



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**INSTRUMENTACIÓN DE UN CIRCUITO  
HIDRODINÁMICO PARA LA OBSERVACIÓN DE LA  
CAVITACIÓN TOTALMENTE DESARROLLADA  
CON FLUIDOS VISCOSOS ELÁSTICOS**

**T e s i s**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:**

**INGENIERO MECÁNICO  
ELECTRICISTA**

**P R E S E N T A:**

**J. JESÚS ARAUJO GONZÁLEZ**

**DIRECTORA DE TESIS:**

**Dra. Margarita Navarrete Montesinos**

**México, D. F. Octubre 2015**



## MIS AGRADECIMIENTOS:

A Dios, por iluminar mi camino.

A mi madre, por su amor y cariño que nos cobijó en su paso por la vida.

A mi padre por su apoyo y consejos.

A mis hermanos.

En especial dedico mi tesis a Antonio, en donde quiera que estés mi hermano.

A mis hijos Andrea, Ricardo y Jesús Alberto que junto con su mami Feli, me brindaron un apoyo invaluable para continuar mis estudios.

A mis compañeros becarios del Instituto de Ingeniería, que me hicieron muy grata la estancia, en especial a Olivia, compañera becaria y de trabajo, por contagiarme su juvenil energía y “aventarme” en este proyecto de tesis que lo veía inalcanzable y gracias por su continuo apoyo.

A Lilian, mi amiga, por ser una mujer excepcional, que me ha enseñado a ir hacia adelante, a pesar de los obstáculos que se presentan.

A la Dra. Margarita Navarrete Montesinos por abrirme las puertas del Instituto de Ingeniería y porque sin su valiosa dirección no hubiera sido posible esta tesis.

A la **Facultad de Química** por todas las facilidades otorgadas a mi persona y todo su apoyo para la elaboración de esta tesis.

A la **Facultad de Ingeniería y el Instituto de Ingeniería de la UNAM** por permitirme caminar pasillos y aulas que me han dado la oportunidad de abrazar mis sueños...

**Esta tesis se realiza gracias al apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIT) de la UNAM: “Estudios de los fenómenos físicos y químicos involucrados en la emisión de frentes de choque”, con número IN106515.**

## RESÚMEN

Se implementa la instrumentación de un circuito hidrodinámico experimental cerrado en donde se realizan estudios de la cavitación, sus fenómenos asociados y sus aplicaciones. Por ejemplo, se realizan estudios dinámicos para la limpieza y desinfección de agua, para la disminución de la viscosidad de líquidos, entre otros más. El circuito cuenta con una motobomba con su impulsor diseñado para generar núcleos y un Venturi para producir cavitación. Este circuito hidrodinámico se encuentra en el laboratorio de Pruebas no Destructivas del Instituto de Ingeniería de la UNAM. Durante las corridas experimentales se necesita medir con sensores, transductores los parámetros físicos como: presión, velocidad, emisión de luz, intensidad del ruido, así como los patrones de burbujas que se forman en el Venturi. Esta tesis trata de cómo se realizan estas mediciones y de la adquisición de datos.

La metodología que se sigue es:

- a) Se prueba, revisa y analiza el circuito hidrodinámico en su estado actual.
- b) Se selecciona bajo las condiciones experimentales los sensores y transductores.
- c) Los sensores y transductores se prueban uno a uno y se determina su posición y tipo de fijación en el circuito. Se corroboran sus características (calibración) y limitaciones bajo las condiciones de trabajo.
- d) Se realizan pruebas bajo condiciones de los estudios experimentales

Con lo anterior, se tiene un procedimiento para la colocación de los sensores y transductores, así como para el proceso de adquisición de datos.

Al final del trabajo se muestran los datos y resultados de una prueba experimental para el estudio de la cavitación usando 1,2 propanodiol.

“Misurare tutto ciò che è misurabile e cercare di  
misurare ciò che non è ancora misurata”

GALILEO GALILEI

(1564-1642)



## CONTENIDO

---

<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b>	<b>I-II</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b>	<b>III</b>
<b>ÍNDICE DE GRÁFICAS</b>	<b>IV</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
1.1 GENERALIDADES	1
1.2 MÉTODOS EMPLEADOS PARA EL ESTUDIOS Y OBSERVACIÓN DE LA CAVITACIÓN	2
1.3 JUSTIFICACIÓN	3
1.4 OBJETIVO GENERAL	3
1.5 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
1.6 RESULTADOS Y CONCLUSIONES	...4
<b>2. PRINCIPIOS BÁSICOS</b>	<b>6</b>
2.1 INTRODUCCIÓN	6
2.2 MEDICIONES DE PRESIÓN	6
2.3 MEDICIONES DE TEMPERATURA	7
2.4 MEDICIONES DE SONIDO (RUIDO)	7
2.5 EFECTOS FOTOELÉCTRICOS	8
2.6 PIEZOELÉCTRICOS	9
2.7 VARIADORES DE FRECUENCIA	10
2.8 MANÓMETRO TIPO "U"	11
2.9 FOTOGRAFÍA	12
2.10 CAVITACIÓN	13
<b>3. DESCRIPCIÓN DEL CIRCUITO HIDRODINÁMICO</b>	<b>16</b>
3.1 INTRODUCCIÓN	16
3.2 DESCRIPCIÓN	16
<b>4. SELECCIÓN, E IMPLEMENTACIÓN DE LA INSTRUMENTACIÓN AL CIRCUITO HIDRODINÁMICO.</b>	
<b>CALIBRACIÓN-</b>	<b>21</b>
4.1 INTRODUCCIÓN	21
4.2 INSTRUMENTACIÓN SELECCIONADA	21
4.3 IMPLEMENTACIÓN DE LA INSTRUMENTACIÓN	23
4.4 CALIBRACIÓN DE INSTRUMENTOS	30
<b>5. METODOLOGÍA PARA PREPARACIÓN Y REALIZACIÓN DE PRUEBAS</b>	<b>35</b>

5.1 METODOLOGÍA PARA PREPARACIÓN DE PRUEBAS	34
5.2 REALIZACIÓN DE PRUEBAS	35
<b>6. RESULTADOS Y ANÁLISIS</b>	<b>45</b>
6.1 GRÁFICA CORRIENTE [A] VS POTENCIA DE LA BOMBA [%]	45
6.2 GRÁFICA DIFERENCIA DE PRESIONES [kPa] VS POTENCIA DE LA BOMBA [%]	46
6.3 GRÁFICA RUIDO [dB] VS POTENCIA DE LA BOMBA [%]	47
6.4 GRÁFICA TEMPERATURA [°C] VS POTENCIA DE LA BOMBA [%]	48
6.5 ESPECTROS AMPLITUD-FRECUENCIA [V-Hz]	49
6.6 GRÁFICAS AMPLITUD-TIEMPO [V-s]	50
6.7 IMÁGENES DE FOTOGRAFÍA RÁPIDA	50
<b>7. CONCLUSIONES</b>	<b>52</b>
<b>8. BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>53</b>
<b>9. ANEXO</b>	<b>55</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1 Relaciones en términos de la presión	6
Fig. 2 Efecto fotoeléctrico	9
Fig. 3 Efecto piezoeléctrico en materiales ferroeléctricos	10
Fig. 4 Conexiones del control de velocidad	10
Fig. 5 Diagrama de bloques del variador de frecuencias	10
Fig. 6 Diagrama de fases del agua	13
Fig. 7 Inicio de cavitación en un Venturi con un cuerpo central para medir contenido de núcleos	14
Fig. 8 Cavitación superficial	14
Fig. 9 Cavitación vórtice generada por un hidrófilo tridimensional	15
Fig. 10 Ejemplo de cavitación en la estela de un “bluff body”	15
Fig. 11 Circuito hidrodinámico en el Laboratorio de Pruebas no Destructivas	16
Fig. 12 Tubo de gasto cavitante	17
Fig. 13 Espárragos de refuerzo para el tubo Venturi	17
Fig. 14 Sistema de enfriamiento para el circuito hidrodinámico	18
Fig. 15 Construcción del serpentín	18
Fig. 16 Serpentín dentro del tanque principal	19
Fig. 17 Conexión del serpentín al sistema de enfriamiento	19
Fig. 18 Base de la estructura del circuito hidrodinámico	20
Fig. 19 Válvula para purga de aire en el circuito hidrodinámico	20
Fig. 20 Circuito hidrodinámico con la instrumentación	23
Fig. 21 Ubicación de sensores en Venturi	24
Fig. 22 Posición de piezoeléctricos	25
Fig. 23 Posición del fotomultiplicador	25
Fig. 24 Válvula tipo aguja y conector	25
Fig. 25 Manómetro diferencial tipo U	25
Fig. 26 Amperímetro de gancho	26
Fig. 27 Decibelímetro	26
Fig. 28 Osciloscopio WAVE RUNNER	27
Fig. 29 Control de velocidad YASCAWA	28
Fig. 30 Bomba Centrífuga de 5 HP	28
Fig. 31 Preparación para montaje del impulsor	29
Fig. 32 Esquema de un manómetro tipo U	32
Fig. 33 Verificación del incremento de la temperatura	36
Fig. 34 Inicio de la formación de burbujas dentro del Venturi	36
Fig. 35 Aspecto del laboratorio durante las pruebas con la cámara PHANTOM	38
Fig. 36 Imágenes del fenómeno de la cavitación	38
Fig. 37 Captura de imágenes con cámara PHANTOM	39
Fig. 38 Venturi instrumentado para la captura de imágenes de video y fotografía	40
Fig. 39 Formación de burbujas al 24% de operación de la motobomba	40



Fig. 40 Cavitación al 36% de operación de la motobomba	40
Fig. 41 Aspecto del circuito hidrodinámico instrumentado	41
Fig. 42 Imagen gráfica en osciloscopio	43
Fig. 43 Adquisición de datos en manómetro	43
Fig. 44 Señales de Amplitud vs Tiempo del fotomultiplicador con respecto al porcentaje de la Potencia de la bomba: a) 30%; b) 33%;c) 37% y d) 39%	49
Fig. 45 Al 30% cavitación en proceso	49
Fig. 46 Al 35% se observa el cambio en el flujo de propanodiol	50
Fig. 47 Al 37% se logran observar dos nubes de burbujas, una que sale de la garganta y la otra expandiéndose en el lado divergente del Venturi	50
Fig. 48 Al 39% se observa una nube que sale del Venturi y ocupa casi el 70% de la parte divergente, mientras que en la garganta se comprime la nube.	50
Fig. 49 Buen acoplamiento del sensor de fuerza	58
Fig. 50 Gráficas de longitud de onda vs sensibilidad del fotomultiplicador	59

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Aplicaciones de la cavitación a nivel mundial	2
Tabla 2	Experiencias en la aplicación de la instrumentación para seguimiento de la cavitación	5
Tabla 3	Tipo de instrumento y su función	22
Tabla 4	Sensores y su correspondiente canal de conexión al osciloscopio	27
Tabla 5	Especificaciones del osciloscopio LeCroy Wave Runner Xi-A	27
Tabla 6	Especificaciones del control de velocidad	28
Tabla 7	Especificaciones de la bomba	28
Tabla 8	Determinación del punto de calentamiento de acuerdo a la presión atmosférica	31
Tabla 9	Instrumentación utilizada en la adquisición de fotografía, video y audio	37
Tabla 10	Condiciones de arranque de la prueba	37
Tabla 11	Tiempo de grabación con la cámara PHANTOM	39
Tabla 12	Datos obtenidos de la prueba complementaria	42
Tabla 13	Adquisición de datos de corriente [A] vs Potencia de la bomba [%]	44
Tabla 14	Adquisición de datos de Diferencia de presión [kPa] vs Potencia de la Bomba [%]	45
Tabla 15	Adquisición de datos de Ruido [dB] vs Potencia de la Bomba [%]	46
Tabla 16	Adquisición de datos de temperatura [°C] vs Potencia de la Bomba [%]	47
Tabla 17	Hoja de especificaciones del sensor de fuerza PCB PIEZOTRONICS Mod. 200B05	58
Tabla 18	Fotomultiplicador HAMAMATSU, serie H5784	59

## ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica no. 1	Relación corriente [A]vs Potencia de la Bomba [%]	44
Gráfica no. 2	Diferencia de presiones [kPa] vs Potencia de la Bomba [%]	45
Gráfica no. 3	Ruido [dB] vs Potencia de la Bomba [%]	46
Gráfica no. 4	Temperatura [°C] vs Potencia de la Bomba [%]	47
Gráfica no. 5	Espectros de Amplitud Frecuencia con datos del sensor de presión	48
Gráfica no. 6	Espectros de Amplitud vs frecuencia con datos del sensor de fuerza	49

# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1 GENERALIDADES

Hace más de cien años, los hombres de ciencia al estudiar los severos daños producidos en los elementos móviles de las máquinas hidráulicas, encontraron que se produce un fenómeno que incluso afecta su rendimiento. A este fenómeno se le conoce con el nombre de **cavitación**. Su descubrimiento se inicia en las hélices de los barcos, elementos donde se generan todo tipo de conjeturas en torno a la cavitación y es en donde se dan los primeros estudios, de hecho, el nombre de cavitación se da por una investigación realizada por Thornycroft y Barnaby [1] donde reportan que las cavidades alrededor de las hélices limitan su empuje. Además de otros equipos hidráulicos como las turbinas, bombas axiales, bombas centrífugas y bombas de desplazamiento positivo inclusive, la cavitación se desarrolla también en válvulas, tubería y medidores Venturi, elementos hidráulicos que involucran cambios de velocidad del líquido que pasa a través de ellos.

