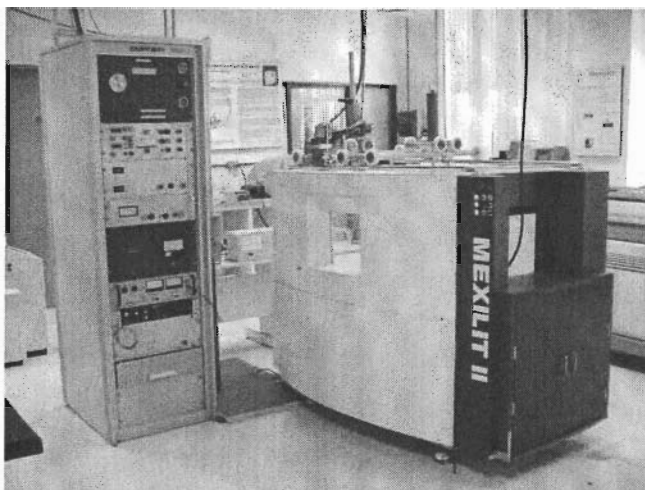
El inciso (i) y parte del inciso (ii) de dichas actividades, han sido cubiertos y descritos en este capítulo. Los tópicos restantes se desglosan en los capítulos siguientes, de acuerdo al orden del índice.

## **CAPÍTULO 2**

### **EL GENERADOR DE ONDAS DE CHOQUE EXPERIMENTAL MEXILIT II<sup>+</sup>**

El generador de ondas de choque experimental con el que nació el actual Laboratorio de Ondas de Choque (sección 1.2, página 15), es de tipo electrohidráulico y de inicio se denominó MEXILIT I.<sup>[1]</sup> Este equipo estuvo en operación durante más de 5 años (1989 a 1995). Posteriormente, recibió el nombre de MEXILIT II por haber evolucionado con varias mejoras en su diseño; y finalmente, desde 1998 a la fecha, ha tenido el nombre de MEXILIT II<sup>+</sup> (figura 2.1). Como se mencionó anteriormente este generador evolutivo fue diseñado y construido para diferentes aplicaciones en los campos de la Física, Biología, Química y Medicina, por lo que una gran ventaja del actual MEXILIT II<sup>+</sup> sobre cualquier otro aparato comercial, es que puede ser utilizado en una amplia variedad de experimentos y no sólo para la desintegración de cálculos, como los equipos comerciales.

Otras ventajas que presenta el equipo, son la utilidad para encontrar, demostrar e impulsar algunas mejoras a los equipos clínicos existentes, con la finalidad de lograr tratamientos de litotripsia extracorporeal más eficientes; es decir, lograr la desintegración de cálculos con el menor número de ondas de choque posible y con el mínimo daño a los tejidos.



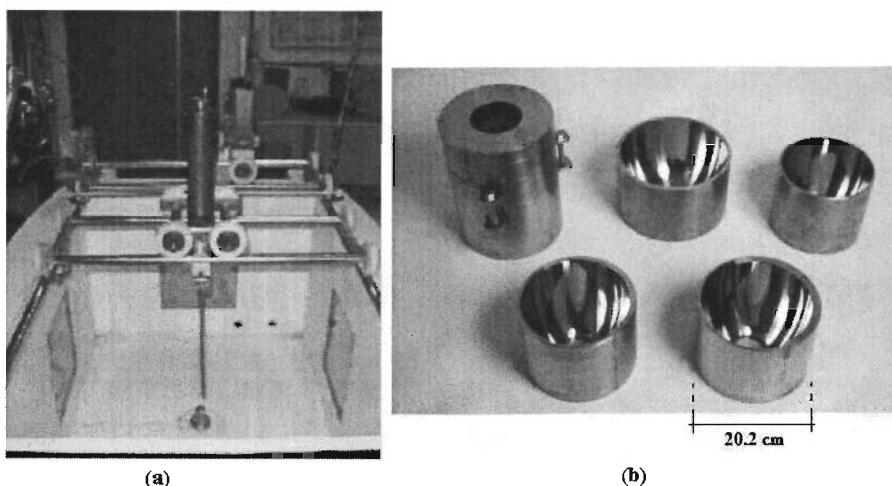
**Figura 2.1. Generador de ondas de choque experimental MEXILIT II<sup>+</sup>**

## **2.1 El MEXILIT II<sup>+</sup>**

Como equipo experimental, obviamente tiene la versatilidad de modificarse de acuerdo a las necesidades específicas de los proyectos que van surgiendo en el Laboratorio de Ondas de Choque, así como ir a la vanguardia del desarrollo tecnológico en general, motivo por el cual este equipo se seleccionó para el desarrollo de este trabajo.

En la figura 2.1 se muestra el conjunto del generador de ondas de choque, que está formado principalmente por una tina de pruebas que descansa sobre una base de acero y cuenta con dos pequeños posicionadores de precisión montados sobre la tina, que sirven para sujetar y mover objetos a fin de ubicarlos en la región focal. La tina está hecha de fibra de vidrio, mide en su interior 120 x 80 x 60 cm y en cada una de sus paredes tiene una ventana de vidrio. También posee entradas para agua fría y caliente, las cuales se abren manualmente, además de una para agua desaerada, proveniente de una planta

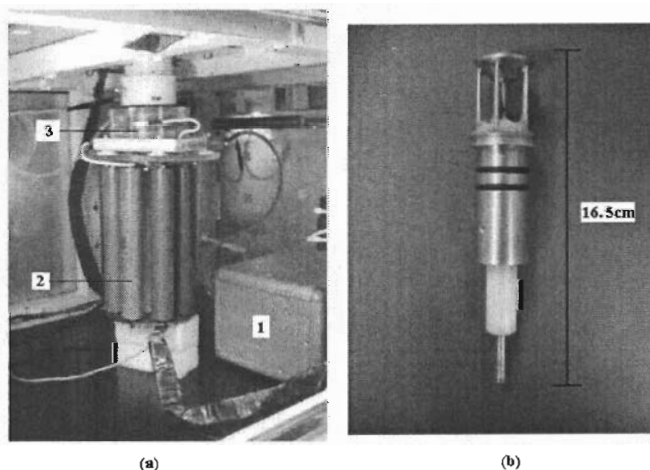
de tratamiento que sirve para eliminar los gases disueltos en el agua; lo cual es muy importante en algunos experimentos. En la pared opuesta y sobre el piso de la tina se encuentran desagües, con la opción de reciclar el agua, enviándola a un tinaco elevado mediante una bomba. En el centro del fondo de la tina hay una perforación con un soporte de *nylamid* que atraviesa la base de ésta y sirve para colocar la bujía que sobresale por la parte de abajo y se conecta al circuito eléctrico de descarga que está debajo de la tina (figura 2.2-a). Alrededor de la bujía hay un soporte con un anillo de acero inoxidable mediante el cual se fijan los diferentes reflectores de acero inoxidable que se utilizan para concentrar la energía, según lo descrito en la sección 1.1. Se cuenta con varios reflectores con forma de elipsoide de revolución, de diferente geometría cada uno, y se usan según las necesidades de concentración de energía. Además, se cuenta con un reflector parabólico que se utiliza para producir campos de presión homogéneos (figura 2.2-b).<sup>[11,17]</sup>



**Figura 2.2. a) Tina de pruebas del MEXILIT II<sup>+</sup> y b) reflectores de acero inoxidable**

Como ya se mencionó, bajo la tina se encuentra el circuito eléctrico de descarga formado por un arreglo de 8 capacitores intercambiables de 10 nF cada uno, conectados en paralelo (80 nF en total). Cada uno puede soportar como máximo un voltaje de 30 kV. Entre uno de los conectores de la bujía y uno de los polos del arreglo de capacitores está el “*spark gap*” o interruptor de chispa, según se muestra en la figura 2.3-a. Las descargas eléctricas se dan entre dos electrodos de tungsteno, separados 2 mm, que forman parte de una bujía, intercambiable (figura 2.3-b), que se coloca en el fondo de la tina.

Para que se produzca la descarga eléctrica abrupta entre los electrodos de la bujía, es necesario ionizar el medio entre los electrodos principales del interruptor de chispa; lo cual se logra aplicando un pulso de 40 kV al electrodo central de dicho interruptor, mediante una fuente de alto voltaje pulsado o “*spark gap driver*”, el cual se puede ver en la parte inferior derecha de la figura 2.3-a.



**Figura 2.3. (a) Circuito eléctrico de descarga: (1) “*spark gap driver*”, (2) arreglo de capacitores, (3) interruptor de chispa. (b) Bujía.**

Junto a la tina de pruebas se localiza un módulo de controles (figura 2.1) donde, entre otros aparatos, se encuentran un oscilador, la fuente de alto voltaje y un contador de pulsos digital. El oscilador (*PG-12A oscilator*, *Impulse Engineering Inc.*) proporciona los pulsos de comando para el “*spark gap driver*”, ya sea en forma singular ó secuencial, con una frecuencia máxima de 4 Hz. La inductancia del circuito de condensadores, interruptor de chispa y bujía, es baja ( $\sim 20$  nH) para que la descarga pueda producirse en el menor tiempo posible, obteniendo así un pulso de compresión en el agua de duración muy corta ( $< 1$   $\mu$ seg)<sup>[17]</sup>.

## 2.2 Funcionamiento del circuito eléctrico

El circuito encargado de generar la descarga eléctrica abrupta se muestra en la figura 2.4 y está formado por los elementos siguientes:

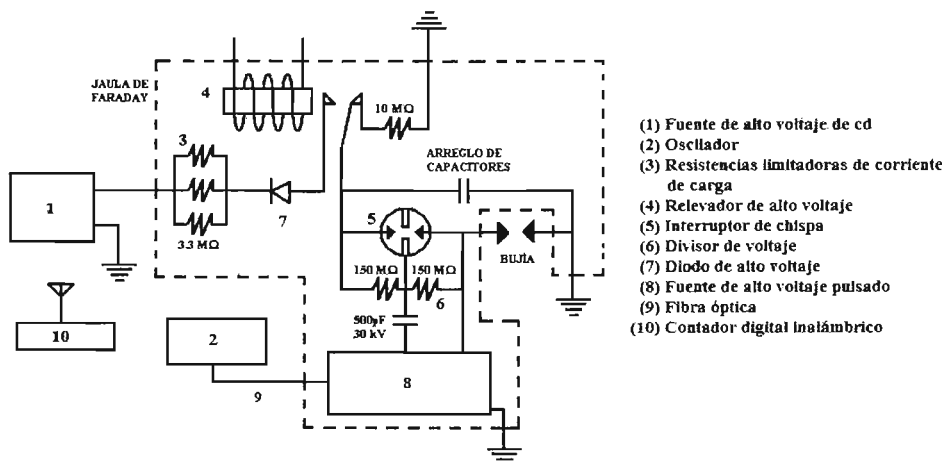


Figura 2.4. Diagrama a bloques del circuito eléctrico del MEXILIT II<sup>+</sup>.



- Una fuente de alto voltaje de corriente directa (*GAMMA HVR RR30-20R, Gamma High Voltage Research Inc.*) (1), cuya función es la de cargar el arreglo de capacitores a una magnitud de voltaje predeterminada (entre 18 y 30 kV), según el experimento a realizar. Dicha carga es a través de un arreglo de tres resistencias de 10 M $\Omega$  cada una, conectadas en paralelo (3), un diodo (7) de alto voltaje (NTE 513, 45 kV, 200 mA) y los platinos de un relevador de seguridad de alto voltaje (4), el cual se describe posteriormente. La polaridad de carga en el arreglo de capacitores es negativa con respecto a tierra, bajo la constante de tiempo  $\tau = 264$  mseg. El diodo de alto voltaje (7) protege a la fuente (1) contra transitorios excesivos de alto voltaje inverso que se generan durante la descarga abrupta de los capacitores.
- El interruptor de chispa (5), en serie con los electrodos de la bujía, forman un paralelo con el arreglo de capacitores. Cuando estos han sido cargados al voltaje predeterminado y el interruptor de chispa es accionado, ocurre la descarga eléctrica abrupta entre los electrodos de la bujía inmersos en agua, formando el plasma ya mencionado (sección 1.1) que genera la onda de choque.
- El oscilador (2) y el “*spark gap driver*” (8) son los encargados de accionar el interruptor de chispa. El oscilador o circuito de control (9) emite un pulso que viaja por una fibra óptica hasta llegar a la fuente de alto voltaje pulsado (*TG-40A spark gap driver, Impulse Engineering Inc.*), en donde la señal óptica se convierte en un pulso de 40 kV que llega al electrodo central del interruptor de chispa, pasando por un capacitor de 500 pF y un divisor de voltaje formado por dos resistencias

de  $150\text{ M}\Omega$  cada una. La diferencia de potencial que existe entre el electrodo central y el principal que va conectado a la bujía, produce entre ellos un arco de baja corriente, el cual ioniza el aire que hay entre los electrodos principales, permitiendo que los capacitores se descarguen a través de los electrodos de la bujía que están inmersos en agua en el interior de la tina. Este proceso se repite cada vez que se genera una onda de choque.

- Finalmente, el relevador de alto voltaje (4) es una medida de seguridad que mantiene el arreglo de capacitores descargados (a través de una resistencia de  $10\text{ M}\Omega$ ) cuando no se requiere generar ondas de choque por periodos largos, incluyendo la finalización de experimentos y el apagado del equipo. En la figura 2.4, tal relevador se encuentra en la posición de seguridad (capacitores descargados). Su activación previa para generar ondas de choque es mediante un interruptor manual que suministra voltaje de línea ( $120\text{ Vrms}$ ,  $60\text{ Hz}$ ) a una fuente de  $110\text{ Vcd}$  acoplada a la bobina (4) de dicho relevador.

Es importante mencionar que el encendido y apagado del equipo, así como todas las variables involucradas en el sistema, como lo son la frecuencia de las descargas, el voltaje y la corriente límite de carga para los capacitores, etc., se ajustan manualmente mediante los interruptores, botones y perillas correspondientes de cada aparato, según se describe en la sección siguiente.

## 2.3 Modo de operación manual

Para ilustrar el modo de operación manual del equipo, se usa como ejemplo la fragmentación a un modelo artificial de cálculo renal, que se somete a 100 ondas de choque aplicadas a una frecuencia de 0.5 Hz, con 20 kV de alto voltaje de descarga. Dicho modelo se ubica en la región de máxima presión ( $F_2$ ) de un reflector elipsoidal tipo E4 <sup>[11]</sup> dentro de agua suministrada por la red doméstica, con un nivel de llenado de 5 cm por encima del plano focal.

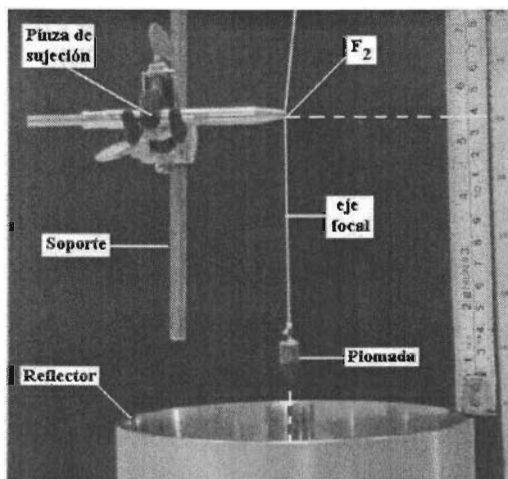
### 2.3.1 Preliminares de operación

Antes de encender el equipo, debe colocarse el modelo a tratar en la región especificada y de acuerdo al tipo de reflector a utilizar. En este caso el reflector E4 tiene las características siguientes:

- Distancia focal ( $\overline{F_1 F_2}$ ) = 230.2 mm.
- Semieje mayor,  $a = 139.1$  mm.
- Semieje menor,  $b = 78.0$  mm.
- Lado recto,  $lr = 87.5$  mm.
- Excentricidad,  $e = .828$
- Altura del reflector = 135.8 mm.
- Distancia del borde superior del reflector a  $F_2 = 134.4$  mm.

Con base en la última distancia anterior, la ubicación del plano focal (que contiene a  $F_2$  y es perpendicular al semieje mayor), se logra fácilmente mediante un segmento de cinta métrica metálica.

Para la colocación precisa del modelo sobre el plano focal, se usan los posicionadores que se encuentran sobre la tina de pruebas, a los cuales se les monta un soporte, una pinza de sujeción y una plomada, según se muestra en la figura 2.5.



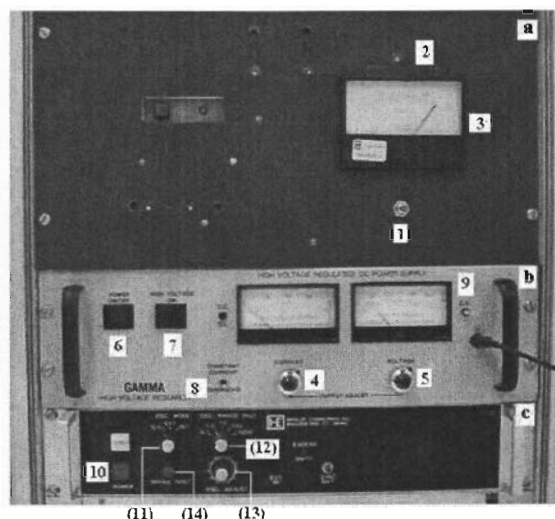
**Figura 2.5. Localización de  $F_2$  en el reflector E4**

El llenado de la tina de pruebas también es de forma manual; esto es, abriendo la llave de paso del agua, cerrando previamente el desagüe, y revisando el nivel de llenado mediante una escala métrica que se encuentra en las paredes laterales de la tina. Una vez alcanzado el nivel deseado, -según el tipo de experimento a realizar-, se debe cerrar la llave de admisión del agua.

### **2.3.2 Operación del equipo**

Como se menciona en la sección 2.1, junto a la tina de pruebas está el módulo de controles donde están colocados el panel de alimentación general, el oscilador (*PG-12A oscillator, Impulse Engineering Inc.*) y la fuente de alto

voltaje de c.d. (*GAMMA HVR RR30-20R*, *Gamma High Voltage Research Inc.*) (ver figura 2.6).



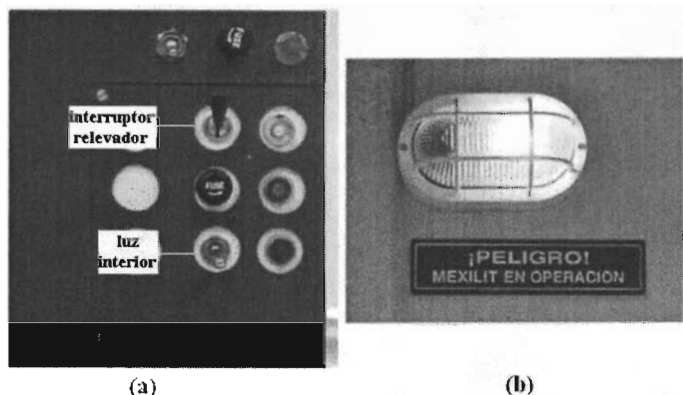
**Figura 2.6. Módulo de controles del MEXILIT II<sup>+</sup>: (a) alimentación general, (b) fuente de alto voltaje, (c) oscilador.**

Para operar estos equipos es necesario encender primero la alimentación general del módulo de controles (1) que se confirma visualmente con el foco piloto (2) y el monitor de voltaje de línea (3). El encendido de la fuente de alto voltaje se hace en dos pasos denominados “energizado” y “activación”, que respectivamente suministran el voltaje de línea (120 Vrms, 60 Hz) a los circuitos primarios y ponen en funcionamiento las etapas de alto voltaje.

Antes de encender la fuente de A. V., se debe verificar que la perilla de control del alto voltaje (5) esté en cero y la perilla limitadora de corriente (4) indique el valor 6.0 en el dial, -que corresponde al 60 % de la máxima corriente de salida. Esta última perilla por lo general no se mueve (está

anclada mediante su candado en el dial), salvo en casos excepcionales en los que se requiera usar la fuente de alto voltaje con otro valor límite de su corriente de salida, en otras aplicaciones ajenas a la generación de ondas de choque. Por lo mismo, su variabilidad no se contempla en este trabajo.

El energizado de la fuente de A.V. se logra con el botón verde de encendido principal (6); luego, hay que activar el relevador de alto voltaje mediante el interruptor que se encuentra en uno de los extremos de la tina de pruebas (figura 2.7-a), lo cual es confirmado por una luz amarilla intermitente (figura 2.7-b) que indica precaución, porque el arreglo de capacitores ya está conectado al alto voltaje y puede estar cargado.

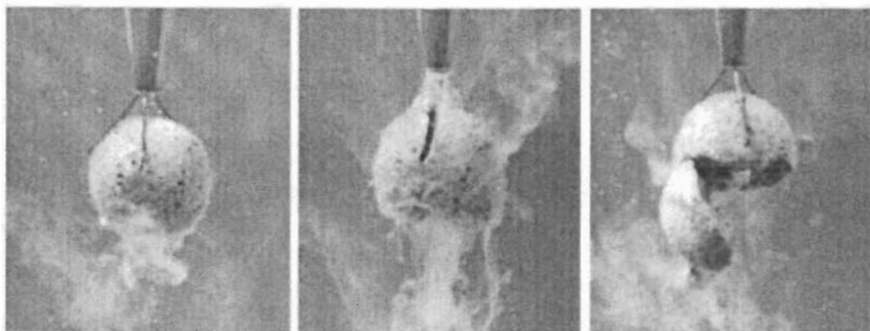


**Figura 2.7. (a) Interruptor del relevador de alto voltaje. (b) luz de alerta.**

Posteriormente, en la fuente de alto voltaje, hay que presionar el botón rojo (7) para la activación del mismo; y luego se gira la perilla de control del alto voltaje (5) a la magnitud deseada (para este caso se utiliza un valor fijo de 20 kV), la cual se lee continuamente en el medidor (9).

Antes de encender el oscilador, presionando el botón rojo (10), se verifica que éste se encuentre en modo de operación singular “S. S.” indicado por la perilla (11). De ser necesario, se debe ajustar la frecuencia de trabajo; si este es el caso, la fuente de alto voltaje debe apagarse y el oscilador se cambia a modo de operación secuencial, girando la perilla (11) a la posición “*INT*”. Por medio de las perillas de selección de rango (12) y ajuste fino (13), se calibra la frecuencia de las descargas con ayuda de un cronómetro digital, tomando el tiempo entre descargas sucesivas (en este caso se usan 0.5 Hz). Ya calibrada la frecuencia, se debe regresar la perilla (11) a modo singular “S.S.”, se vuelve a energizar, activar y establecer el nivel del alto voltaje y se pueden realizar descargas en este modo, presionando el botón rojo (14) “*SINGLE SHOT*”. También se debe encender el contador digital inalámbrico, revisando que su pantalla digital indique ceros.

Una vez llena la tina de pruebas al nivel de agua deseado, colocado el modelo en la posición de  $F_2$ , ajustado el nivel de alto voltaje, así como la frecuencia de trabajo; se puede girar la perilla (11) del oscilador a modo secuencial “*INT*”; y con ayuda del contador digital se vigila el número de descargas ocurridas hasta llegar a las requeridas (100 para este ejemplo, ver figura 2.8). Para detener la secuencia de disparos del oscilador, se cambia la perilla (11) a modo singular “S.S.”.



**Figura 2.8. Secuencia de la fragmentación de un modelo artificial de cálculo renal expuesto a las ondas de choque.**

Una vez terminadas las descargas planeadas, se debe bajar el nivel de alto voltaje a cero y posteriormente aterrizar el arreglo de capacitores mediante el relevador de alto voltaje.