Uno de los pioneros en las investigaciones de este fenómeno es el inglés Sir Charles Pearsons quien al construir el primer túnel de cavitación tuvo las primeras fotografías a través de una ventana, siendo la cámara fotográfica uno de los primeros instrumentos utilizados para su observación. Posteriormente en Europa se construyeron elementos de observación mejorados como los túneles con hélices, y luego entre el periodo de las dos guerras mundiales, diseñaron en los Países Bajos el túnel Hamburg Model Basin (HMB). En Estados Unidos se construyeron tres túneles, de los cuales, uno lo construyó David Taylor Model Basin (DTMB) y otro en el Massachusetts Institute of Technology (MIT) [1]. Actualmente existen una gran variedad de formas de producir cavitación y se han desarrollado métodos para su estudio e investigación por lo que al producirla bajo ciertas características se aprovecha para beneficio del ser humano. Por ejemplo para eliminar productos farmacéuticos del agua se produce cavitación hidrodinámica con un nuevo generador de rotación. Se ha demostrado que para un tratamiento satisfactorio se requiere la combinación de la cavitación hidrodinámica y el empleo de peróxido de hidrógeno para eliminar los productos farmacéuticos ibuprofeno, ketoprofeno, carbamazepina y diclofenaco, siendo eficiente en más del 80%, para ello se toman en cuenta varios parámetros de operación como la geometría de rotores, la presión de la cámara de tratamiento, la temperatura del líquido, la cantidad de peróxido y el tiempo de duración de la cavitación [2]. Entre muchas otras aplicaciones de la cavitación, en el Instituto de Ingeniería de la UNAM se tienen por ejemplo dos proyectos de investigación, uno para reproducir cavitación para limpieza y desinfección de agua [3] y otro para disminuir la viscosidad de los fluidos [4].

Aun cuando es un fenómeno indeseable, se han realizado investigaciones acerca del aprovechamiento de sus características físicas, por lo que en la siguiente tabla se

ejemplifican algunas aplicaciones de la cavitación a nivel mundial, de ahí su importancia:

**Tabla 1. Aplicaciones de la cavitación a nivel mundial [5].**

Grupo	Tipo de cavitación	Aplicación	Estado
<b>Parag R. Gogate Universidad de Mumbai, India</b>	Acústica Hidrodinámica	Tratamiento de agua, biocombustibles, síntesis y destrucción orgánica	Investigación en Curso
<b>Rashmid Chand, Universidad de Albertay, Escocia</b>	Acústica Hidrodinámica	Oxidación general orgánica	Investigación en curso
<b>Arisdyne Systems, Cleveland, Ohio</b>	Hidrodinámica	Tecnología de combustibles	Unidad Comercial
<b>Cavitation Technologies, Inc. CA</b>	Hidrodinámica	Tecnología de combustibles	Unidad Comercial
<b>Dynaflow, Inc. J MD</b>	Hidrodinámica	Oxidación y desinfección, CDF	Unidad Comercial
<b>Hydro Dynamics, Inc,</b>	Hidrodinámica	Tecnología de combustibles, procesamiento de comidas	Georgia Unidad Comercial
<b>VRTX Advanced fluid technology</b>	Hidrodinámica	Enfriamiento con agua, Digestor para tratamiento de agua, biodiesel, etc.	Unidad Comercial

## 1.2 MÉTODOS EMPLEADOS PARA EL ESTUDIO Y OBSERVACIÓN DE LA CAVITACIÓN

Haciendo referencia a las primeras observaciones de la cavitación que se realizaron empleando túneles de agua, se inicia la implementación de los primeros instrumentos utilizados para su estudio. Previo a los túneles, resultaba complicado instrumentar y realizar observaciones en la zona de formación del fenómeno debido al difícil acceso y también al considerar a la cavitación como un fenómeno de alta velocidad, por lo que hicieron las observaciones de las cavidades al paso del flujo del fluido de forma directa, y de forma indirecta se hicieron mediciones sobre las ondas de choque generadas por las implosiones de las cavidades [5]. En la actualidad, y con todo y que la tecnología de la instrumentación es más sofisticada se siguen empleando algunas técnicas y métodos aplicados inicialmente, además, los investigadores con su gran ingenio llevan a cabo trabajos de experimentación y registro de datos pese a las complicaciones que se le presenten en cada una de sus pruebas. Un ejemplo de ello son las cámaras de alta velocidad que pertenecen al sistema Crazz-Chardin desarrollado por La Universidad de San Luis, EUA. Esas cámaras consisten de varios destellos que se activan sucesivamente. Cada destello tiene asociada una película plana o un elemento de película plana a través de un montaje “strioscopic”. En principio es posible tomar imágenes a una velocidad de 10 millones por segundo con esa cámara. También, se han hecho experimentos por NEYRTEC, para visualización de chorros reentrantes

durante el colapso de burbujas. Farhat y Avellan demostraron la presencia de ondas de choque en un tubo vortex. Aquí se observa el inconveniente del uso de esas cámaras pues se requiere un espacio y un arreglo óptico de transmisión de alta calidad [1]. M. K. De y F G. Hammitt, desarrollaron una sonda de prueba de presión de alta frecuencia e implementaron un sistema de monitoreo para predecir los daños en las bombas centrífugas de alto rendimiento. Con la sonda y un sistema de procesamiento y adquisición de datos, midieron las características de los pulsos de presión dañinos generados por la cavitación dentro de un Venturi en el cual se simulan las mismas condiciones que en una máquina hidráulica. Las mediciones se tomaron de espectros de pulsos de presión, utilizados para desarrollar un método para predecir el daño debido a la cavitación [6]. En la tabla 2, se hace una relación de algunas investigaciones recientes empleando instrumentos de medición para observación y análisis de la cavitación desarrollada en diferentes sistemas.

### **1.3 JUSTIFICACIÓN**

En el Laboratorio de Pruebas No Destructivas del Instituto de Ingeniería de la UNAM, existe un circuito hidrodinámico en donde se experimenta la generación del fenómeno de la cavitación y se llevan a cabo diversos proyectos para su estudio y análisis. Aun cuando cuenta con equipo instrumental moderno, se tiene la necesidad de diseñar e implementar un sistema de instrumentación y la metodología que permita la adquisición y registro de datos de las variables generadas por dicho fenómeno dentro del circuito, así como la adquisición de imágenes fotográficas, de video y el ruido generado dentro y fuera del circuito.

### **1.4 OBJETIVO GENERAL**

Implementación de la instrumentación al circuito hidrodinámico existente en el Laboratorio de Pruebas no Destructivas del Instituto de Ingeniería de la UNAM, que contemple la adquisición de datos e imágenes, del fenómeno de la cavitación que se genera en este circuito.

### **1.5 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Revisión bibliográfica de la instrumentación implementada en circuitos hidrodinámicos para la observación de la cavitación.

Diseño de un sistema de enfriamiento inmerso en el tanque de almacenamiento de fluido (1,2 propanodiol) para control de temperatura.

Diseño de la instrumentación aplicada al circuito hidrodinámico en el cual se genera la cavitación y de la cual se miden presión, temperatura, intensidad de ruido y corriente con sus respectivas gráficas en función de la potencia de la bomba. Obtener espectros de amplitud-frecuencia.

-Experimentación en el circuito hidrodinámico con la instrumentación implementada para adquisición de ruido en función de la potencia de la bomba [%] para realizar observaciones visuales y analizar gráficamente las señales obtenidas debido al fenómeno de la cavitación.

## **1.6 RESULTADOS Y CONCLUSIONES**

-Presentación de resultados con sus gráficas y el análisis correspondiente.

-Conclusiones objetivas de las ventajas al implementar la instrumentación en el circuito hidrodinámico así como seguir la metodología lograda para este propósito.

**Tabla 2. Experiencias en la aplicación de la instrumentación para seguimiento de la cavitación.**

AUTOR	ARTICULO	DESARROLLO DE LA PRUEBA	INSTRUMENTACIÓN EMPLEADA	CONCLUSIONES
[ 7 ] M. K. De and F. G. Hammitt 1998	<b>Instrument system for monitoring cavitation noise</b>	DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITOREO PARA ANTICIPAR DAÑOS EN EQUIPO HIDRAÚLICO DEBIDO A LA CAVITACIÓN EN PARTICULAR, EN BOMBAS CENTRÍFUGAS DE ALTO RENDIMIENTO	SE DISEÑA UNA SONDA DE PRUEBA DE PRESIÓN DE ALTAS FRECUENCIAS Y UN SISTEMA DE PROCESAMIENTO Y ADQUISICIÓN DIGITAL, PARA MEDIR CARACTERÍSTICAS DE LOS PULSOS DE PRESIÓN DAÑINOS PROVOCADOS POR LA CAVITACIÓN EN UN VENTURI	AL INICIO DE LA CAVITACIÓN SE FORMAN BURBUJAS QUE OSCILAN ENTRE 5-20 kHz, DATOS ÚTILES PARA PREDICCIÓN DE LA CAVITACIÓN
[ 8 ] SHENG-HSU EH, YANG, SHENG- YUH JAW, KEH-CHIA YEH 2009	<b>Single cavitation bubble generation and observation of the bubble collapse, flow induced by pressure wave</b>	SE HACE UN ANÁLISIS DETALLADO DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL CAMPO DE FLUJO Y EL EFECTO QUE PROVOCA EL CHORRO DURANTE EL COLAPSO DE LA BURBUJA PROVOCADO POR UNA ONDA DE PRESIÓN	CÁMARA DE ALTA VELOCIDAD: 4000 fps, DE 128 X 128 PÍXELES SENSOR KULITE XTL-190	EL COLAPSO DE LA BURBUJA ES PROVOCADO POR LA DIFERENCIA DE PRESIÓN A TRAVÉS DE LA SUPERFICIE DE LA BURBUJA Y EL FLUJO INDUCIDO CORRE A LO LARGO DEL EJE DEL TUBO
[9] BRANDNER, Y. LECOFFRE, J. WALKER 2007	<b>Designs considerations in the development of a modern cavitation tunnel</b>	ESTAS NUEVAS INSTALACIONES SE CONSTRUYERON PARA INVESTIGACIONES DE HIDRODINÁMICA NAVAL, EN PARTICULAR SOBRE MODELADO DE LA CAVITACIÓN Y LA FÍSICA DEL FLUJO TURBULENTO	CÁMARA DE ALTA VELOCIDAD CAPTURA DE IMAGEN DE PARTÍCULA, SISTEMA DE VELOCIMETRÍA, "SHADOWGRAFÍA", VIBRÓMETRO LÁSER, ESCÁNER, PUNTAS DE PRESIÓN DE RESPUESTA RÁPIDA 1/D, 3/BUCLE A PRUEBA DE CHORRO DE AGUA DINAMÓMETRO DE HÉLICES BALANZAS DE FUERZA	CONSTRUCCIÓN DE UN TÚNEL DE CAVITACIÓN PARA INVESTIGACIÓN BÁSICA Y APLICADA
[10] P. RUDOFF, M. HUDEC, M. GRIGER & D. STEFAN 2014	<b>Characterizations of the cavitating flow in converging-diverging nozzle based on experimental investigations</b>	SE REALIZA LA CARACTERIZACIÓN DE LA CAVITACIÓN VARIANDO EL COEFICIENTE DE PÉRDIDAS, SE DESCRIBE CAVITACIÓN PARCIAL, TOTAL Y SUPERCavitación	SE IMPLEMENTA EN UN CIRCUITO HIDRODINÁMICO CERRADO DE PRUEBA, CON LA SIGUIENTE INSTRUMENTACIÓN: TRANSDUCTOR DE PRESIÓN DMP331, EXACTITUD $\pm 0.25\%$ DE INTERVALO. TRANSDUCTOR PIEZOELÉCTRICO, 701 A, KLISTER, EXACTITUD $\pm 0.3\%$ DE INTERVALO MEDIDOR DE FLUJO NQ 199. ELA, EXACTITUD $\pm 0.1\%$ DE INTERVALO. TERMÓMETRO TIPO RESISTENCIA, HSQ-502 1A2L, HIT, EXACTITUD $\pm 0.1\%$ . CÁMARA FOTOGRÁFICA NIKON D300, LÁMPARA DE HALÓGENO 500 W.	TRANSFORMACIONES DE ENERGÍA IRREVERSIBLE, SE CORRELACIONA CON EL PATRÓN DE CAVITACIÓN DENTRO DEL VENTURI
[11] TONGYOUNG HE, YUAN LIU 2011	<b>Experimental research into time-frequency characteristics of cavitation noise using scalogram wavelet</b>	ÉSTE ESTUDIO EXPERIMENTAL INVESTIGA LAS CARACTERÍSTICAS DE FRECUENCIA DEL RUIDO PRODUCIDO EN SUS DIFERENTES ETAPAS DE LA CAVITACIÓN Y LA RELACIÓN ENTRE EL RUIDO DE LA CAVITACIÓN Y EL PROCESO DE LA CAVITACIÓN	MOTOR ASÍNCRONO ALTA FRECUENCIA: INTERVALO DE REGULACIÓN DE FRECUENCIA DE 8-A 50 Hz HIDRÓFONO DE ALTA FRECUENCIA TIPO 8103 MCA. BRUEL & KJAER (B & k), REGISTRA LA SEÑAL DEL RUIDO DE LA CAVITACIÓN, INTERVALO DE FRECUENCIA DE 0.1 A 180 KHz SISTEMA DE MUESTREO MCA. B & k PULSE 3560C PARA FRECUENCIAS DE MUESTREO DE HASTA 65 KHz	SE COMPRUEBA QUE EL RUIDO DE CAVITACIÓN TIENE AMPLIAS COMPONENTES DE FRECUENCIA