Si no se van a realizar más experimentos, ya con el alto voltaje en cero, se debe apagar primero la fuente del mismo, luego el oscilador y finalmente la alimentación general del módulo de controles.

Para concluir la sesión de operación, se vacía la tina de pruebas con opción a recircular el agua enviándola a un tanque elevado por medio de una bomba. Finalmente se retira el reflector y la tina se deja completamente limpia y seca.



## 2.4 Delimitación de las señales de interés

De acuerdo a lo mencionado en la sección anterior (sin contemplar los preparativos preliminares), las principales variables de operación del MEXILIT II<sup>+</sup> son:

Para la rutina de inicio:

1. Encendido de la alimentación general del módulo de controles.
2. Encendido de la fuente de alto voltaje.
3. Activación del relevador de alto voltaje.
4. Activación del alto voltaje.
5. Ajuste del oscilador a modo singular (“S. S”).
6. Encendido del oscilador; y de ser necesario:
7. Ajuste de la frecuencia de trabajo del oscilador (máximo 2 Hz).

Para la rutina de operación:

8. Operación del oscilador, que comprende:
  - 8.1 Disparo manual del pulso de descarga.
  - 8.2 Selección de descargas a modo secuencial (posición “INT”).

Para la rutina de apagado:

9. Regresar la perilla del oscilador a posición singular (“S. S.”).
10. Bajar a cero el nivel de alto voltaje de la fuente.

11. Aterrizar el arreglo de capacitores mediante del relevador de alto voltaje.
12. Apagar la fuente de alto voltaje.
13. Apagar el oscilador.
14. Apagar la alimentación general del módulo de controles.

Para llevar a cabo las tareas mencionadas en modo automático; es decir, mediante una microcomputadora dedicada, fue necesario desmontar los equipos del módulo de controles y analizar como se efectúan internamente cada una de las acciones descritas, a fin de decidir qué tipo de señales y actuadores eléctricos serían los más adecuados para realizar las funciones específicas a cada caso, con la planeación de la instrumentación adicional a incluir en los controles del generador de ondas de choque. A continuación se describen dichos análisis:

1. Para el encendido de la alimentación general del módulo de controles, como ésta se controla manualmente mediante un interruptor mecánico de 2 polos 1 tiro, sería suficiente el uso de un relevador con las mismas características, activado por una bobina de 5 Vcd, señal digital (TTL) que maneja cualquier tipo de tarjeta de adquisición de datos. Sin embargo, se contempló que esta etapa, por ser la de inicio, podía aprovecharse para seleccionar la forma de operación del MEXILIT II<sup>+</sup> (manualmente o a través de la PC), mediante el selector manual adecuado.
2. Para el energizado de la fuente de alto de alto voltaje se utiliza un interruptor de 2 polos 1 tiro y la activación del alto voltaje es mediante

un interruptor de 1 polo 1 tiro momentáneo. La magnitud del alto voltaje se ajusta mediante 1 potenciómetro de 5 k.Ω. Internamente, en dicha fuente, tal potenciómetro forma un divisor de voltaje continuamente variable entre 0 y 5 Vd..

3. La activación del relevador de alto voltaje, es mediante un interruptor de 1 polo 1 tiro, para el voltaje de línea.
4. El encendido del oscilador es por medio de un interruptor de 1 polo 1 tiro; los disparos en modo singular (“S. S.”) se hacen mediante un interruptor momentáneo de 1 polo 1 tiro normalmente abierto; el cambio entre modo singular y secuencial es con un selector de 1 polo 2 tiros. El intervalo de variación de la frecuencia está especificado desde 0.01 hasta 100 Hz, por décadas en 4 pasos. Cada década de frecuencias se escoge con un selector de 1 polo 4 tiros, en el que la salida de 100 Hz no está conectada.

No es indispensable ni recomendable usar el oscilador anterior controlado por la PC a través de una tarjeta de adquisición de datos, ya que la mayoría de éstas pueden generar pulsos equivalentes totalmente repetibles y estables mediante la programación adecuada.

## CAPÍTULO 3

### EL EQUIPO DE CÓMPUTO

El equipo de cómputo designado para este trabajo fue una microcomputadora IBM tipo PS/2 – AT286 con *bus microchannel*, equipada con una tarjeta de expansión multifuncional de alta velocidad analógica-digital tipo  $\mu$ CDAS-16G, de la marca *Keithley MetraByte Corp.*

#### 3.1 La tarjeta de adquisición de datos

Las características principales de esta tarjeta son las siguientes: <sup>[7]</sup>

- 4 canales digitales de entrada.
- 4 canales digitales de salida.
- 8 entradas analógicas en modo diferencial ó 16 unipolares.
- Ganancias de 1, 10 100 y 500, para las entradas analógicas, con resolución de 12 bits.
- 2 convertidores D/A de 12 bits cada uno.
- 1 temporizador programable de tres canales, para frecuencias desde 8 pulsos/hora hasta 2.5 MHz.
- 1 salida de voltaje de precisión de  $-5$  Vcd, para referencia.
- 1 salida de voltaje de polarización de  $+5$  Vcd.
- Velocidad de captura hasta 70000 muestras por segundo.

Para la instalación de esta tarjeta, se destapó el gabinete principal de la PC y se insertó en uno de los “*slots*” disponibles. Como este tipo de sistema tiene un BIOS accesible únicamente por “*software*”, se utilizó su diskette de inicio y se configuró de acuerdo a las indicaciones del mismo.

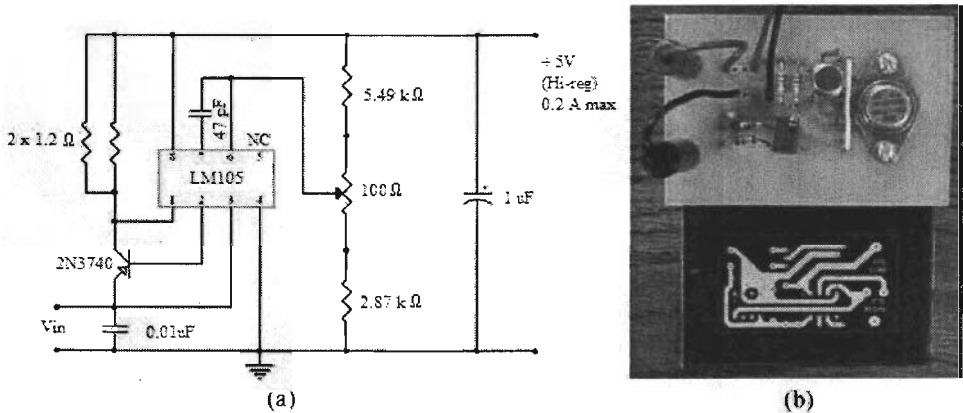
Tal proceso de configuración consistió en que después de conectada la tarjeta, se arrancó la PC con el disco de configuración dentro de la unidad de 3.5”, esperando el mensaje de error (error 165) que indicó el cambio en la estructura del “*hardware*”. Posteriormente, apareció una ventana de diálogo en la cual se tenían las opciones de configuración automática ó manual del sistema.

Inicialmente se seleccionó el modo automático, pero este dejó a la tarjeta con las entradas analógicas en forma diferencial, lo cual no convenía a los propósitos de este trabajo, ya que aún cuando la escala bipolar generalmente es más versátil (maneja señales positivas y negativas), si se sabe que las señales a capturar serán voltajes positivos, la escala unipolar dará una mejora en la resolución a razón de 2:1, esto es, la conversión A/D será más precisa. Se optó por reconfigurar en modo manual, estableciendo 16 entradas analógicas unipolares con factor de ganancia unitario.

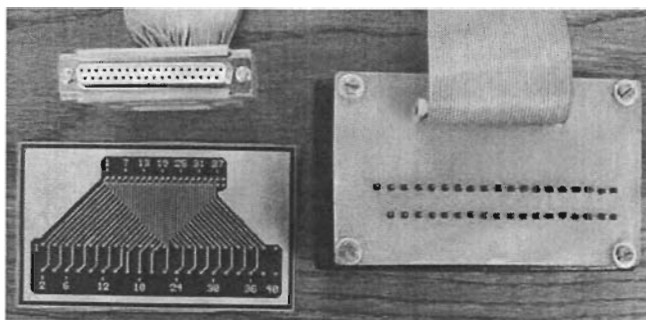
Terminada la configuración deseada, se volvió a reiniciar el sistema comprobando que ya no apareciera mensaje de error alguno. Posteriormente, se procedió a calibrar la tarjeta, lo cual es necesario para garantizar su precisión. El fabricante recomienda que esta calibración se deba hacer al menos 2 veces al año.

Para dicha calibración se necesitó un multímetro digital de al menos 4 ½ dígitos y una fuente de referencia externa. Esta última se tuvo que construir con un microcircuito LM105, que es un regulador de voltaje, al cual se le agregó en la etapa de salida una ganancia extra para mejorar su regulación (figura 3.1). También se fabricó una tarjeta de extensión del puerto de salida (conector tipo DB-37) a un circuito impreso con terminales lo suficientemente separadas que permitieran el uso de multímetro para las mediciones necesarias (figura 3.2).

Dicha calibración se hizo con el “*software*” suministrado por el fabricante; y después fue comprobada mediante programación personal en lenguaje QBASIC.



**Figura 3.1. Fuente de voltaje de precisión. (a) Diagrama eléctrico.  
(b) Tarjeta y negativo del circuito impreso.**



**Figura 3.2. Tarjeta de extensión del puerto de salida**

Se optó por utilizar el lenguaje QBASIC en lugar del ensamblador o “C” propuestos, debido a los criterios siguientes:

- i) El manual de operación de la tarjeta  $\mu$ CDAS-16G tiene la mayoría de sus comandos en lenguaje BASIC (o BASICA, o GWBASIC), los cuales se trasladaron al QBASIC fácilmente.
- ii) Los tiempos requeridos para la operación del equipo no son tan cortos como para sacrificar la comodidad de programación por la rapidez de operación de la tarjeta. Sobre esto último, dicha tarjeta, aún manejada mediante BASIC ó GWBASIC quedó sobrada en rapidez en un factor de 100, con respecto a las necesidades de este trabajo.
- iii) El lenguaje QBASIC permitió hacer fácilmente archivos ejecutables en sistema operativo DOS, sin requerir de algún otro lenguaje intérprete, con la ventaja de poder usarlos en archivos de procesamiento por lotes (\*.bat), ejecutables aún dentro de

ambiente Windows. Con sistema operativo DOS fue más que suficiente.

### 3.2 Operación de la tarjeta $\mu$ CDAS-16G

Existen dos formas de manejar la tarjeta:

- a) Mediante subrutinas incluidas en el “*software*” proporcionado por el fabricante, que involucra el uso de un archivo en binario (DASG.bin).
- b) Mediante comandos elementales de operación y control que requieren el conocimiento de la arquitectura de la tarjeta en cuanto a registros, conformación de *bytes*, conversión de datos hexadecimales, etc.

Aún cuando era más cómoda la primera opción, se decidió por la segunda dado que aunque requirió de mayor trabajo e imaginación, se obtuvieron los beneficios de aprendizaje y mayor velocidad de respuesta; y sobre todo, el conocer mejor la forma en que opera dicha tarjeta, que redundaba en la facilidad de corregir cualquier deficiencia imprevista.

La arquitectura de la tarjeta, se muestra en el diagrama a bloques de la figura 3.3.



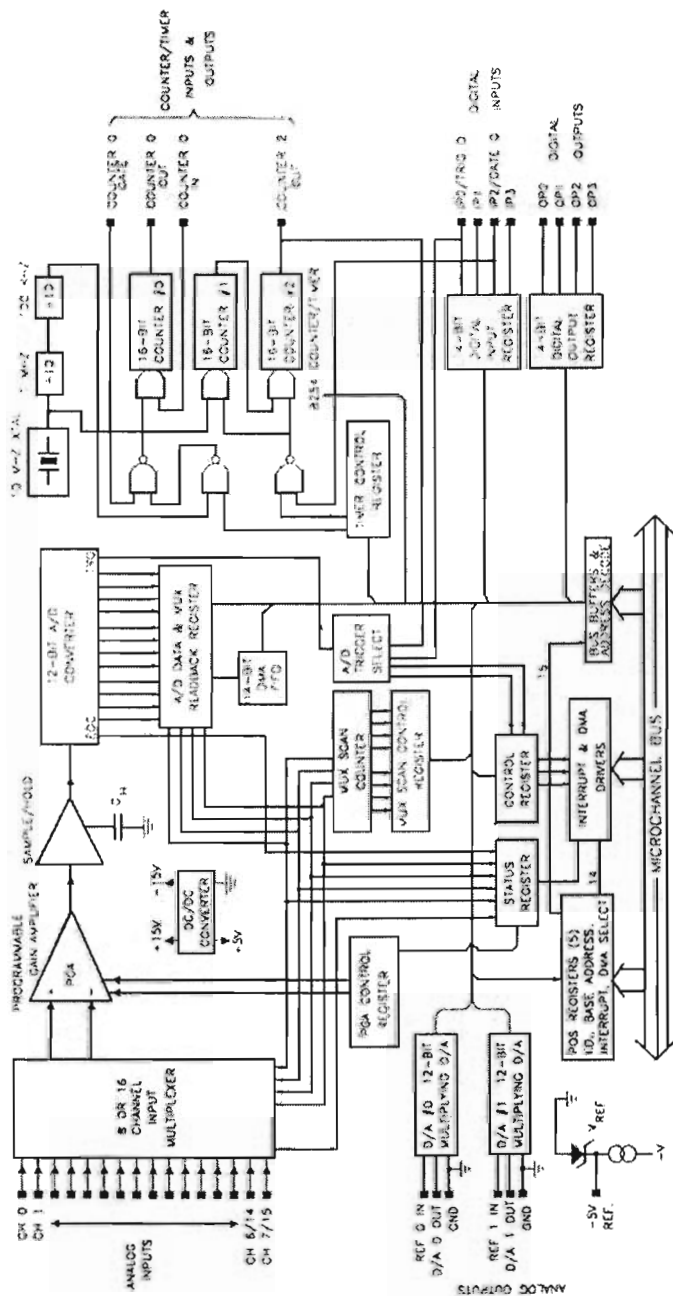


Figura 3.3 . Diagrama de bloques de la tarjeta µCDAS-

Sobre los registros de la tarjeta, todos ellos se operan mediante *bytes* de 8 *bits* (sistema operativo DOS), a partir de una dirección base que desde la instalación fue fijada en &H300 (300 Hexadecimal), que corresponde a la 768 decimal. Existe la opción de cambiar la dirección base de operación. El rango de direccionamiento de entrada y salida (I/O) de toda la tarjeta, se muestra en la tabla 3.1. <sup>[7]</sup>

Como ejemplo de la configuración y el manejo de los registros anteriores, se describe a continuación la operación de los convertidores D/A, que fue el caso de mayor dificultad con respecto a los demás. También cabe mencionar que dicha conversión fue muy relevante en este trabajo, ya que con ella se controló la fuente de alto voltaje del MEXILIT II<sup>+</sup>.

LOCALIZACIÓN	FUNCIÓN	TIPO
Dirección base + 0	byte bajo	R
	Inicio	W
Dirección base + 1	byte alto	R
Dirección base + 2	Análisis de control de multiplexeo	R/W
Dirección base + 3	I/O Digital, nybble de salida	W
	I/O Digital, nybble de entrada	R
Dirección base + 4	D/A 0 byte bajo	W
	Estado del DMA y nivel de arbitraje	R
Dirección base + 5	D/A 0 byte alto	W
	Lectura del nivel de interrupción	R
Dirección base + 6	D/A 1 byte bajo	W
Dirección base + 7	D/A 1 byte alto	W
Dirección base + 8	Estado de la tarjeta	R
Dirección base + 9	Control de la tarjeta	R/W
Dirección base + 10	Contador disponible (2 bits)	R/W
Dirección base + 11	Ganancia programable	R/W
Dirección base + 12	Contador 0	R/W
Dirección base + 13	Contador 1	R/W
Dirección base + 14	Contador 2	R/W
Dirección base + 15	Control del contador	W

**Tabla 3.1 La tarjeta  $\mu$ CDAS-16G utiliza 16 direcciones base consecutivas en las I/O de la PC (R=lectura, W=escritura).**

### 3.3 La conversión digital-analógica (D/A)

Los canales de conversión D/A están formados por dos convertidores de multiplicación D/A de 12 *bits*, separados con doble aislamiento. Cada D/A puede ser utilizado con un voltaje de referencia fijo de -5 Vcd, -disponible en el puerto de la tarjeta-, con una salida convencional D/A de 0 a +5 Vcd. Esta forma de operación fue la usada en este trabajo.

Alternativamente, los D/A pueden ser manejados con una variable, con CA, o con otra señal de referencia como multiplicador. La salida es el producto de la referencia y las entradas digitales. La precisión se mantiene a 12 *bits* hasta 1 KHz. La máxima salida de operación de los D/A puede llegar a  $\pm 10$  V, pero con menor resolución que de 0 a 5 Vcd. El diagrama simplificado de cada D/A se muestra en la figura 3.4.

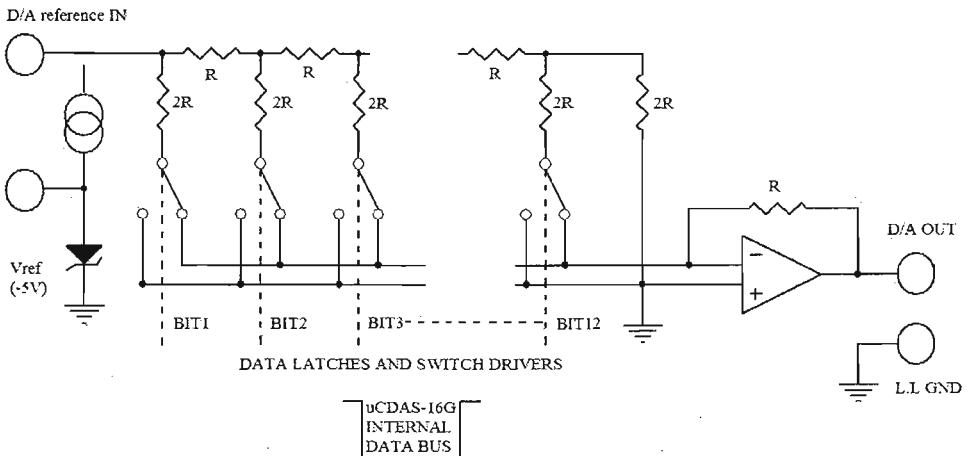


Figura 3.4. Configuración y conexiones de los convertidores D/A

Como los datos a convertir son de 12 *bits*, estos deben ser escritos para cada D/A en 2 *bytes* consecutivos. El primer *byte* es el menos significativo (lsb) y contiene los 4 bits menos significativos de esos 12 *bits*. El segundo *byte* es el más significativo (msb) y contiene los ocho bits más significativos. El *byte* menos significativo deberá ser escrito primero y almacenado en un registro inmediato dentro del D/A, sin tener ningún efecto a la salida. Cuando se escribe el *byte* más significativo, se añade su información a los datos menos significativos ya almacenados y presentados al convertidor D/A asegurando así una actualización de un sólo paso. Este proceso es conocido como “doble aislamiento” (“*double buffering*”). El registro de localizaciones y formato de la información es el siguiente:

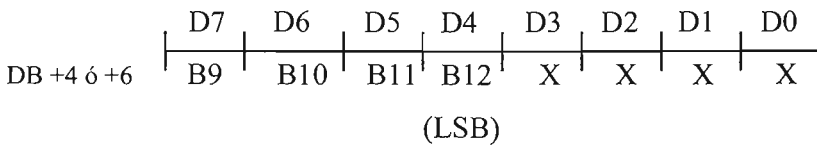
Dirección base +4 D/A # 0 byte bajo

Dirección base +5 D/A # 0 byte alto

Dirección base +6 D/A # 1 byte bajo

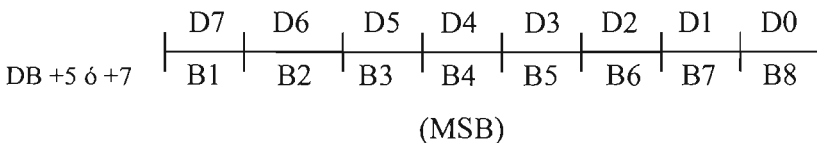
Dirección base +7 D/A # 1 byte alto

*Byte bajo:*



X = irrelevante

*Byte alto:*



Para operaciones con 8 *bits*, primero se escribe un cero en el *byte* bajo; todas las operaciones subsecuentes pueden realizarse con el *byte* alto.

Con base en lo anterior, uno de los programas elaborados inicialmente, como parte del programa general de operación y control del MEXILIT II<sup>+</sup>, es el que se describe a continuación por su importancia en el manejo remoto de la fuente de alto voltaje del generador de ondas de choque.

### **3.4 Programa de operación de la fuente de alto voltaje**

Este programa -cuyo listado en código fuente se incluye en el Apéndice A-, ilustra la forma en que un dato de voltaje V solicitado entre 0 y 30 kV, es transformado a los bytes necesarios al registro de salida del convertidor D/A.

La salida del voltaje analógico así obtenido (dentro del intervalo de 0 a 5 Vcd), es en la terminal 9 del puerto de la tarjeta con respecto al común (LL GND). En la figura 3.5 se muestra la distribución de terminales de dicho puerto.

LL GND	19	37	Ch0 HI IN
Ch0 LO IN / Ch8 HI IN	18	36	Ch1 HI IN
Ch1 LO IN / Ch9 HI IN	17	35	Ch2 HI IN
Ch2 LO IN / Ch10 HI IN	16	34	Ch3 HI IN
Ch3 LO IN / Ch11 HI IN	15	33	Ch4 HI IN
Ch4 LO IN / Ch12 HI IN	14	32	Ch5 HI IN
Ch5 LO IN / Ch13 HI IN	13	31	Ch6 HI IN
Ch6 LO IN / Ch14 HI IN	12	30	Ch7 HI IN
Ch7 LO IN / Ch15 HI IN	11	29	LL GND
D/A 0 REF IN	10	28	LL GND
D/A 0 OUT	9	27	D/A 1 OUT
VREF (-5V)	8	26	D/A REF IN
POWER GND	7	25	IP0 / TRIG 0
IP1	6	24	IP2 / CTR 0 GATE
IP3	5	23	OP0
OP1	4	22	OP2
OP3	3	21	CTR 0 CLOCK IN
CTR0 OUT	2	20	CTR 2 OUT
+5V PWR	1		

Figura 3.5. Entradas y salidas del conector DB-37 y señales de conexión

## CAPITULO 4

### DESARROLLO DE LA INSTRUMENTACIÓN Y PROGRAMACIÓN

Para llevar a cabo el control de las señales de interés en el MEXILIT II<sup>+</sup> por medio de la PC (sección 2.4), se desarrollaron y acoplaron al módulo de controles varios circuitos que mediante el intercambio de señales eléctricas con la tarjeta  $\mu$ CDAS-16G, llevan a cabo las funciones que en un principio se realizaban manualmente.

#### 4.1 Criterios de diseño de la instrumentación

En lo referente a abrir o cerrar interruptores, se conectaron en paralelo a los mismos, relevadores u optotriacs con características similares, los cuales pueden ser accionados mediante pulsos TTL suministrados por las salidas digitales de la tarjeta. Para el control del alto voltaje, que manualmente se hace mediante el giro de un potenciómetro, se utilizó la conversión D/A de dicha tarjeta. De manera similar para las señales a capturar se usaron las entradas de la tarjeta y los convertidores A/D.