## 2. PRINCIPIOS BÁSICOS

### 2.1 INTRODUCCIÓN

Una de las áreas fundamentales en la ingeniería es la instrumentación, que sirve para entender y seleccionar el tipo de sensores, transductores e instrumentos a emplear en pruebas experimentales o en sistemas de control para equipos mecánicos, eléctricos, neumáticos o hidráulicos empleados en la industria. El uso de los instrumentos de medición, ha favorecido al ser humano para conocer con mayor exactitud los valores de las variables, es por eso que algunos autores consideran al instrumento de medición como una extensión del hombre ya que para cada una de las variables físicas como por ejemplo la temperatura, corriente, o voltaje, existe su correspondiente instrumento, por lo que al conocer sus características y especificaciones permite realizar una medición adecuada. A continuación se describen las variables físicas involucradas en el estudio del fenómeno de la cavitación y los instrumentos a utilizar explicando el concepto teórico del mismo.

### 2.2 MEDICIONES DE PRESIÓN

La presión se define como la fuerza por unidad de área ejercida en una pared que lo contiene (solo para sistemas fluidos). La presión absoluta se refiere al valor absoluto de la fuerza por unidad de área ejercida en la pared que contiene un fluido. La presión manométrica representa la diferencia entre la presión absoluta y la presión atmosférica local [12].

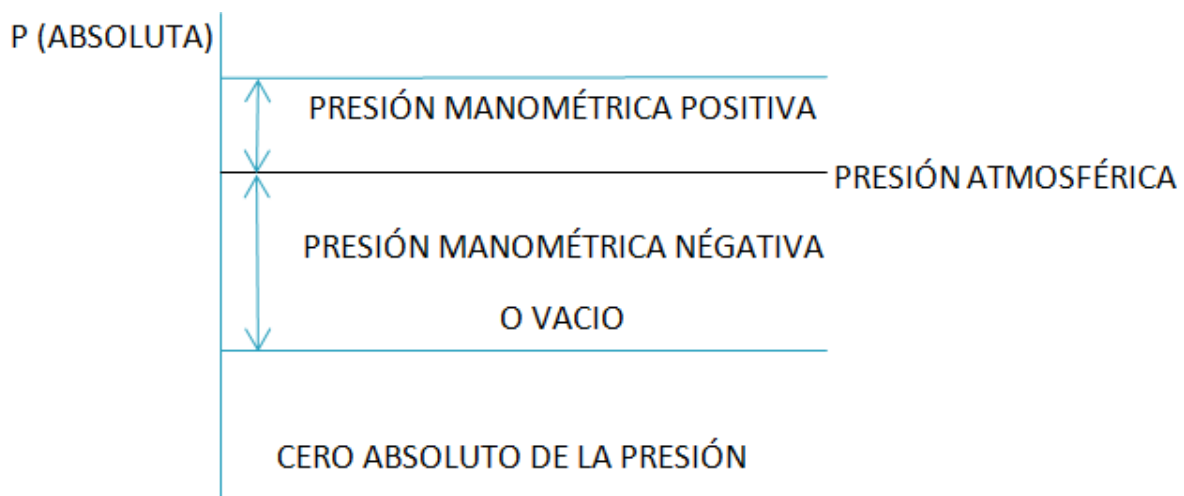


Fig. 1. Relaciones en términos de la presión

El vacío representa la cantidad en que la presión atmosférica excede a la presión absoluta. (fig.1) Es importante notar que la presión local del fluido depende de las variables; altura, velocidad de flujo, densidad de flujo y temperatura. La presión de fluido resulta de un intercambio de la cantidad de movimiento entre las moléculas del fluido y la pared que lo contiene; pero el intercambio total de la cantidad de movimiento depende del número total de moléculas que chocan contra la pared por unidad de tiempo y la velocidad promedio de las moléculas.

### 2.3 MEDICIONES DE TEMPERATURA

La temperatura es un concepto intuitivo, que indica cuando un cuerpo está caliente o frío. La escala internacional de la temperatura sirve para definirla en términos de las características de los materiales. Las escalas de temperatura más usadas son Celsius y Fahrenheit, basadas en una especificación del número de incrementos entre el punto de congelación y el punto de ebullición del agua a presión atmosférica normal [12].

La escala Celsius absoluta se llama Kelvin, en tanto que la escala Fahrenheit absoluta se denomina escala Rankine. Los puntos cero de ambas escalas absolutas representan el mismo estado físico, y la razón de estos dos valores es la misma independientemente de la escala absoluta usada, es decir:

$$\left(\frac{T_2}{T_1}\right)_{Rankine} = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)_{Kelvin}$$

El punto de ebullición del agua a 1 atm se toma en forma arbitraria como 100° en la escala Celsius y 212° en la escala Fahrenheit. Se aplica la siguiente relación:

$$^{\circ}F = 32.0 + \frac{9}{5} ^{\circ}C$$

$$^{\circ}R = \frac{9}{5} ^{\circ}K$$

### 2.4 MEDICIONES DE SONIDO (RUIDO)

El sonido es un fenómeno vibratorio que también podría relacionarse con el tema de las mediciones de presión, ya que los efectos acústicos se miden en fluctuaciones armónicas

de presión que se producen en un medio líquido-gaseoso. Se ha relacionado la intensidad de sonido y la presión del sonido con ciertos valores de referencia  $I_0$ ,  $P_0$  los cuales corresponden a la intensidad y a la fluctuación de la presión media del sonido audible más débil a una frecuencia de 1000 Hz. Estos niveles de referencia son [12]:

$$I_0 = 10^{-16} \frac{W}{cm^2}$$

$$P_0 = 2 \times 10^{-4} \frac{dyn}{cm^2}$$

$$= 2 \times 10^{-5} \frac{N}{m^2} \text{ (0.0002 } \mu\text{bar)}$$

$$= 2.9 \times 10^{-9} \text{ psi}$$

Los niveles de intensidad y de presión se miden en decibeles, por lo tanto:

$$\text{Nivel de intensidad(dB)} = 10 \log \frac{I}{I_0}$$

$$\text{Nivel de presión(dB)} = 20 \log \frac{P}{P_0}$$

## 2.5 EFECTOS FOTOELÉCTRICOS

Un transductor fotoeléctrico convierte un rayo de luz en una señal eléctrica, útil para la medición de la intensidad de la luz. Considérese el circuito mostrado en la figura 2, en dónde la luz incide el cátodo foto-emisivo y emite electrones que el ánodo atrae, produciendo una corriente eléctrica en el circuito externo [12].

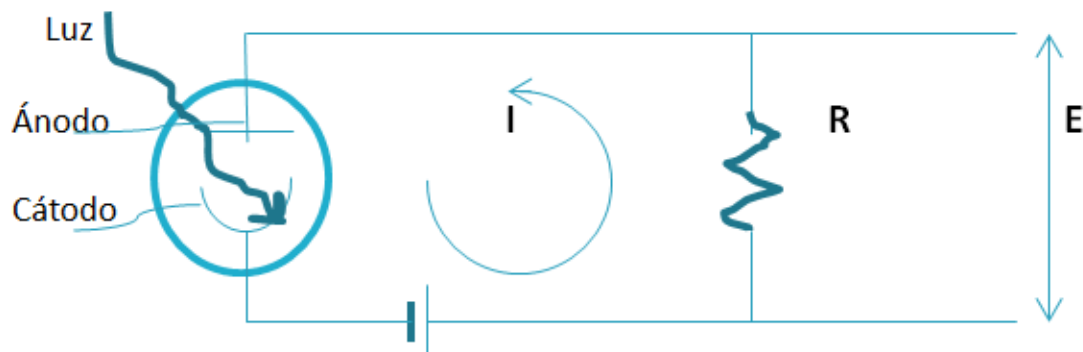


fig. 2 Efecto fotoeléctrico.

El cátodo y el ánodo están encerrados en una envolvente de vidrio o cuarzo al que se le ha hecho vacío o lleno de gas inerte. La sensibilidad fotoeléctrica se define como:

$$I = S\varphi$$

Donde  $I$  = corriente fotoeléctrica

$\varphi$  = iluminación del cátodo

$S$  =sensibilidad [amp-watt] o [amp-lumen]

Las características de transmisión de la envolvente tubular de vidrio y las características foto-emisivas del material del cátodo, son dos factores que influyen en la respuesta del tubo fotoeléctrico.

## 2.6 PIEZOELÉCTRICOS

Un sensor piezoeléctrico es un dispositivo capaz de convertir esfuerzos mecánicos en señales eléctricas, aprovechando la propiedad de polarización de algunos materiales. Los materiales ferromagnéticos presentan esta propiedad, ya que poseen un momento bipolar resultante.

En la fig. 3 se observa cómo al aplicar una fuerza para comprimir el material piezoeléctrico, se reacomodan las cargas y se acorta la distancia entre dipolos. Esto ocasiona un exceso de carga positiva en un polo del material y otro de carga negativa en la dirección de polarización, creando una diferencia de potencial eléctrica entre polos [13].

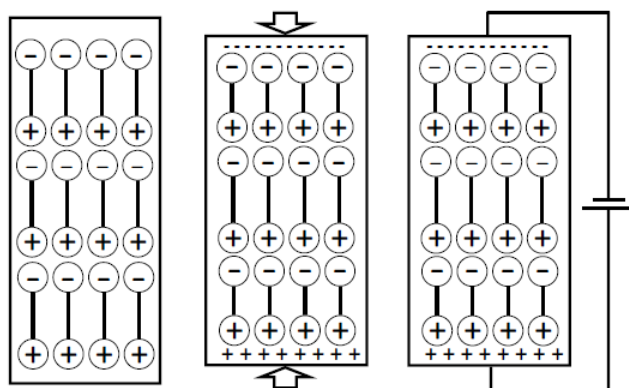


Fig. 3. Efecto piezoeléctrico en materiales ferroeléctricos [13].