En general, dichas señales de interés se pueden resumir en dos clases: las digitales (D) y las analógicas (A); y a su vez cada una de éstas en los tipos de entrada (I) o de salida (O) con respecto a la tarjeta  $\mu$ CDAS-16G. Obviamente toda señal de salida de la tarjeta ya sea digital o analógica, es de entrada para el módulo de controles y lo equivalente para las de entrada que corresponden a salidas de dicho módulo.



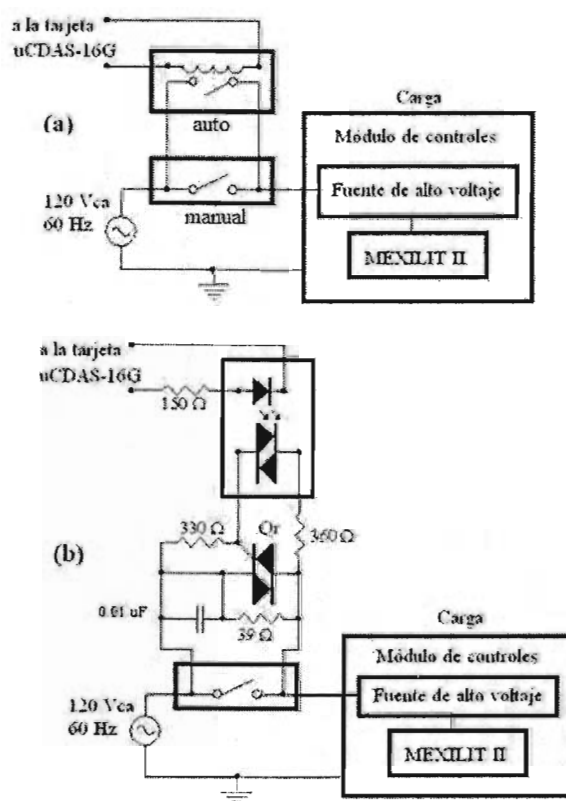
A continuación se describen brevemente los circuitos usados para las necesidades de operación mencionadas en la sección 2.4, según la instrumentación a controlar en el MEXILIT II<sup>+</sup>. Posteriormente se detallan cada uno de los pasos de automatización, en el mismo orden de dicha sección.

Para el accionamiento de interruptores, ya sea de suministro de energía eléctrica de línea (120 Vac, 60 Hz), o de conmutación de señales internas necesarias al cambio de operación de equipos a modo automático, que involucran el uso de interruptores de 1 polo-1 tiro o 2 polos-1 tiro, etc.; se usan señales digitales de salida (D-O), mediante circuitos que por seguridad garantizan aislamiento eléctrico entre el punto de salida de la tarjeta y el módulo de controles del MEXILIT II<sup>+</sup>. Se probaron tanto relevadores como acopladores ópticos (LED-fototriac), según se ilustra en la figura 4.1 de forma elemental y para el caso básico de interruptores de 1 polo-1 tiro como el del energizado de la fuente de alto voltaje.

En el caso de relevadores para suministro de voltaje de línea o conmutación de señales internas (figura 4.1-a), éstos se escogieron con bobina de 5 Vcd y platinos de contacto con capacidad de soportar 120 Vrms y hasta una corriente de 1 A. Para ampliar la disponibilidad de manejo de corriente, pueden usarse dos relevadores en cascada, además de poder escoger mayor número de polos y hasta dos tiros que cubren sobradamente las necesidades planteadas.

En el uso de acopladores ópticos como alternativa para manejar el voltaje de línea (figura 4.1-b), el triac de relevo  $Q_r$  se escoge según la

necesidad de cada caso. Para ampliar el circuito a mayor número de polos, simplemente se repite el circuito tantas veces como sea necesario.



**Figura 4.1 Activación de la fuente de alto voltaje. (a) mediante relevador  
(b) mediante optotriac y triac.**

Es importante mencionar que tanto el accionamiento de interruptores por la tarjeta, ya sea mediante relevadores u optotriacs, puede ser de dos formas. Una de ellas requiere de una señal de 5 Vcd que se mantenga estable durante el tiempo de operación del equipo; en cambio, señales como la de activación del alto voltaje, tienen que ser momentáneas. El que las señales

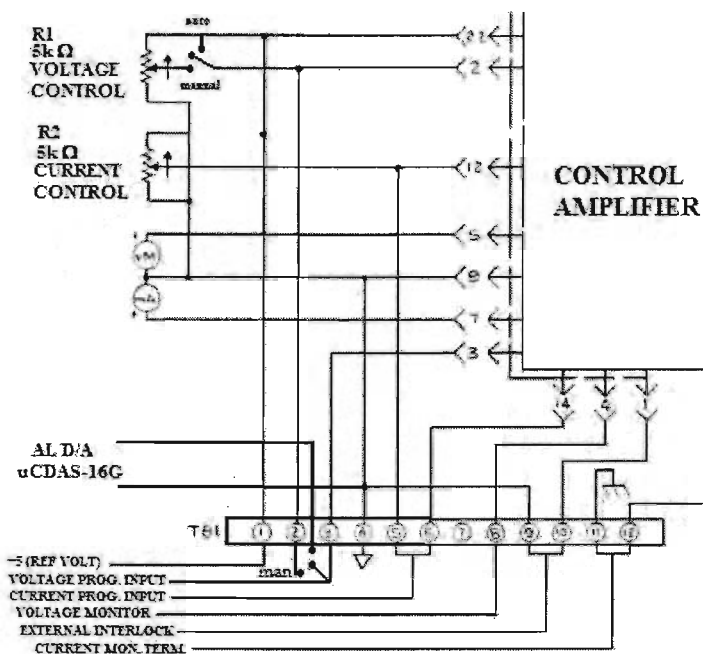
tengan que ser estables o momentáneas no fue problema alguno ya que éstas se controlaron ya sea por “*software*”, o bien mediante circuitos acoplados al MEXILIT II<sup>+</sup>, según se verá adelante.

Para controlar el nivel de alto voltaje en la fuente (*GAMMA HVR RR30-20R*, *Gamma High Voltage Research Inc.*) se aprovechó su diseño de fábrica que permite operarla remotamente mediante un potenciómetro externo de 10 k $\Omega$  que se conecta según el procedimiento siguiente con relación a la figura 4.2. [5]

1. Ajustar el voltaje desde el panel de control al máximo voltaje de salida.
2. Quitar el puente (“*jumper*”) que se encuentra entre las terminales 2 y 3 del conector TB1 (parte posterior de la fuente).
3. Conectar el potenciómetro de 10 k $\Omega$  entre las terminales 1, 3 y 4 del conector TB1.

Nótese que lo anterior involucra el desconectar (modo remoto) o conectar (modo manual) un “*jumper*”; y en modo remoto, el potenciómetro externo es un divisor de voltaje variable de 0 a 5 Vcd; es decir, el control remoto del alto voltaje de salida, entre 0 y 30 kV, finalmente es mediante un voltaje proporcional de cd, entre 0 y 5 Vcd, aplicado en la terminal 3 del conector TB1.

En dicha terminal se usa una de las dos señales analógicas de salida de la tarjeta, además de otra señal, generada por instrumentación para desconectar el “*jumper*” mencionado (modo remoto) y dejarlo conectado en modo manual.



**Figura 4.2** Diagrama de conexiones para control remoto de voltaje y corriente en la fuente *GAMMA HVR RR30-20R*

Como ya se mencionó, la tarjeta tiene cuatro canales o salidas digitales, las cuales están configuradas en un puerto de 4 bits. Aún cuando comparten la misma dirección (dirección base +3: H303) con las cuatro entradas digitales, también de cuatro bits, son independientes entre sí; esto quiere decir que la información escrita en el puerto de salida no la puede leer el puerto de entrada a menos que sean interconectados externamente.

Para activar o desactivar las salidas digitales de la tarjeta (OP0-OP3), se utiliza la tabla de verdad formada por la combinación de los cuatro bits con los que trabaja el puerto de salida (ver tabla 4.1), teniendo así 16 posibles combinaciones en donde los códigos en decimal 1, 2, 4 y 8 activan cada una

de las cuatro salidas digitales de la tarjeta (OP0-OP3, una a la vez); y en las doce combinaciones restantes se activan o desactivan 2, 3 o hasta las 4 salidas al mismo tiempo. Obviamente, la combinación 0000 desactiva todas las señales.

	OP3	OP2	OP1	OP0
0	0	0	0	0
1	0	0	0	1
2	0	0	1	0
3	0	0	1	1
4	0	1	0	0
5	0	1	0	1
6	0	1	1	0
7	0	1	1	1
8	1	0	0	0
9	1	0	0	1
10	1	0	1	0
11	1	0	1	1
12	1	1	0	0
13	1	1	0	1
14	1	1	1	0
15	1	1	1	1

**Tabla 4.1 Tabla de verdad para la activación de las salidas digitales de la tarjeta  $\mu$ CDAS-16G**

## 4.2 Instrumentación de arranque

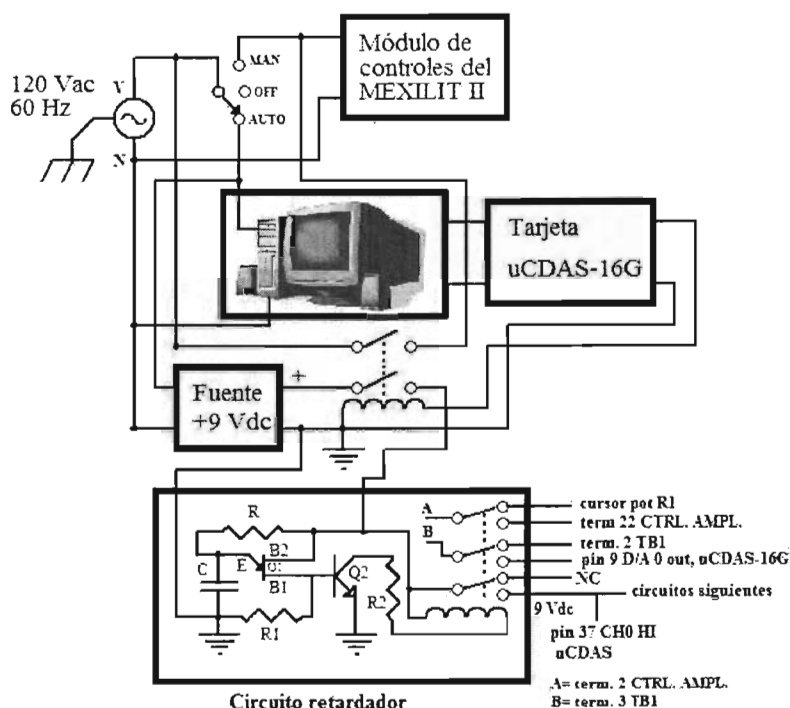
De lo anterior y lo contemplado en la secuencia de automatización descrita en la sección 2.4, aparentemente se tiene el inconveniente de requerir más señales digitales (D-O) que las cuatro disponibles en la tarjeta. Esto, no fue problema alguno, ya que al tomar en cuenta la seguridad de operación del equipo, se tuvo que incluir un único interruptor manual que de inicio permitiera escoger los estados de operación automática ó manual, además del estado de apagado.

Se aprovechó la posición de operación automática para alimentar inicialmente con el voltaje de línea (120 Vac, 60 Hz) al equipo de cómputo y a una fuente de 9 Vd., de tal forma que al prender la computadora y tener 5 Vd. en la terminal 1 del puerto de salida de la tarjeta, éstos activan un relevador de 2 polos-1 tiro que energiza al módulo de controles y suministra 9 Vd. a un circuito de retardo que a su vez, después de  $n$  segundos, activa un relevador de 3 polos-2 tiros que prepara a la fuente de alto voltaje para operación remota según lo descrito en relación a la figura 4.2 anterior; es decir, se efectúa el cambio del “*jumper*” de la fuente de alto voltaje, y se releva el control manual del alto voltaje al máximo; y se dirige el control del mismo al puerto del convertidor D/A de la tarjeta (ver figura 4.3).

Nótese que el circuito retardador también proporciona una salida de 9 Vd. cuando éste ya operó. Este voltaje tiene dos propósitos:

- I. Como señal de seguridad para verificar que hasta el momento el módulo de controles y la computadora están encendidos; y la fuente de alto

voltaje está lista para operación remota, aunque no energizada ni activada. Tal señal es dirigida a la terminal 37 de la tarjeta en espera de ser procesada por la programación en ejecución, según se describe en la sección 4.4.



**Figura 4.3 Diagrama del circuito de encendido primario del MEXILIT II<sup>+</sup> para su operación en modo manual o por medio de la computadora.**

II. Como voltaje de alimentación a los circuitos que se describen en la sección siguiente (instrumentación de operación).

Cabe mencionar que el circuito retardador mostrado en la figura 3.3, es básicamente un circuito RC seguido por un transistor monojuntura 2N2646,

para que una vez transcurrido el tiempo  $\tau = RC$  ocurra la conmutación abrupta del relevador mediante el transistor bipolar BC337 que soporta la bobina de éste como carga de colector.

El diseño de este circuito se hizo en base a los criterios siguientes:

- i) El umbral para el voltaje de conducción ( $V_p$ ) del transistor monojuntura está dado por la expresión  $V_p = \eta V_{B2B1} + V_F$ , donde  $V_{B2B1}$  es el voltaje entre bases ( $\approx 9$  Vd. en este caso),  $\eta = 0.6$  el factor de proporcionalidad y  $V_F = 0.5$  V el voltaje de la unión emisor-base<sub>1</sub>. Con dichos datos,  $V_p \approx 6$  V.
- ii) La corriente mínima de emisor-base<sub>1</sub> ( $I_e$ ) para evitar inestabilidad en el circuito (oscilación) deber ser de 6 mA, la cual está limitada por la resistencia  $R$ ; por lo que se escogió esta última de 1 k $\Omega$  para tener disponibilidad de hasta 9 mA.
- iii) Mientras el capacitor  $C$  no alcance el voltaje de conducción  $V_p$  del transistor monojuntura, la parte  $RC$  se encuentra aislada del resto del circuito y el voltaje de carga en el capacitor está expresado por  $V_c(t) = V_{BB}(1 - e^{-t/RC})$ , donde  $V_{BB} = 9$  Vd. en este caso. Tomando en cuenta que la conmutación ocurre a los 6 V, el tiempo de retardo está dado por  $T = RC \ln(3) \approx RC$ , con  $R = 1$  k $\Omega$ ; por lo que  $n$  segundos de retardo corresponden a  $C$  milifarads de capacidad. Se utilizó  $C = 4.7$  mF = 4700  $\mu$ F para tener 4.7 s de retardo.



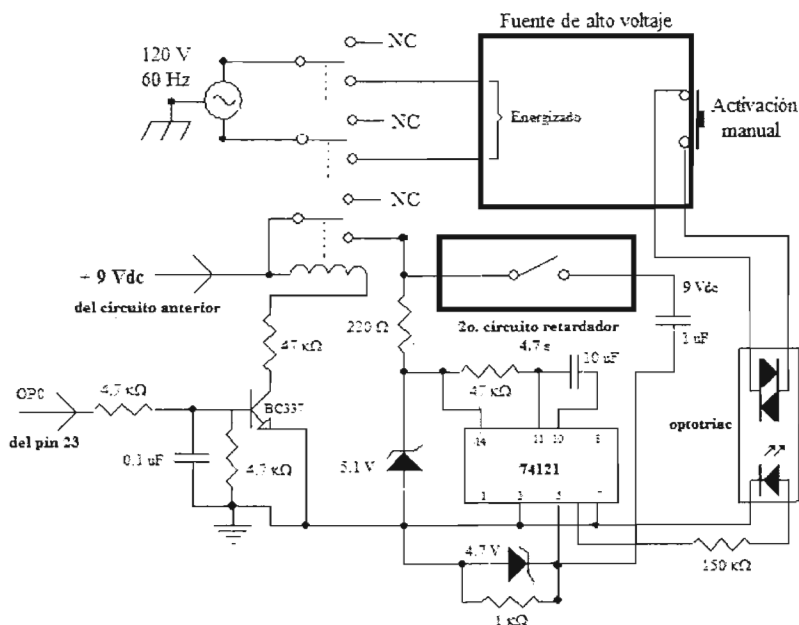
### 4.3 Instrumentación de operación

Con la computadora encendida y el programa dedicado a la operación y control del MEXILIT II<sup>+</sup> ejecutándose, éste último ha puesto en cero todos los registros de entrada y salida de la tarjeta y verificando que la señal de confirmación de operación remota de la fuente de alto voltaje está presente (9 Vd. en la terminal 37 del puerto de la tarjeta, CH0 HI). En su defecto, se emite un mensaje de error indicando revisar la instrumentación en las etapas descritas.

Normalmente, la ejecución del programa continúa sin interrupción, por lo que de forma automática se emite la primera señal digital (D-O) en la terminal 23 del puerto de la tarjeta (OP0), destinada a energizar y activar la fuente de alto voltaje.

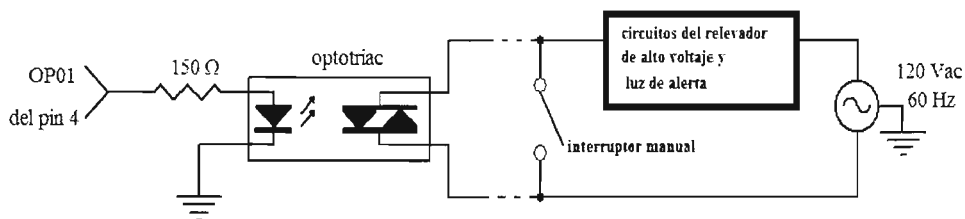
Para efectos de lo anterior, también se incluyó otro circuito (mostrado en la figura 4.4) cuyas funciones son el alimentar con 120 Vrms dicha fuente de alto voltaje, generar un retardo similar al de la sección anterior (con el mismo tipo de circuito) y emitir un solo pulso para activar la salida del alto voltaje con magnitud de 0 V.

En la figura 4.4 se puede ver que la etapa encargada de generar el pulso de activación es mediante un circuito integrado 74121 configurado como multivibrador monoestable no redispensible, con ciclo de trabajo de 330 ms. La salida de éste alimenta a un optotriac, según lo descrito en la sección 4.1.



**Figura 4.4 Energizado de la fuente de alto voltaje, retardo de 4.7 s y activación de la salida de alto voltaje**

Una vez activada la salida de alto voltaje, el programa hace que se emita la segunda señal digital en la terminal 4 del puerto de la tarjeta (OP1), para que se active el relevador de alto voltaje que dirige la salida de la fuente de alto voltaje al banco de condensadores que almacenarán la energía necesaria para generar las ondas de choque. Cuando dicho relevador es activado, mediante el circuito mostrado en la figura 4.5, el indicador luminoso de seguridad prende intermitentemente como se describió en la sección 2.3.2.



**Figura 4.5 Circuito de activación para el relevador de alto voltaje mediante optotriac**

Finalizado lo anterior, es capturada una información de confirmación en la terminal 36 del puerto de la tarjeta (CH1 HI), que de no ocurrir emite otro mensaje de error indicando revisar la instrumentación de la etapa anterior. Normalmente, el programa solicita al usuario el dato de la magnitud de alto voltaje a utilizar, entrando en pausa hasta recibir tal información.

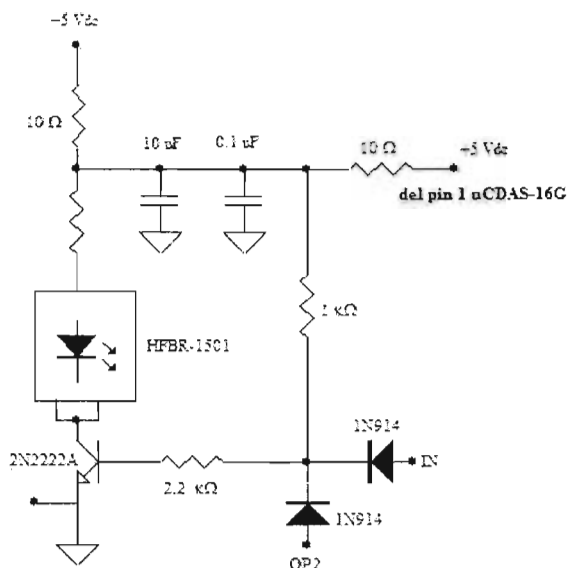
Cuando dicho dato es introducido por teclado, el convertidor D/A de la tarjeta proporciona dicho voltaje analógico correspondiente en la terminal 9 del puerto de la tarjeta (D/A #0 OUT), que de acuerdo a lo descrito en la sección 4.1 (figura 4.2), llega a la terminal 3 del conector TB1 de la fuente de alto voltaje y establece en esta la magnitud del voltaje de salida requerida (entre 18 y 30 kV). En este momento la ejecución del programa vuelve a entrar en pausa, advirtiendo que están por generarse las ondas de choque y preguntando si se realizarán las descargas, ya sea en modo singular (una vez cada que se oprima una tecla), o de modo secuencial; en esta última se solicitan el número de descargas a efectuar y su frecuencia.

Para la generación secuencial de las descargas, se utilizó la tercera salida digital, de la terminal 22 del puerto de la tarjeta (OP2), para producir conjuntos de pulsos mediante retardos en el programa que permitieron escoger

un ciclo de trabajo fijo de 50 ms, con periodos de descanso entre 950 y 4950 ms, según la frecuencia de las descargas a efectuar. Cabe mencionar que al activar y desactivar tal salida digital (OP2), las anteriormente usadas (OP0 y OP1) se mantienen en el último estado en el que estaban.

La conexión de la terminal 22 (OP2) fue prácticamente directa al transmisor de fibra óptica del oscilador del módulo de controles (PG-12A *Oscillator Impulse Engineering Inc.*), ya que sólo se le agregaron a éste una resistencia de 10  $\Omega$  para recibir la alimentación de 5 Vd. del puerto de la tarjeta y dos diodos 1N914 como compuerta “OR” para la señal de los circuitos internos del oscilador o la proveniente de la tarjeta, como se ve en la figura 4.6

Toda la operación automatizada del MEXILIT II<sup>+</sup> ya no requirió más instrumentación. Se contempló que al finalizar el número de descargas establecido puede optarse por apagar el equipo ó cambiar de blanco a bombardear, para lo cual hay que reducir el alto voltaje a cero y desactivar el relevador de seguridad, etc.; pero tales secuencias son propiamente de la programación que se describe en la siguiente sección.



**Figura 4.6 Modificaciones al transmisor de fibra óptica del oscilador del módulo de controles.**

## 4.4 Desarrollo de la programación

De acuerdo a lo descrito en la sección 2.3.2 y siguiendo el orden de lo mencionado en las secciones 4.2 y 4.3, en el apéndice B se muestra el diagrama de flujo usado para la programación desarrollada.

No se incluye el listado en código fuente (QBASIC) del programa general que surgió del diagrama de flujo anterior, por la extensión que ocupa en forma impresa. Se consideró más adecuado anexarlo a la bitácora del generador de ondas de choque MEXILIT II<sup>+</sup>, tanto en forma impresa como magnética, al igual que el archivo ejecutable (Mxlt-II.exe) que se obtuvo del mismo.

## CAPÍTULO 5

### EVALUACION Y RESULTADOS

Ya concluida la automatización descrita, se evaluó inicialmente el funcionamiento del sistema, verificando simplemente que su operación automatizada no presentara diferencias ostensibles con respecto a su operación manual. Los resultados obtenidos y las correcciones efectuadas se describen en la sección 5.1.