## 2.7 VARIADORES DE FRECUENCIA

Son dispositivos electrónicos que permiten el control completo de motores eléctricos de inducción, hay de CC (estas siglas significan Corriente Continua, la explicación es que varía la tensión) y de CA (de igual modo, esto significa Corriente Alterna, es decir cuando hay variación de la frecuencia). Los más utilizados son los de motor trifásico de inducción y rotor sin embobinar (jaula de ardilla y se conocen también como inversores) o variadores de velocidad (fig. 4) [14].

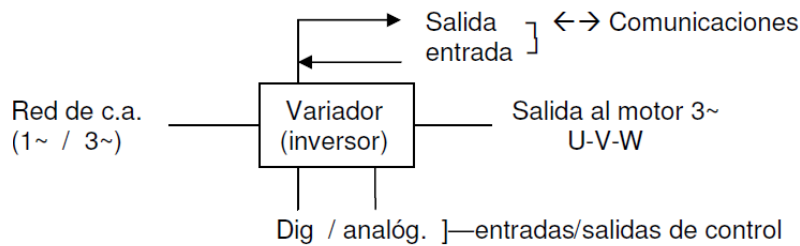


Fig. 4. Conexiones del control de velocidad [14].

La conexión al motor, generalmente es de tres hilos (U, V, W), ya sea para conexión directa en triángulo o estrella, según la tensión del motor (fig. 5).

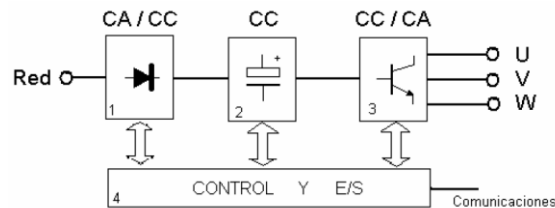


Fig. 5. Diagrama de bloques del variador de frecuencias [14].

1. Rectificador: Partiendo de la red de suministro de CA, monofásica o trifásica, se obtiene CC mediante diodos rectificadores.

2. Bus de continua: Capacitores de gran tamaño (algunos casos bobinas) almacenan y filtran la CC rectificada, para obtener un valor de tensión continua estable y reserva de energía suficiente para proporcionar la intensidad requerida por el motor.
3. Etapa de salida: Desde la tensión del bus de CC, un ondulator convierte esta energía en una salida trifásica con valores de tensión, intensidad y frecuencia de salida variables. Como elementos de conmutación se usan principalmente transistores bipolares (TBJ), CMOS o similares, IGBT, tiristores (SCR), GTO, etc. Las señales de salida se obtienen por diversos procedimientos como torceado, mediante ciclos convertidores, o señales de aproximación senoidal mediante modulación por anchura de pulsos (PWM).
4. Control y ES: Circuitos de control de los diferentes bloques del variador, protección, regulación, etc., entradas y salidas tanto analógicas como digitales, además se incluye el interfaz de comunicación con buses u otros dispositivos de control del usuario [14].

## 2.8 MANÓMETRO TIPO U

Un manómetro diferencial o del tipo U mide la diferencia de presiones entre dos puntos en una tubería, se utiliza cuando en la tubería se ha hecho un cambio en el diámetro o en la altura. Su funcionamiento se basa en el hecho de que al conectarlo en los dos lados de la tubería, la suma de las presiones en ambos extremos es igual [15]. De acuerdo con el equilibrio de presiones que debe haber en ambos extremos:

$$P_1 + \rho g a = P_2 + \rho g b + \rho_m g h \dots \dots \dots (2.8.1)$$

Al despejar la diferencia de presiones será:

$$P_1 - P_2 = \rho_m g h + \rho g b - \rho g a \dots \dots \dots (2.8.2)$$

Donde:  $\rho$  = densidad del fluido en la tubería  
 $\rho_m$  = densidad del fluido manométrico

## 2.9 FOTOGRAFIA

Es el proceso de captura de imágenes sobre un material sensible a la luz, una película fotosensible que se basa en el principio de la cámara oscura donde una imagen captada por un pequeño agujero es proyectada invertidamente sobre una superficie, de tal forma que el tamaño de la imagen queda reducido y aumenta su nitidez. Actualmente, para almacenar imágenes se emplean sensores CCD, CMOS y memorias digitales [16].

**PRINCIPIOS FÍSICOS DEL PROCESO FOTOGRÁFICO.** La luz es la parte visible del espectro electromagnético que incluye además de ondas de radio, ondas gamma, rayos X, infrarrojos y ultravioletas, pero el ojo humano percibe únicamente una pequeña banda de longitudes de onda del espectro visible, que comprende toda la gama de colores. La mayor longitud de onda visible corresponde al rojo y la menor al azul [16].

**REFLEXIÓN Y DIFUSIÓN.** Todo cuerpo refleja parte de la luz que incide sobre él. La mayoría de las superficies de los objetos son ásperas o irregulares, y por ello dispersan la luz que reciben en todas direcciones. Una superficie lisa y bien pulida, en cambio, produce una reflexión regular; la luz que incide en una dirección determinada, es reflejada en otra dirección determinada. Es lo que se conoce como reflexión especular, y sigue un par de leyes muy simple: la primera es que el rayo incidente y el reflejado, se encuentren sobre el mismo plano, la segunda que el rayo de incidencia y el ángulo de reflexión son iguales. La difusión de la luz es la dispersión de la luz directa. Se logra haciéndola pasar a través de un material no transparente o rebotándola en una superficie semi-reflectante.

**ABSORCIÓN.** Los objetos que no permiten el paso de la luz, absorben parte de esta y reflejan otra parte resultando su color. El color que tiene un objeto determinado es el color que no absorbe su superficie y que se refleja para llegar a nuestros ojos. Si vemos un objeto azul significa que el cuerpo refleja el color azul y absorbe los demás.

**REFRACCIÓN.** Es un fenómeno que ocurre dentro de la transmisión cuando la luz atraviesa un material transparente de forma oblicua (si lo atraviesa en dirección perpendicular no hay refracción). Cuando los rayos luminosos inciden oblicuamente sobre un medio de transporte o pasan de un medio a otro de distinta densidad, experimentan un cambio de dirección. Este fenómeno tiene importancia capital en fotografía, ya que la luz antes de formar la imagen fotográfica ha de cambiar frecuentemente de medio: aire, filtros, vidrios de los objetivos y soporte de película.

## 2.10 CAVITACIÓN

El cambio de fase de líquido a vapor a temperatura constante es lo que caracteriza el desarrollo de la cavitación en un flujo de líquido (fig. 6) [17]. La curva de la figura 6 separa las fases liquido-vapor.

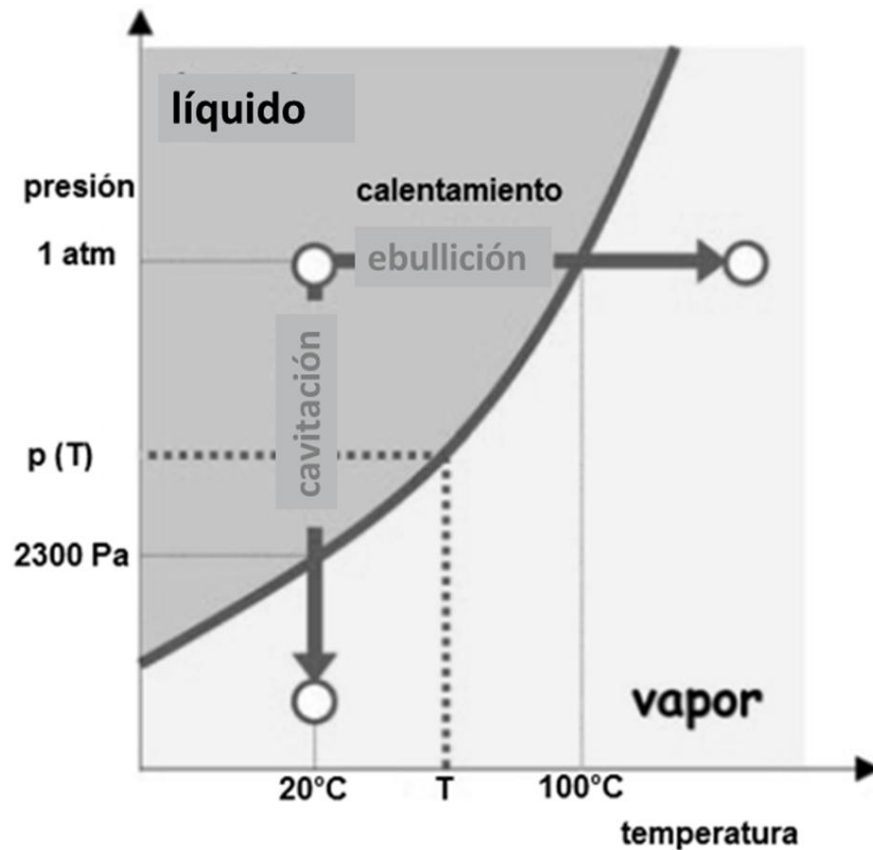


Fig. 6. Diagrama de fases del agua [17].

La curva separa las fases liquido-vapor.

La cavitación está representada por una línea vertical a temperatura constante contrario al clásico calentamiento que corresponde a una línea horizontal a presión constante. Esta es la diferencia entre cavitación y calentamiento. En el calentamiento, hay cambio de fase al incrementar la temperatura y para la cavitación se da al reducir la presión.

Inicio y desarrollo de la cavitación:

Por Bernoulli se sabe que:



$$p + \frac{1}{2}\rho V^2 = \text{constante}$$

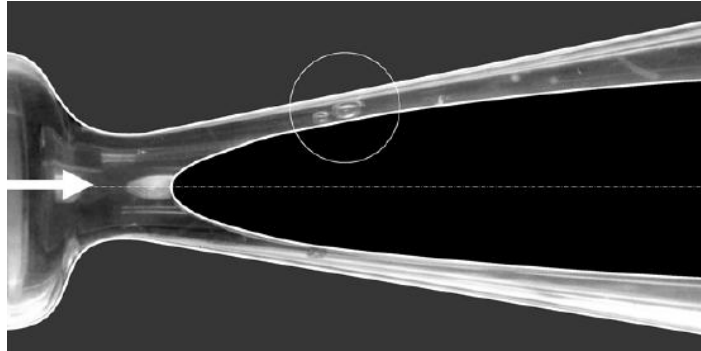


Fig. 7. Inicio de cavitación en un Venturi con un cuerpo central para medir contenido de núcleos [17].

Al incrementar la velocidad de flujo consecuentemente disminuye la presión, y la velocidad del flujo será crítica, para lo cual se determina la presión de vapor en la garganta del Venturi. La cavitación se genera en este punto de operación donde el área es mínima. En la figura 7 se observan dos burbujas, lo que indica el inicio de la cavitación. El desarrollo de la cavitación en el flujo se caracteriza por el crecimiento de estructuras de vapor. Las interfases de vapor líquido tienen varias formas y tipos de cavitación clasificándose de acuerdo a esas características. A continuación se presentan los patrones de cavitación: cavitación de burbuja viajera, cavitación superficial, cavitación vórtice, y cavitación de corte.

**CAVITACIÓN DE BURBUJA VIAJERA.** Se consideran micro-burbujas arrastradas por el flujo conocidas como núcleos de cavitación. Son casi invisibles en el líquido pero se transforman en burbujas de cavitación macroscópicas y atraviesan regiones donde la caída de presión está por debajo de la presión de vapor del líquido.

**CAVITACIÓN SUPERFICIAL.** Se refiere a la cavidad superficial, tal y como se observa en la figura 8. Contrario a la cavitación de burbujas viajeras, estas se pegan a la pared de forma casi permanente, no significa que el flujo se encuentre estable ya que la cavitación es fuente de inestabilidad bastante fuerte.

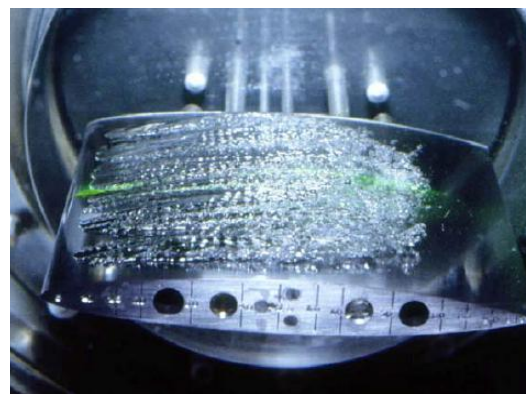


Fig. 8. Cavitación superficial [17].

CAVITACIÓN VÓRTICE . En la figura 9 se muestra este tipo de cavitación, la diferencia de presión en el lado de presión y el de succión del vórtice genera un flujo secundario el cual rodea la orilla naciendo de ahí el vórtice. Debido a las fuerzas centrífugas, la presión en el centro del vórtice es menor que la presión alejada de él, de modo que se espera una presión mínima en el centro del vórtice en donde la cavitación se desarrolla preferentemente en el centro del vórtice.



Fig. 9. Cavitación vórtice, generada por un hidrófilo tridimensional [17].

CAVITACIÓN CIZALLA. En la fig. 10 se observa este tipo de cavitación en la raíz de una cuña. La estela turbulenta se caracteriza por la existencia de varios tipos de estructuras de vórtice coherente. Se originan en dos capas de corte que separan la estela del flujo principal.

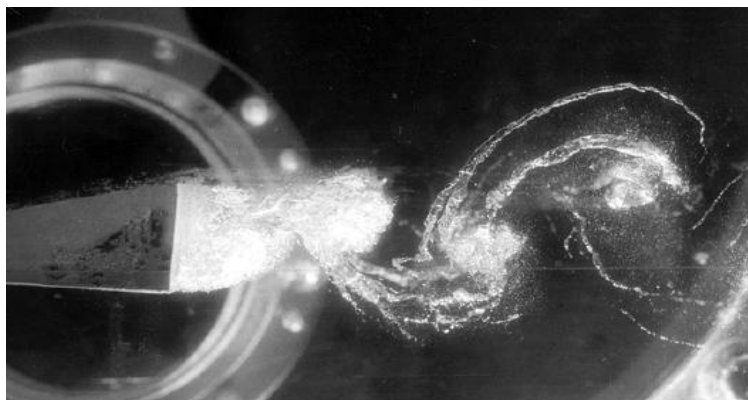


Fig. 10. Ejemplo de cavitación en la estela de un "bluff body" [17]

### 3. DESCRIPCIÓN DEL CIRCUITO HIDRODINÁMICO

#### 3.1 INTRODUCCIÓN

A continuación se hace una descripción del circuito hidrodinámico (fig. 11) diseñado para generación de cavitación empleando líquido **1-2 propanodiol** sometido a ciclos de trabajo experimental, en el cual se implementa la instrumentación, además de los elementos que lo integran como el tubo Venturi, válvulas de control del líquido, control de encendido y de velocidad de la motobomba, tanques principal y auxiliar, además del sistema de enfriamiento, ubicados en el Laboratorio de Pruebas no Destructivas del Instituto de Ingeniería de la UNAM.

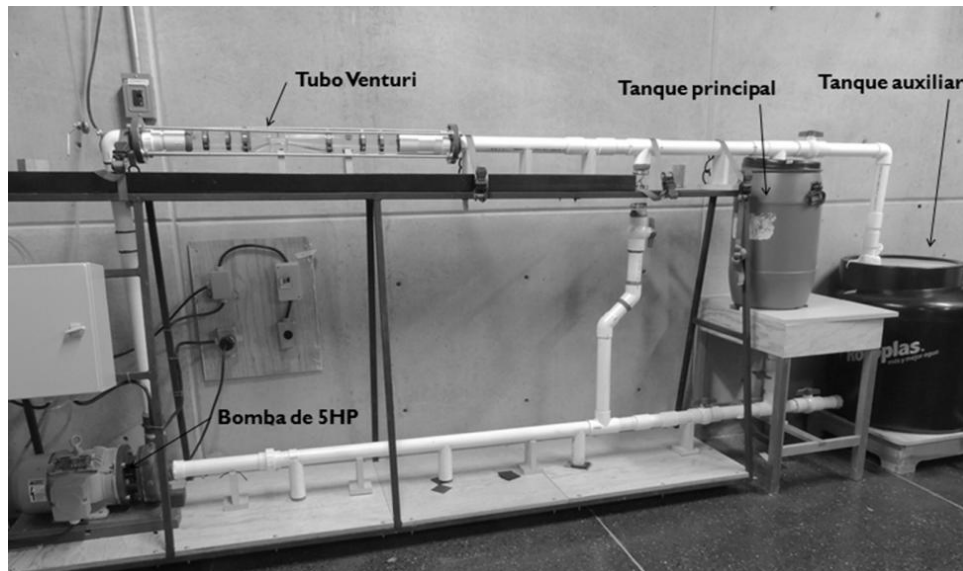


Fig. 11. Circuito hidrodinámico en el Laboratorio de Pruebas no Destructiva

#### 3.2 DESCRIPCIÓN

El circuito hidrodinámico está ensamblado en su mayoría con tubería de polivinilo de cloruro (PVC) de 2 pulgadas de diámetro, cédula 40, alimentado por una motobomba centrífuga de 5 HP. Las dimensiones del circuito son de 1.20 m de alto (sobre el nivel del piso) por 3.30 m de largo. El tramo del tubo vertical central cuenta con una válvula de retroalimentación de flujo con la cual se regula el gasto cavitante (fig. 12). Para aumentar la capacidad de circulación, se incorpora en el tramo horizontal superior un tubo intercambiable de 1.20 m de longitud, conectado un tubo Venturi al centro de este tramo. El Venturi está construido de acrílico transparente de 30 cm de largo (fig. 13), que permite

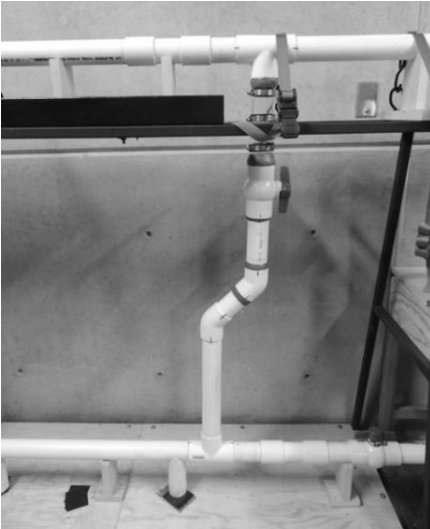


Fig. 12. Tubo de gasto cavitante

visualizar el flujo del líquido al pasar por este, y como refuerzo se considera la utilización de 2 bridas de PVC, cédula 80, colocadas en los extremos del accesorio tubo Venturi, con cuatro espárragos de 3/8 de pulgada por 1.2 m de longitud, tuercas y rondanas [3], con la finalidad de evitar un rompimiento en las uniones del tubo Venturi. Cuenta con un tanque de almacenamiento elevado a 0.80 m. sobre el nivel del piso con una capacidad de 70 l. La descarga de este tanque tiene una válvula de control, conectada al tubo horizontal bajo acoplado a la succión de la bomba y en el extremo opuesto está conectado a un tanque alterno de almacenamiento de 200 l. Este tanque es utilizado para canalizar el líquido cuando es necesario dar mantenimiento al circuito, cambiar un tubo dañado, verificar el estado en que se encuentra la bomba y/o para cambiar o limpiar el líquido.

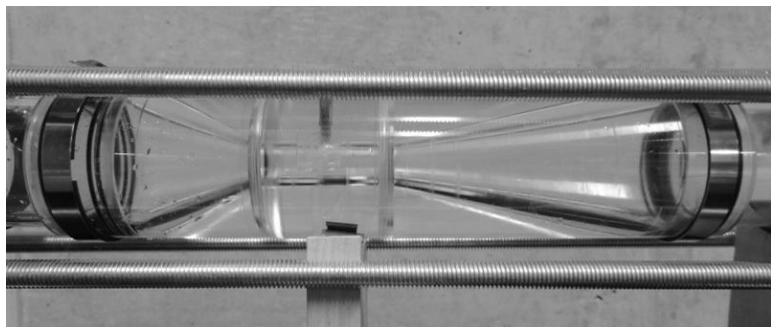


Fig. 13. Espárragos de refuerzo para el tubo Venturi

Dentro del tanque de almacenamiento elevado, se instala un serpentín de tubería de cobre flexible de  $\frac{1}{2}$ "  $\varnothing$  por 40 cm de alto y un diámetro de enrollamiento de 35 cm (ver fig. 15), conectado mediante manguera tipo grado alimenticio y conexiones de cierre rápido a un sistema de enfriamiento modelo ECCLP018A06-E Eco-Chiller (fig. 14), con un

evaporador de placas que consta de un tanque de recirculación de 50 litros de líquido anticongelante, dos bombas de 1/4 HP y un condensador enfriado por aire, con refrigerante ecológico R410a. La función de este sistema es la de enfriar el anticongelante y recircularlo por el serpentín para mantener controlada la temperatura del fluido que circula dentro del sistema. Para construir el serpentín (fig. 15), se toman las dimensiones del tanque principal ya que por este pasa el líquido antes de llegar a la bomba, y el serpentín deberá sumergirse en el tanque (fig. 16). Así que el tamaño del serpentín es de 35 cm de alto por 40 cm de diámetro. La forma cilíndrica del serpentín se toma de la forma de una cubeta de 19 l, ahí se enrolla el tubo flexible dándole la forma y se dejan en un lado los bornes de conexión para la manguera que estará conectada al sistema de enfriamiento (fig. 17). Se dieron una serie de dificultades para conseguir las conexiones, y finalmente fue satisfactorio verlo conectado al sistema de enfriamiento.



Fig. 14. Sistema de enfriamiento para el circuito hidrodinámico



Fig15 Construcción del serpentín



Fig. 16 Serpentin dentro del tanque



Fig. 17 Conexión del serpentin al sistema de enfriamiento

Para alimentación y control de velocidad de la motobomba de 5HP, se emplea un variador de frecuencia, marca YASCAWA\*.

El circuito hidrodinámico se encuentra apoyado en una estructura metálica, con un triplay de tres cuartos de pulgada de espesor como base, atornillada en los tirantes tubulares cuadrados de una pulgada (fig. 18). El tubo horizontal donde se encuentra acoplado el Venturi está apoyado sobre una viga de sección "C" de 10" x 1 ½", y los tirantes tubulares cuadrados se encuentran soldados desde la base hacia la viga horizontal. Fue necesaria la instalación de esta estructura para reducir al máximo las vibraciones generadas por la cavitación y por el funcionamiento de la bomba de recirculación del líquido [3].



Fig. 18. Base de la estructura del Circuito Hidrodinámico

Se tiene conectada al tubo del sistema una manguera para purga de aire, colocada en el codo superior del tubo de salida vertical de la motobomba. Cuenta con una válvula de



control, que al estar abierta permite la salida de aire en cuanto empieza la recirculación del líquido y una vez llena la tubería, se cierra esta válvula verificando que no haya aire dentro del sistema (fig. 19).

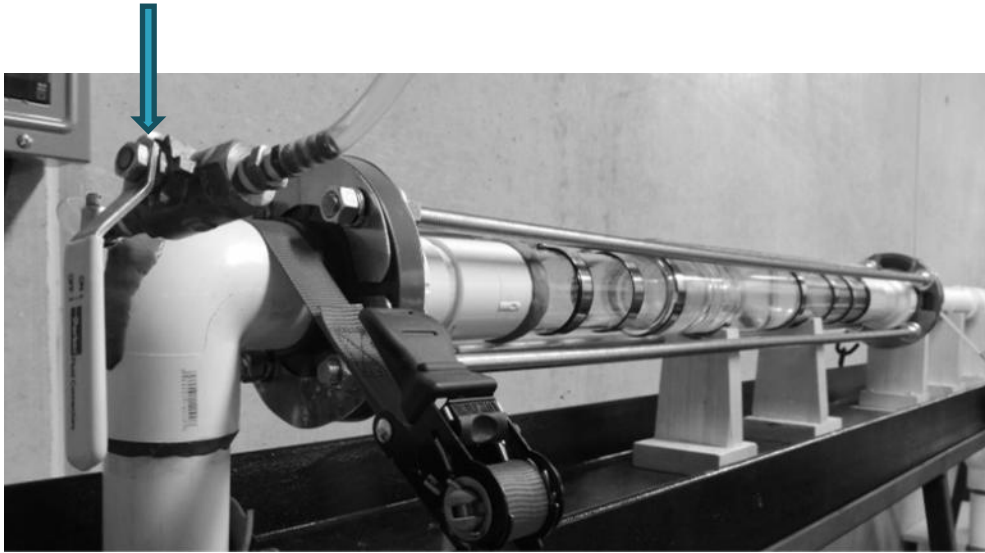


Fig. 19. Válvula para purga de aire en el circuito hidrodinámico.