Posteriormente, para efectos de comparación, se evaluó cuantitativamente la eficiencia de fragmentación de las ondas de choque, generadas por la operación del sistema tanto en modo manual como automatizado, mediante un experimento de fractura de modelos artificiales de cálculos renales tipo HMT (*High Medical Technologies*, Kreuzlingen, Suiza) de forma esférica, para lo cual se siguió el protocolo que se describe en la sección 5.2.

#### 5.1 Evaluación inicial del sistema

Para esta parte, sólo se llenó la tina de pruebas con agua de la red doméstica a una altura de 20 cm sobre el borde del reflector, sin colocar modelo alguno para fracturar, ya que sólo se realizó una evaluación cualitativa. Se establecieron como parámetros: 400 descargas a 21 kV, utilizando el reflector E4, según lo descrito en el capítulo 2.

La primera parte de esta evaluación se realizó en modo manual, para comprobar que el sistema no hubiera sufrido alteración alguna con respecto a su estado anterior al desarrollo de este trabajo. El MEXILIT II<sup>+</sup> funcionó sin problemas, como lo hacía originalmente.

Posteriormente, como segunda fase, el sistema fue operado ya en modo automatizado, bajo los mismos parámetros establecidos para el modo manual. Se observaron los sucesos siguientes.

El arranque no tuvo problema alguno, pero al momento de iniciar las descargas; a saber, en la cuarta onda de choque generada en modo secuencial, el sistema se volvió inestable; particularmente la fuente de alto voltaje empezó a fallar, proporcionando valores fuera de control, además de alteraciones en el conteo de las descargas en pantalla así como variaciones en la frecuencia de las descargas. El sistema fue apagado antes de la décima descarga.

Después de verificar que los circuitos que forman la instrumentación agregada funcionaran correctamente, -en ausencia de descargas-, se llegó a la conclusión de que tal inestabilidad fue producida por la inducción del pulso electromagnético que ocurre por la descarga abrupta de los condensadores a través de la bujía emisora de cada onda de choque. Esto es, cada onda de choque mecánica también va acompañada de un frente de choque electromagnético, que se inducía en el cable listón de comunicación del puerto de la tarjeta con el módulo de controles del MEXILIT II<sup>+</sup>, afectando ambas partes de manera caótica.

Esto se corrigió mejorando todo el blindaje de la instrumentación desarrollada, su cableado y principalmente el mencionado cable listón de comunicación. Lo anterior se hizo metiendo el cable en un ducto metálico conectado a tierra física.

Posteriormente se volvió a arrancar el sistema en modo automático y se pudo llevar a cabo en su totalidad la segunda parte de la evaluación cualitativa, sin observar problemas; con lo que quedó demostrado que el sistema automatizado funciona de acuerdo a lo planeado.

## **5.2 Evaluación de la eficiencia de fragmentación**

Para esta prueba, el protocolo experimental consistió básicamente en la preparación de los modelos a fracturar, su bombardeo y el análisis de los fragmentos, según se describe a continuación.

La preparación de los modelos consistió en registrar su peso en seco usando una balanza analítica con resolución de  $10^{-4}$  gr (*SARTORIUS mod. 2842*). El peso del modelo número 1 fue de 1.5680 gr. y el del modelo número 2 fue de 1.5710 gr. Posteriormente, los modelos fueron hidratados durante 7 días, sumergiéndolos en un frasco de vidrio con agua destilada. Ambos modelos se encapsularon en “dedos de guante” de látex con agua, para evitar pérdida de fragmentos.

Se suministró agua de la red doméstica a la tina de pruebas hasta un nivel de 5 cm por encima del plano focal. El bombardeo de 400 ondas de



choque a 21 kV, se efectuó primero en modo manual utilizando el modelo 1 colocado en el segundo foco  $F_2$  del reflector. Al término de las descargas preestablecidas se apagó el alto voltaje y se retiró el “dedo de látex” con los fragmentos del modelo. Después se colocó el segundo modelo en la misma posición de  $F_2$  y se repitió el procedimiento pero ahora en modo automatizado con descargas secuenciales. Finalmente, se retiró el “dedo de látex” con los fragmentos del segundo modelo y se apagó el sistema.

Para conocer el coeficiente de fragmentación de las ondas de choque aplicadas a cada modelo, se analizaron los fragmentos obtenidos en cada exposición. Para ello, se enjuagaron separadamente los residuos de cada modelo a través de una coladera con orificios de  $1\text{ mm}^2$ , quedando únicamente fragmentos mayores a este tamaño; los cuales se recolectaron totalmente y se metieron a secar en un horno (VWR 1330G) a una temperatura constante de  $50^\circ\text{C}$  durante 4 horas. Al término de este tiempo se dejaron por una hora a temperatura ambiente y se volvieron a pesar en la misma balanza para obtener los respectivos pesos finales (ver tabla 5.1), con los que se calcularon los coeficientes de desintegración correspondientes, mediante la formula siguiente:

$$c_{fr} = \frac{(p_i - p_f)}{p_i} \times 100$$

donde:

$p_i$  = peso inicial del modelo

$p_f$  = peso final del modelo

MODELO	PESO INICIAL (gr)	PESO FINAL (gr)	COEFICIENTE DE FRAGMENTACIÓN (%)
1	1.5680	1.0212	34.872
2	1.5710	0.9736	38.026

**Tabla 5.1 Registro de los modelos utilizados y resultados del coeficiente de fragmentación después de la exposición a ondas de choque**

Con los resultados obtenidos, se verificó que el bombardeo con el sistema automatizado no presentó variaciones significativas en comparación con el modo manual, por lo que se considera confiable.

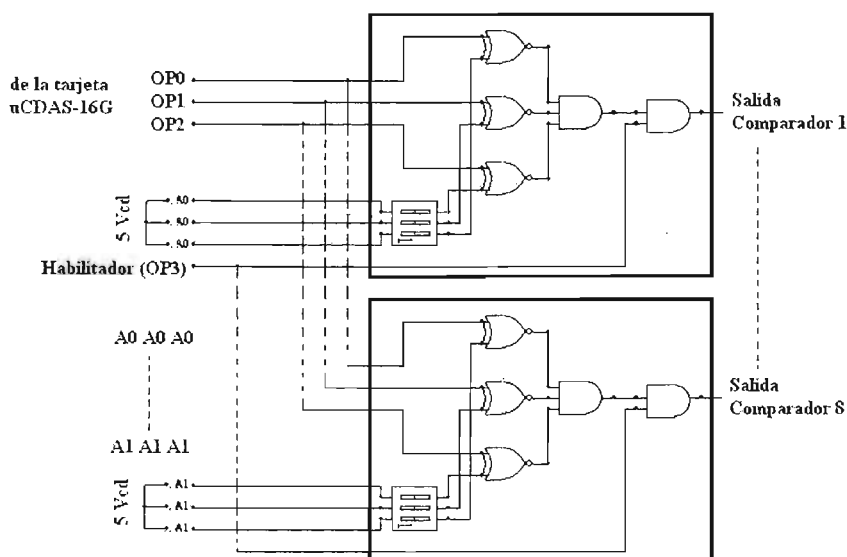
### **5.3 Perspectivas de desarrollo**

Aunque quedó comprobado que el sistema automatizado funciona de acuerdo a lo planeado, todavía es susceptible de futuros cambios o mejoras, como pueden ser la operación y control automatizados del llenado de la tina de pruebas así como su desagüe hacia el tanque elevado o vaciado al drenaje en caso de que el agua se encuentre sucia.

Para poder controlar estas variables adicionales, se requiere de mayor cantidad de señales digitales que las cuatro que proporciona la tarjeta utilizada. Una alternativa es adquirir otra tarjeta con mayor capacidad en este aspecto, con las consecuentes inversiones de materiales y tiempo de adaptación. También es posible realizar una expansión en la tarjeta actual, para lograr ocho salidas digitales a partir de las cuatro que tiene por su diseño. Esto es quizás lo más recomendable a corto y mediano plazo.

Tal expansión se ha contemplado utilizando 3 de los 4 bits disponibles para un “direccionamiento en paralelo” de  $2^3 = 8$  circuitos digitales susceptibles de activarse o desactivarse con el cuarto bit restante. La lógica involucrada puede construirse con compuertas digitales de la familia TTL, de los tipos NOR-EXC y AND; además de DIP-SWITCHES de 3 líneas, según se ilustra en la figura 5.1, donde cada uno de los 8 circuitos digitales es un comparador de dos etapas.

En cada circuito, la primera etapa requiere de 3 compuertas NOR-EXC que comparan bit a bit las tres primeras salidas digitales de la tarjeta (OP0, OP1 y OP2) con una dirección fija y única para cada circuito, establecida manualmente mediante las tres líneas del DIP-SWITCH incluido en cada uno de ellos.



**Figura 5.1 Diagrama del circuito de expansión para las salidas digitales de la tarjeta  $\mu$ CDAS-16G**

Las salidas de las tres compuertas NOR-EXC se dirigen a la compuerta AND de entrada triple, para que la salida de esta última sea afirmativa cuando ocurre la igualdad absoluta de OP0, OP1 y OP2 con la dirección fijada en el DIP-SWITCH. Finalmente, como segunda etapa de comparación, la señal anterior se dirige a la compuerta AND de dos entradas junto con el cuarto bit procedente de la tarjeta (OP3, habilitador), para que la salida final del circuito sea afirmativa si también la línea OP3 se encuentra en 1 lógico.

En resumen, cada uno de los 8 circuitos de expansión contemplados tendrá salida afirmativa sí y sólo sí el direccionamiento (OP0, OP1 y OP2) coincide y el bit habilitador (OP3) es afirmativo.

## CAPÍTULO 6

### CONCLUSIONES

Al terminar el desarrollo de este trabajo, de manera natural surgen conclusiones que se podrían resumir afirmando que se cubrieron satisfactoriamente los objetivos planteados en las secciones 1.4 y 2.4. Esto, si bien es cierto no es específico, ya que cada uno de dichos objetivos no se cubrieron de forma directa y mucho menos de manera inmediata.

Hubo que enfrentar retos de aprendizaje como el abordar temas aparentemente ajenos a la ingeniería mecánica-eléctrica (física de las ondas de choque), pero que se apoyan fuertemente en nuestra área de trabajo. También se presentaron problemas tecnológicos del área como las limitaciones inherentes a equipos y componentes designados (el MEXILIT II<sup>+</sup>, único en su género; el equipo de cómputo de la década pasada, etc.) que hubo que resolver a costa de dedicación y mucha imaginación, basadas en los conocimientos adquiridos en las aulas.

Lejos de lamentar las experiencias vividas, se puede concluir que ha sido una fortuna el haberlas adquirido; ya que, -entre otros-, se generó la obligación de integrar conocimientos para cubrir limitaciones tecnológicas de unos aspectos con las ventajas de otros. Cabe mencionar la desventaja de la cantidad de canales digitales en la tarjeta de adquisición de datos, cubierta con electrónica analógica discreta, además de su perspectiva de expansión digital.

En síntesis, la conclusión general de este trabajo de tesis, es que además de haber cubierto los objetivos tecnológicos programados, se cumplió con la formación de recursos humanos (profesionales en el área de la ingeniería mecánica-eléctrica), objetivo primordial de nuestra Máxima Casa de Estudios.

## APÉNDICE A

### Listado del programa de operación de la fuente de alto voltaje

Inicialmente, por la resolución de 12 bits del convertidor, el dato V real (puede tener cifras decimales) debe escalarse al intervalo de cifras enteras entre 0 y 4095 ( $2^{12} = 4096$ ), lo cual se hace en la línea 90 del programa (ver abajo) con la operación  $D = \text{parte entera de } V(4095/30)$ . El dato así escalado es ahora la variable D% que tiene que separarse en los 2 *bytes* DL% (bajo) y DH% (alto), de acuerdo a las operaciones de la línea 95 del programa.