## 4. SELECCIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE LA INSTRUMENTACIÓN EN EL CIRCUITO HIDRODINÁMICO. CALIBRACIÓN DE INSTRUMENTOS

### 4.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se lleva a cabo la selección de la instrumentación y su implementación al circuito hidrodinámico, aplicada en el tubo Venturi, en el cual se simulan las condiciones de cavitación igual como se desarrolla en las máquinas hidráulicas. Se describe también la calibración para cada uno de los sensores y del equipo instrumental. Se realiza una pequeña modificación al Venturi para posicionar sensores y en lo posible evitar fallas de medición por efecto de las vibraciones del funcionamiento de la motobomba y también por vibraciones que la cavitación genera en el circuito. En la tabla 3 se describe cada sensor y su función en el circuito hidrodinámico.

### 4.2 INSTRUMENTACIÓN SELECCIONADA

La mayoría de los sensores descritos son utilizados frecuentemente en el laboratorio de pruebas no destructivas para diferentes proyectos, sin embargo, la idea misma de este trabajo es aprovechar la instrumentación existente. A continuación en la tabla 3 se presenta una relación de la instrumentación y su correspondiente función dentro del sistema de medición que se implementa. Para el caso del manómetro diferencial, primero se experimenta con uno de 50 cm pero se observa que la diferencia de presiones en el Venturi, rebasa el tamaño de este manómetro, por lo que se diseña uno de mayores dimensiones y se envía al laboratorio de soplado de vidrio de la Facultad de Química para su construcción. Su diseño se realiza con base en la presión absoluta, tomando un valor de referencia de 160 KPa debido a que en trabajos previos relativos a la cavitación en el circuito hidrodinámico tienen valores de presión experimentales de 122 KPa [4]. De la ecuación (2.8.2), se tiene [22]:

$$P_1 - P_2 = \rho_m gh + \rho gb - \rho ga \dots \dots \dots (4.2.1)$$

Donde

$P_1 - P_2$  es la diferencia de presiones [Pa]

$\rho_m$  la densidad del mercurio [ $13600 \text{ Kg/m}^2$ ]

$\rho$  la densidad del propanodiol [ $1036.2 \text{ Kg/m}^2$ ]

$h = b - a$ ...diferencia de altura en manómetro [m]



$g$ .....aceleración gravitatoria en DF [9.78 m/seg<sup>2</sup>]

despejando  $h$  de la ecuación anterior y sustituyendo valores se tiene:

$$h = \frac{P_1 - P_2}{g(\rho_m + \rho)} \dots$$

$$h = \frac{160000}{9.78(13600 + 1036.2)} = 1.12 \text{ mts.}$$

Por lo que se tiene un manómetro de 1.12 mts. Este manómetro se fabrica en las instalaciones del laboratorio de soplado de vidrio de la Fac. de Química de la UNAM.

A continuación se presenta en la tabla 3 la instrumentación seleccionada y su correspondiente función dentro del sistema.

**Tabla 3 Tipo de instrumento y su función.**

<b>TIPO DE SENSOR</b>	<b>FUNCIÓN</b>
<b>Fotomultiplicador Hamamatsu* Serie H5784.</b>	Detección de luminiscencia.
<b>Manómetro diferencial tipo "U".</b>	$\Delta P$ entre garganta y salida del Venturi [mm de Hg].
<b>Termómetro de columna de mercurio de 0 a 100°C).</b>	Lectura de temperatura del <b>propanodiol</b> [°C].
<b>Amperímetro de gancho mca. Acme.</b>	Medición de corriente [A].
<b>Decibelímetro ANSI tipo 2 mod. 452.</b>	Intensidad de ruido [dB].
<b>Osciloscopio digital LeCroy WaveRunner.*</b>	Adquisición de datos de sensor de fuerza, transductor piezoeléctrico y fotomultiplicador.
<b>Variador de frecuencias YASCAWA*</b>	Variador de potencia del motor.
<b>Sensor de fuerza Piezotronics PCB* 200B04.</b>	Intensidad de impacto en paredes del Venturi [mV].
<b>Transductor Piezoeléctrico (2) Olympus V310 de 5MHz.</b>	Adquisición por emisión acústica.
<b>Cámara fotográfica marca NIKON*.</b>	Adquisición de imágenes y audio en Venturi.
<b>Cámara PHANTOM* Mod. Vision Research V710 .</b>	Adquisición de imágenes de alta velocidad

Adicionalmente en el laboratorio de Física y Química se consigue un decibelímetro para adquirir ruido exterior del tubo Venturi. Cabe decir que solo se tenían datos del ruido en el Venturi a través de las grabaciones en la cámara NIKON\*..

### 4.3 IMPLEMENTACIÓN DE LA INSTRUMENTACIÓN

La fig. 20 muestra el diagrama esquemático del sistema hidrodinámico con la instrumentación implementada en los puntos indicados principalmente en el tubo Venturi, en el que se encuentra acoplados los sensores (piezoeléctrico, de fuerza y fotomultiplicador), en conjunto con el decibelímetro, manómetro tipo “U”, amperímetro de gancho cámara fotográfica, control de velocidad y el sistema de refrigeración.

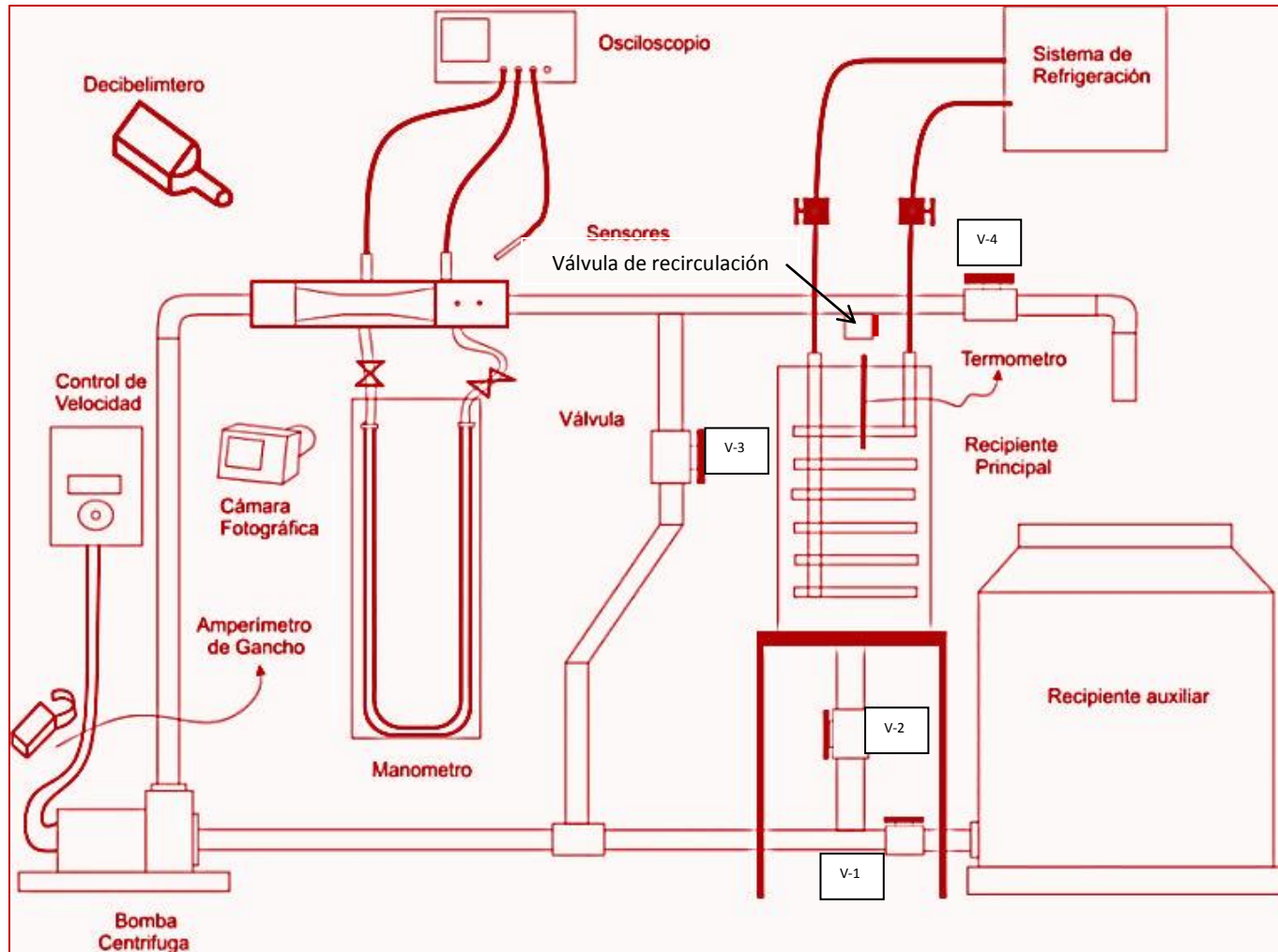


Fig. 20 Circuito Hidrodinámico con la instrumentación implementada

### *SENSOR DE FUERZA PIEZOTRONICS PCB 200B04 (SF)*

Previo a su colocación se hace una adaptación al Venturi de tal forma que quede la superficie completamente plana. Se unta grasa de silicón para una mejor acoplamiento y se coloca el sensor (ver fig. 21).

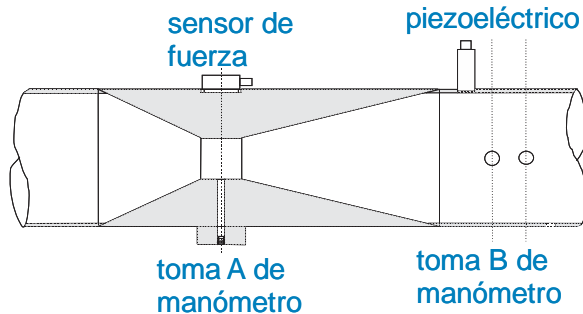


Fig. 21 Ubicación de sensores en Venturi

### *SENSORES PIEZOELÉCTRICOS*

De la misma manera que el sensor de fuerza, para la colocación de los piezoeléctricos se prepara la superficie. También se le aplica grasa de silicón para un mejor contacto del sensor y se fija con una goma cónica y una liga que lo empuja hacia la superficie para asegurar su posición y evitar un posible falso contacto con la pared del tubo Venturi (fig. 22).

### *FOTOMULTIPLICADOR*

Como se observa en la figura 23, se le adaptan dos ventanas de vidrio circulares a la salida del tubo Venturi y se coloca al fotomultiplicador a 10 cm alejado del tubo pero direccionado hacia la ventana cercana al Venturi, sujeto a una base metálica fija (sin que entre en contacto con el tubo del circuito para evitar movimientos bruscos). La idea inicial es colocar dos fotomultiplicadores, pero únicamente se coloca uno solo. Los fotomultiplicadores son extremadamente sensibles a la luz, por lo que para realizar las pruebas es necesario que las luces del laboratorio se encuentren apagadas y evitar la entrada de luz exterior al laboratorio para no provocar un daño irreparable al fotomultiplicador.

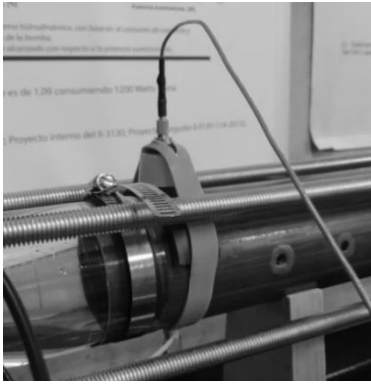


Fig. 22 Posición de piezoeléctricos

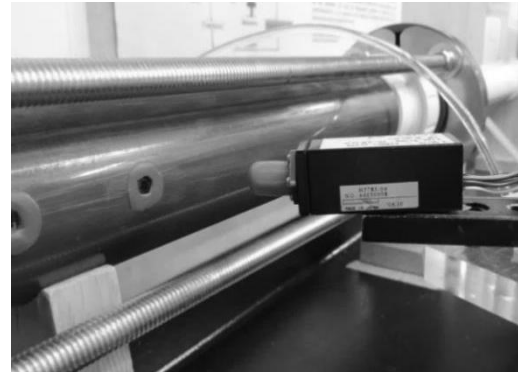


Fig. 23 Posición del fotomultiplicador

### MANÓMETRO DIFEERENCIAL TIPO "U"

El tubo Venturi está fabricado con una entrada capilar en el centro de la garganta para tomar medidas de presión, en ese punto se insertó un conector de bronce de  $\frac{1}{4}$ " de diámetro con su correspondiente válvula tipo aguja la cual asegura un cierre suave y seguro. La otra perforación se hizo a 5 cm de la salida del tubo Venturi y de igual forma se insertó su conector con su válvula. Al manómetro se le conecto en cada extremo una manguera grado alimenticio para acoplarlo en la salida del tubo Venturi. Se fija también a una tabla de 10 centímetros de ancho por 1.2 m de largo y se coloca a la base de madera del circuito (ver figuras 24 y 25).



Fig. 24 Válvula tipo aguja y conector

### TERMÓMETRO DE COLUMNA DE Hg

Este termómetro se coloca dentro del tanque principal, se fija con el bulbo de mercurio sumergido en el **propanodiol** y la parte de la escala de temperatura fuera de él, se fija a la válvula de descarga al tanque evitando que se suelte dentro. Se tiene la información constante de la temperatura de trabajo previamente establecida al



Fig. 25 Manómetro tipo "U"

realizar la corrida experimental.

### *CÁMARA FOTOGRÁFICA NIKON*

Cámara de 16 mega pixeles, resolución y nitidez en imagen, captura de video en HD. Cuenta con micrófono interno, se utiliza para adquisición del audio (ruido externo) generado por la cavitación, se hace un acercamiento al Venturi de aproximadamente 10 cm. También se utiliza para captura de imágenes del flujo en la sección del Venturi y ocasionalmente se hacen tomas de video. No se fijó en algún lugar cerca del Venturi debido al poco espacio.

### *AMPERÍMETRO DE GANCHO*

El gancho del amperímetro se coloca en una de las fases de conexión a la motobomba de tal forma que el cable pasa dentro del gancho (fig. 26) para obtener la lectura de la corriente que circula en el motor.



Fig. 26 Amperímetro de gancho

### *DECIBELÍMETRO ANSI, TIPO 2 , MODELO 452*

Este decibelímetro (fig. 27) está diseñado para manejarse con una sola mano y así para cada lectura se hace el acercamiento del instrumento a diez centímetros del tubo venturi, se presiona y se mantiene la tecla de encendido y se adquiere la lectura inmediatamente después.



Fig. 27 Decibelímetro

### OSCILOSCOPIO LECROY\*

Para la instalación del osciloscopio se coloca sobre una mesa de trabajo para conectar cada uno de los sensores a las entradas correspondientes previamente asignadas (fig. 28). En general los instrumentos electrónicos de medición tienen la característica que deben conectarse y encender hasta veinte minutos antes de cada prueba para que su funcionamiento sea estable.

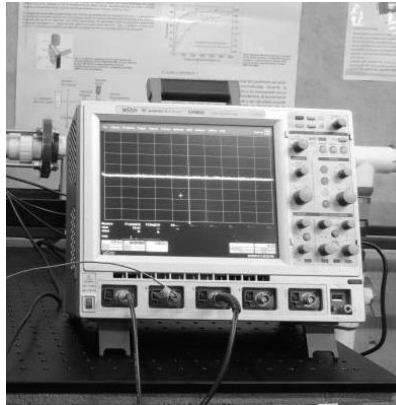


Fig. 28 Osciloscopio WAVE RUNNER\*

Una vez instalado, se hace la asignación del sensor por canal del osciloscopio (tabla 4), como se indica a continuación:

**Tabla 4. Sensores y su correspondiente canal de conexión al osciloscopio para la segunda prueba de adquisición de datos.**

<i>Canal del osciloscopio</i>	<i>Tipo de sensor</i>
1	Sensor de fuerza PCB Piezotronics*
2	Piezoeléctrico 5 MHz
3	Fotomultiplicador HAMAMTSU*
4	s/c

**Tabla 5. Especificaciones del osciloscopio LeCroy Wave Runner Xi-A**

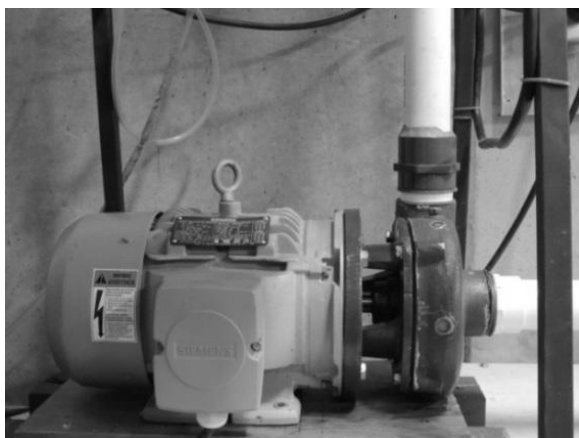
<b>Parámetro</b>		<b>Unidad</b>
Ancho de banda nominal	1	Ghz
Tiempo de subida	350	Ps
Canales de entrada	4	1, 2, 3 y 4
Impedancia de entrada	1	MΩ
Acoplamiento de entrada	50: DC; 1: AC, DC, GND	MΩ
Voltaje máximo de entrada	50 Ω: $5 V_{rms}$ , 1 MΩ: $250 V_{máx}$	V
Conector tipo para entrada	ProBus/BNC	Pza.

## CONTROL DE VELOCIDAD DE LA MOTOBOMBA

En general este tipo de variadores de velocidad emplean la electrónica de potencia para controlar la frecuencia del voltaje de entrada y la velocidad del motor. Se utilizan para control de velocidad de bombas, ventiladores etc. (fig. 29). Se encuentra instalado junto a la motobomba (fig. 30), es un dispositivo de gran ayuda ya que los cambios de velocidad son muy suaves.

**Tabla 6. Especificaciones control velocidad**

<b>Entrada Voltaje</b>	200-240 V
<b>Frecuencia</b>	50/60 Hz
<b>Corriente</b>	24 A/18.9 A
<b>Número de polos</b>	3 polos
<b>Salida Voltaje</b>	0-240 V
<b>Frecuencia</b>	0-400 Hz
<b>Corriente</b>	19.6 A/17.5 A
<b>Número de polos</b>	3 polos



**Fig. 30 Bomba Centrifuga**



**Fig. 29 Control de velocidad YASCAWA\***

**Tabla 7. Especificaciones de la bomba**

<b>Potencia [Kw]</b>	5 HP (3.73)
<b>Frecuencia [Hz]</b>	60
<b>Voltaje [V]</b>	208-230/460
<b>Corriente [A]</b>	13.5-12.5 /6.2
<b>Número de polos</b>	3 polos



Un detalle importante fue el de hacer el cambio de impulsor, ya que se tenía uno de prueba para generación de nucleaciones y se coloca el impulsor original de la motobomba que también se había modificado con una cintilla metálica con ranuras, por lo que se procede a vaciar el circuito hidrodinámico lleno de *propanodiol* y se deposita dentro del tanque auxiliar, se destornilla la bomba, se separa la mitad de la carcasa para descubrir el impulsor. Se destornilla la tuerca central que fija el impulsor y con un extractor se retira el impulsor. Se coloca el impulsor original y con golpes ligeros y bien distribuidos se va introduciendo hasta llegar al tope. Se coloca nuevamente la tuerca central y se coloca en su lugar la mitad de carcasa. Se tiene el cuidado de mantener la junta en su lugar (fig. 31).

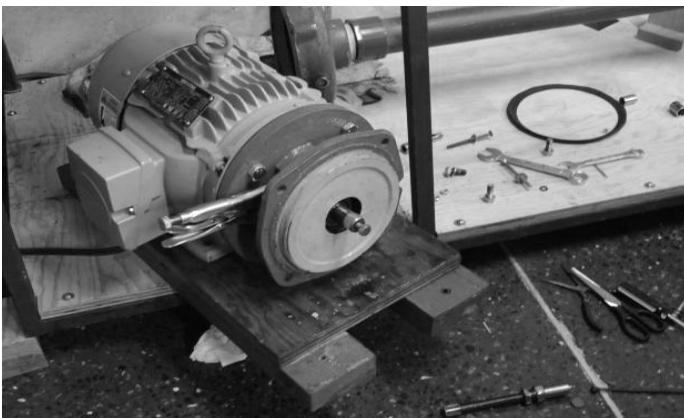


Fig. 31 Preparación para montaje del impulsor

#### 4.4 CALIBRACIÓN DE INSTRUMENTOS

En términos simples, la calibración significa comparación de un instrumento contra uno patrón y la finalidad de la calibración es disminuir los errores. Los procedimientos de



calibración implican una comparación del instrumento contra: 1). un patrón primario, 2). un patrón secundario con mayor exactitud que la del instrumento que se calibra, o 3). con una fuente de entrada conocida [12]. Hay instrumentos y sensores que por su diseño son calibrados de fábrica, incluso no incluyen esa información en el manual de operación correspondiente respecto a su calibración.

#### **a. TERMÓMETRO:**

La calibración de los termómetros de columna, se realiza en recipientes con agua fría y agua caliente para encontrar sus puntos de congelación y ebullición respectivamente que también se les llama baños de temperatura [18].

Procedimiento:

1. Se anotan datos del termómetro como el del fabricante, número de serie y fecha de fabricación.
2. Se anota el intervalo de temperatura de medición del termómetro.
3. Se anota la precisión del termómetro.
4. Verificar si el termómetro es de inmersión total o parcial.
5. Verificar ausencia de fugas del líquido del termómetro.

Calibración en punto de congelación:

1. Se llena un recipiente de espuma de poliestireno con pedazos de hielo.
2. Se agrega agua destilada previamente enfriada cubriendo el hielo sin que flote el hielo.
3. Se mezclan agua y hielo.
4. Se introduce el termómetro, sosteniéndolo con algún cordón de tal forma que no se toque con los dedos.
5. Mantenerlo durante 10 minutos para que se estabilice la lectura.
6. Tomar la lectura (0°C) es el punto de congelamiento del agua.

Calibración en punto de ebullición del agua

1. Colocar en parrilla de calentamiento un matraz con 500 ml de agua destilada.
2. Encender parrilla hasta que el agua alcance el punto de ebullición.
3. Después de calentada el agua se introduce el termómetro y se deja durante diez minutos dentro del matraz para estabilizar la lectura.
4. El punto de ebullición del agua es muy sensitivo a la presión atmosférica.

*Tabla 8. Determinación del punto de ebullición de acuerdo a la presión atmosférica.*

Presión Atmosférica [mmHg]	Punto de ebullición [°C]
760	99.996
750	99.629
740	99.257
730	98.880
720	98.499
710	98.112
700	97.720
690	97.323
680	96.921
670	96.512
660	96.098
650	95.676
640	95.249
630	94.814
620	94.371
610	93.921

### b. MANÓMETRO EN "U"

Es de los instrumentos más exactos para medición de presión aunque limitados, ya que el intervalo de operación es de 0 hasta 200 KPa (30 psi). Es un tubo de sección transversal constante (fig. 32). Se llena con líquido de mayor densidad que el fluido del proceso a medir, no miscible con el agua [19]. En realidad para su calibración se necesita que la escala sea dibujada con el apoyo de un medidor de metal en escalas de milímetros, una vez trazada la escala milimétricamente con sus valores y los datos de las lecturas realizadas, se coteja con una de las lecturas ya realizada.