Nótese que el byte alto se obtiene como la parte entera del cociente  $D\%/16$  para limitar su valor a 255, que es el máximo correspondiente a 8 bits. Para el byte bajo, primero se obtienen los cuatro bits menos significativos del dato escalado y luego “son recorridos” a la parte izquierda del registro (corrimiento de 4 bits).

```
10 COLOR 1, 7
20 CLS: CLEAR: PRINT CHR$(13)
30 PRINT "PARA OBTENER LOS VALORES DE DH Y DL": PRINT CHR$(13)
40 INPUT "DAME EL VALOR INICIAL DE V": PRINT CHR$(13)
50 IF V<= 30 THEN GOTO 90
60 BEEP: FOR K= 1 TO 1000: NEXT K: BEEP
70 PRINT CHR$(13): PRINT "ATENCION!!!! EL VALOR DE V NO DEBE SER
    MAYOR A 30 kV"
80 FOR K = 1 TO 8000: NEXT K: GOTO 20
90 D%= INT (4095 / 30) * V
95 DH% = INT (D% / 16): DL% = D% - 16 * DH%: DL% = 16 * DL%
```

```

100 OUT &H304, DL%: OUT &H305, DH%
105 PRINT CHR$(13): PRINT "EL VOLTAJE SELECCIONADO ES DE:", V;
    "VOLTS"
110 PRINT CHR$(13): PRINT "EL VALOR DE DH ES:", DH%
120 PRINT CHR$(13): PRINT "EL VALOR DE DL ES :", DL%
130 PRINT CHR$(13): PRINT "QUIERES CONVERTIR OTRO DATO? (SI O NO)"
140 C$ = INKEY$: IF C$ = "" GOTO 140
150 IF C$ = "S" OR IF C$ = "s" GOTO 20
160 IF C$ = "N" OR IF C$ = "n" GOTO 180
170 BEEP: GOTO 140
180 PRINT CHR$(13): PRINT CHR$(13)
190 PRINT "HASTA LUEGO"
200 OUT &H304, 0: OUT &H305, 0
205 CLS
210 END

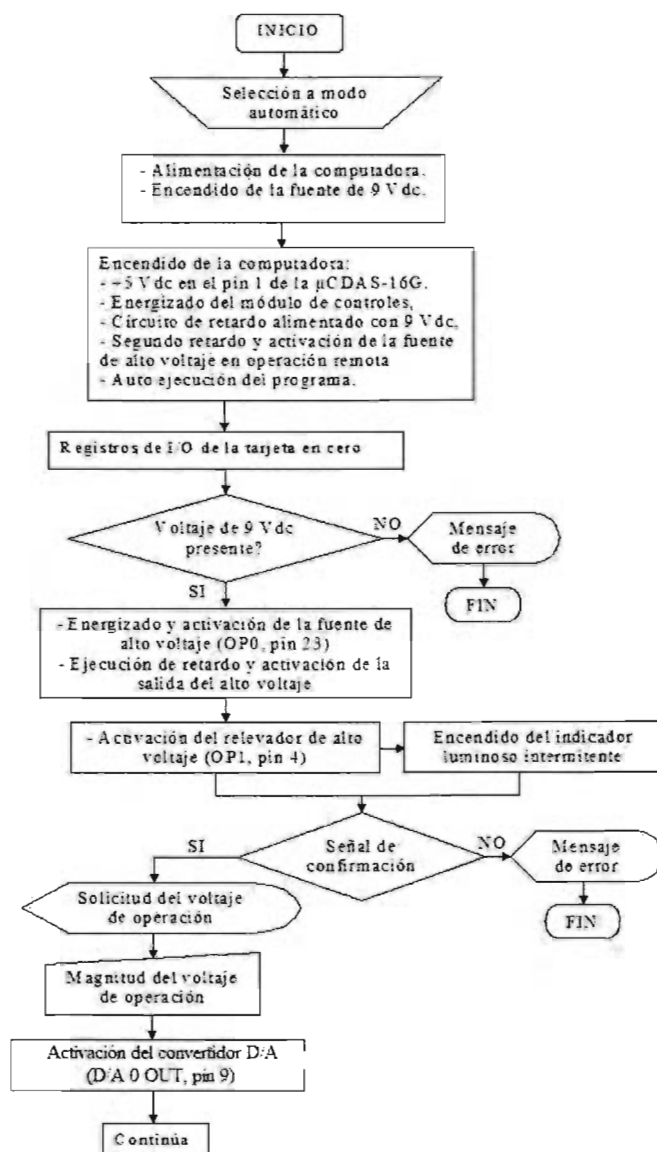
```

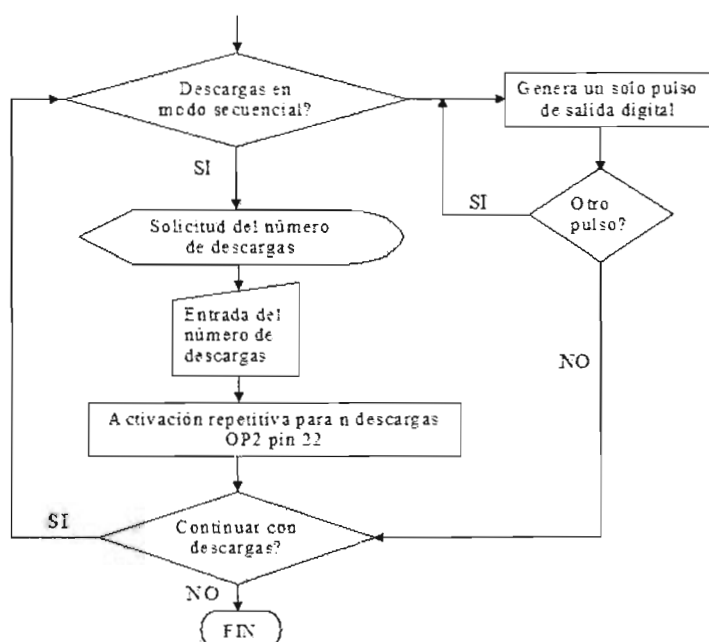
Finalmente, en la línea 100 del programa, se escribe la información en los registros del D/A mediante el comando OUT, teniendo en cuenta que la tarjeta desde su instalación, se configuró en la dirección base &H300; por lo que al primer convertidor D/A (el número 0) le corresponden las direcciones &H304 para el byte bajo (DL%) y &H305 para el byte alto (DH%).



## APÉNDICE B

Diagrama de flujo de la programación desarrollada para la operación y control automatizados del generador de ondas de choque MEXILIT II<sup>+</sup>





## BIBLIOGRAFÍA

1. Cúpich, M., Elizondo, F., *Actuadores Piezoeléctricos*, Ingenierías, Revista de la Facultad de Ingeniería Mecánica Eléctrica UANL, Vol. 3, No. 6, Enero-Marzo 2000.
2. de Icaza, M., Renero, C., Prieto, F. E., *Influence of the propellant flow on the performance of diaphragm operated gas guns*, Rev. Sci. Instrum., 62, pp. 431, (1991).
3. Fernández, F., Loske, A. M., van Cauwelaert, J., Prieto, F. E., *Sistema electrónico para mejorar la eficiencia de litotriptores extracorporales piezoeléctricos*, In extenso, XVI Congreso de Instrumentación, Sociedad Mexicana de Instrumentación; Qro., México 2001. MAT 1-1.
4. García-Colín, L., Mendoza, A., Sandoval, A., Santillán, A., Soto, G., Camacho, C., Dehonor, M., *Ondas Mecánicas*, Notas para el curso de Física Universitaria, Universidad Iberoamericana, Cap. 1, pp. 79-86, México 2001.
5. Gamma High Voltaje Research Inc, High Voltage Power Supply GAMMA HVR RR30-20R, Instruction manual.
6. Jiménez O., *Microcomputadora Personal Dedicada a un Acelerador de Electrones Van Der Graaff de 2 MeV.*, Tesis de licenciatura, Facultad de Ingeniería, UNAM, 2000. Director: Francisco Fernández E.
7. Keithley MetraByte / ASYST / DAC, *User Guide for the  $\mu$ CDAS-16G*, Keithley MetraByte Corporation.

8. Kolzer, J. F., García, R., *Estudio comparativo de generadores de onda de choque de litotriptores comerciales*, II Congreso Latinoamericano de La Habana, Sociedad Española de Electromedicina e Ingeniería Clínica, La Habana, Cuba. 2001.
9. Lauterborn, W., Ohl, C.D. *Cavitation bubble dynamics*. Ultrasonics Sonochemistry 4 (1997), pp. 65-75.
10. Lokhandwalla, M., Bradford, S., *Fracture mechanics models of stone comminution in ESWL and implications for tissue damage*, Phys. Med. Biol. 45 (2000), pp. 1923-1940.
11. Loske, A. M., *Generación de ondas de choque débiles en agua por rompimiento eléctrico*, Tesis de Maestría, Facultad de Ciencias, UNAM, 1990. Director: Fernando E. Prieto C.
12. Loske, A. M., *Interacción de Ondas de Choque Débiles en Agua con la Materia: Diseño de Electrodo y Reflectores Novedosos para Litotriptores Electrohidráulicos*, Tesis de Doctorado, Instituto de Física, UNAM, 1994. Director: Fernando E. Prieto C.
13. Loske, A. M., *Applications of Shock Waves in Medicine*, Handbook of Shock Waves, Vol. 2, Academic Press 2001, ISBN 0-12-086432-2.
14. Loske, A. M., Hernández, C., Armenta, E., Prieto, F. E., *Shock wave potencial as a food preservation Method*, TIP Revista Especializada en ciencias Químico-Biológicas 3(1) pp. 23-30, 2000.

15. Loske, A. M., Prieto, F. E., *The influence of electrode shape on the performance of electrohydraulic lithotripters*, Journal of Stone Disease, Vol. 5, No. 4, 1993.
16. Loske, A. M., Prieto, F. E., *Improving Underwater Shockwave Focusing Efficiency*, Urolithiasis, Miller Printer, Inc., 1996.
17. Loske, A. M., Prieto, F. E., *Fundamentos Técnicos de Litotripsia Extracorporeal*, JGH Editores, México 1999, ISBN 970-681-001-3.
18. Loske, A. M., Prieto, F. E., *Dual phase reflectors for extracorporeal shock wave in lithotripsy*, Física Médica: European Journal of Medical Physics, 2001.
19. Loske, A. M., Prieto F. E., Zavala M. L., Santana A. D., Armenta E., *Repeated application of shock waves as a possible method for food preservation*, Shock Waves (1999), vol.9, pp. 49-55.
20. Loske, A. M., Prieto, F. E., Fernández, F., van Cauwelaert, J., *Tandem shock wave cavitation enhancement for extracorporeal lithotripsy*, Phys. Med. Biol. 2002: 47, pp. 3945-3957.
21. Loske, A. M., Prieto, F. E., Méndez, A., *Generador de Ondas de Choque Experimental*, Primer Congreso Latinoamericano de Ingeniería Biomédica, Memorias publicadas por la Revista Mexicana de Ingeniería Biomédica, pp. 54-57, Noviembre 1998.
22. Prieto, F. E., Loske, A. M., Hernández, C., Armenta, E., *Inactivation of undesired bacteria in food using weak shock waves*, 22<sup>nd</sup> International

- Symposium on Shock Waves, Imperial College, London, UK, Julio 18-23, 1999.
23. Prieto, F. E., Loske, A. M., Yarger, F., *An Underwater Shockwave Research Device*, Rev. Sci. Instrum. 62 (7), pp. 1849-1854, Julio 1991.
24. Reichenberger, H., *Lithotripters Systems*, Proceedings of the IEEE, vol. 76, No. 9, Septiembre 1988.
25. Van Cauwelaert, J., *Cavitación controlada por dos ondas de choque y su aplicación a litotripsia extracorporal*, Tesis de Licenciatura, Facultad de Ciencias, UNAM, 2001.
26. Motorola Small-signal transistors, *FET's and Diodes Device Data*, Motorola, Inc. 1994.