Si  $P_1 > P_2$  es un manómetro en "U"

Si  $P_1 < P_2$  es un vacuómetro en "U"

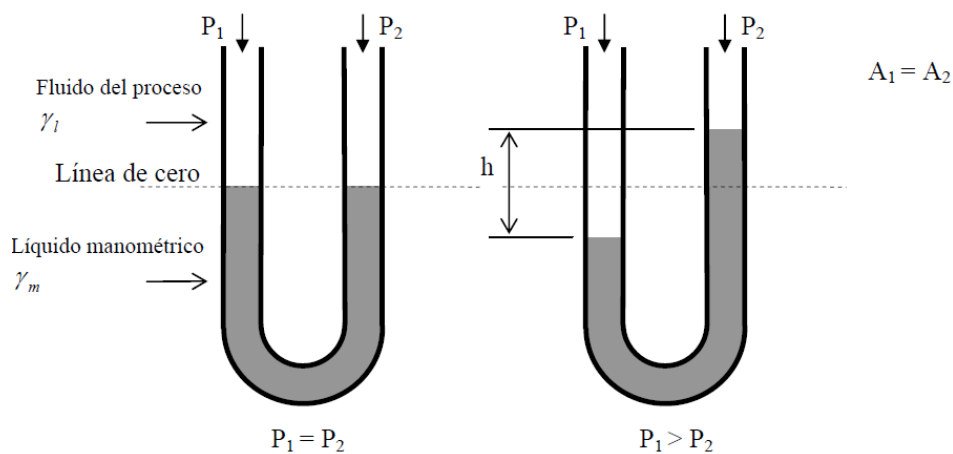


Fig. 32. Esquema de un manómetro tipo "U"

### ***c. SENSOR PIEZOELÉCTRICO MCA OLYMPUS PANAMETRICS V310***

Existe poca información para la realización de la calibración del sensor piezoeléctrico, sin embargo, el modelo empleado en el laboratorio coincide con el trabajo de tesis realizado en 2012, en el cual se realiza un procedimiento muy completo para la calibración del sensor piezoeléctrico (de energía).

La calibración del detector se realiza a través de un análisis estadístico y una regresión lineal de datos de cinco experimentos en los cuales se realiza un barrido de diez niveles de energía cada uno, utilizándose como referencia el medidor que tiene integrado el láser [20].

### ***d. MEDIDOR DE NIVEL DE SONIDO (SONÓMETRO) ANSI TIPO 2, MODELO 452 (Scott/ Instruments Laboratories)***

En general, la calibración de los sonómetros se realiza por el fabricante en propios laboratorios y se hace por comparación sobre un micrófono de precisión cuya calibración es trazable para los estándares de la Oficina Nacional de Normas (NBS por sus siglas en inglés). Los componentes y circuitos de este modelo de sonómetro son extremadamente estables y en uso normal no se espera cambio alguno en la calibración [21].

Para su calibración, se realiza el siguiente procedimiento:

- i) Se ajusta el control del calibrador entre 100 a 110, se conecta el micrófono al sonómetro.
- 2i) Los selectores “weighting” y “meter” se dejan en la posición que se encuentren.

Encender el calibrador y el sonómetro.

Una vez estabilizado la lectura indicará en 6 (106 dB).

Si la lectura esta ligeramente fuera del intervalo, ajustar con el desarmador.

Una de las recomendaciones que da el fabricante es que se repita la calibración cada año de forma regular.

### ***e. OSCILOSCOPIO LeCroy WAVERUNNER***

En general, para cualquier osciloscopio la calibración se realiza de la siguiente manera:

1. Conectar la punta para osciloscopio a la terminal “PROBE ADJUST” a cualquier canal del osciloscopio (el valor de la señal es de 1 a 5 Vpp, dependiendo del fabricante).
2. Ajustar perillas vertical (voltaje) y horizontal (tiempo) hasta tener la señal dentro de la retícula de la pantalla.

3. Ajustar la perilla "FOCUS" hasta que la línea de la señal sea clara y nítida.
4. Determinar el número de divisiones verticalmente y multiplicar por el valor indicado en la perilla de voltaje (volts/div).
5. Determinar el número de divisiones horizontalmente (lo que dura un periodo de tiempo) y multiplicar por el valor indicado en la perilla de tiempo (s/div).
6. Verificar que los valores obtenidos de voltaje vs tiempo corresponden al valor indicado por la terminal "PROBE ADJUST".
7. Para calcular la frecuencia, dividir 1 entre el periodo de tiempo.

*f. FOTOMULTIPLICADOR HAMAMATSU*

Para calibrar un fotomultiplicador se determina el punto de operación al que se tiene una ganancia de  $10^7$ , y determinar la homogeneidad del fotocátodo utilizando una fuente de luz pulsada con la que se barre la superficie y se mide la carga del pulso producido por el fotomultiplicador [ver tabla 18 en cap. 9].

## 5. METODOLOGÍA PARA PREPARACION Y REALIZACIÓN DE PRUEBAS

Antes del inicio de las pruebas y previo a la instrumentación es necesario seguir esta metodología y verificar el funcionamiento del circuito hidrodinámico para evitar algún problema no previsto. Se trata sobre todo que al implementar equipos e instrumentos se encuentre en condiciones óptimas para realizar la prueba o pruebas correspondientes y minimizar la posibilidad de fallas.

### 5.1 METODOLOGÍA PARA PREPARACIÓN DE PRUEBAS

La idea es de observar a simple vista el funcionamiento del sistema hidrodinámico y verificar que no exista alguna fuga del fluido, aunque se emplea únicamente el termómetro colocado dentro del tanque de recirculación y el amperímetro de gancho necesarios para no perder de vista esos parámetros, por lo que se sigue la siguiente metodología:

#### a. Llenado del circuito hidrodinámico con *propanodiol*.

-Se abre la válvula de salida del recipiente auxiliar V1 (ver fig.20) y lentamente se deja correr el fluido hasta llenar el tubo bajo horizontal de succión de la bomba, y se mantiene cerrada la válvula de descarga V4 al recipiente auxiliar, la válvula V2 se mantiene abierta.

-Se inicia la operación de la bomba manteniendo al 15% de su velocidad. Se inicia la recirculación del fluido hasta que alcanza a cubrir a la válvula de descarga que baja dentro del tanque de recirculación y se cierra en seguida la válvula V1.

-La válvula reguladora de flujo V3 se cierra hasta un cuarto de su apertura para mantener constante el flujo.

#### b. Funcionamiento del Sistema.

-Una vez lleno el sistema y manteniendo durante 10 minutos la operación de la bomba, se observa a través del Venturi que no haya burbujas de aire dentro.

-En caso de que se observen algunas burbujas se regula la válvula de purga que esta insertada en el codo del tubo vertical de salida de la bomba. Por esta válvula se purga el aire y al entrar en operación el circuito hidrodinámico se mantiene abierta hasta observar que ya no haya burbuja dentro.

-Se deja recirculando el fluido que pasa por el tanque principal de 70 litros. En estas condiciones se observa que no exista fuga del fluido en alguna unión o bien en la propia bomba. Se incrementa paulatinamente la velocidad del motor hasta alcanzar 39 % de funcionamiento.

-Se observa el funcionamiento del circuito durante cinco minutos de operación en ese porcentaje y se disminuye poco a poco la velocidad de la bomba, en seguida se apaga.

## 5.2 REALIZACIÓN DE PRUEBAS

### A) Adquisición de datos

-Una vez verificada la inexistencia de fugas de líquido en el circuito aplicado el método anterior, se implementa con la siguiente instrumentación para adquisición de sus correspondientes variables:

1. Termómetro de columna (temperatura, °C)
1. Amperímetro de gancho (corriente, **A**)
2. Manómetro diferencial (diferencia de presión, **mm de Hg**)
3. Decibelímetro (intensidad de ruido, **dB**)
4. Cámara fotográfica (adquisición de audio)
5. Osciloscopio (señales de fuerza, presión y luminiscencia, **mV**)
6. Cámara PHANTOM (imágenes del flujo en Venturi).

-Y se incrementa paulatinamente la potencia de la bomba hasta el 20 % y a partir de entonces se inician incrementos de 1% entre cada lectura para la adquisición de datos.

Una vez terminada estas pruebas se disminuye poco a poco la potencia de la bomba hasta apagar el sistema.

Con esta prueba se hacen algunas apreciaciones:

Al incrementar la velocidad de la bomba, se forman las burbujas dentro del tubo Venturi, también se genera ruido parecido con el golpeteo continuo de canicas dentro de una cubeta. Después de 25 minutos de operación del sistema, la temperatura inicial de 25°C, se incrementa hasta 31°C (fig. 33), por lo que se hacen las siguientes observaciones:

1. La formación de burbujas (fig. 34) se inicia en la garganta en el tubo Venturi. Prácticamente desde el inicio del arranque de la bomba (20% de potencia de la bomba).
2. El ruido y la cantidad de burbujas crece al incrementar la velocidad del fluido.
3. Hay saturación de ruido y de burbujas cuando se alcanza el 39% de la potencia de la bomba.
4. La temperatura del fluido se incrementa debido principalmente a la cavitación (6°C durante los 25 minutos de operación).



Fig. 33. Verificación del incremento de la temperatura

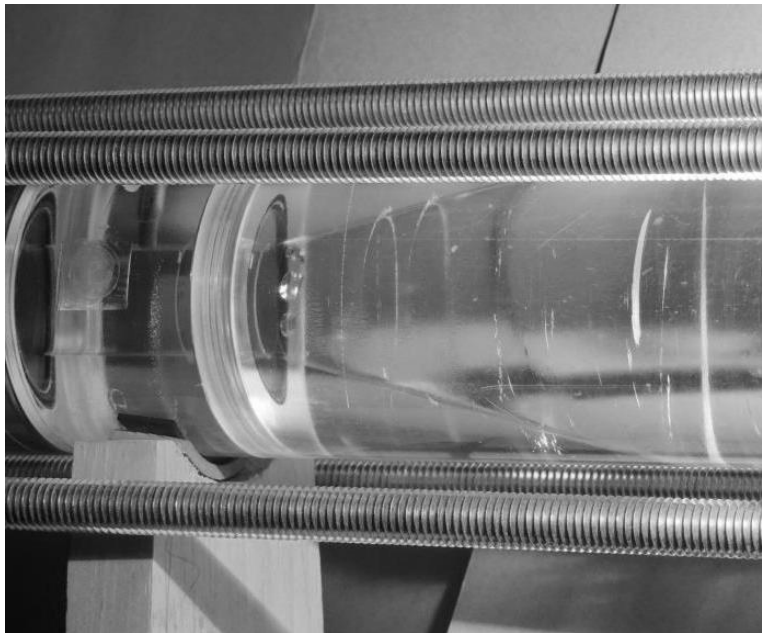


Fig. 34. Inicio de la formación de burbujas dentro del Venturi

A continuación se realizan las pruebas para adquisición de audio, imágenes de fotografía y de video siguiendo el procedimiento descrito en el capítulo anterior y se implementa la instrumentación en el circuito hidrodinámico (tabla 9).

## B). Adquisición de audio e imágenes de fotografía y de video

Para esta prueba, se implementa la siguiente instrumentación:

**Tabla 9. Instrumentación utilizada para adquisición de audio, fotografía y video.**

INSTRUMENTO UTILIZADO	FUNCIÓN
Cámara PHANTOM mod. Visión Research V710	Captura de imagen
Cámara fotográfica NIKON	Captura de audio (ruido)
Termómetro [°C]	Medición de temperatura [°C]
Amperímetro de Gancho	Medición de corriente [A]
Fotomultiplicador	Detección de luminiscencia

### Procedimiento:

Se incrementa lentamente la potencia de la bomba, aunque en la prueba anterior se ve que desde el 20% de operación se inicia la generación de burbujas. Al llegar al 30% se observan algunos efectos del inicio de la cavitación, incremento de burbujas e incremento de la temperatura del fluido, ruido, y cuando alcanza el 40% el circuito se encuentra en condiciones de cavitación, donde a partir de la garganta del Venturi se observa una intensa nube de burbujas continua. En esas condiciones, se adquieren imágenes de fotografía y video, fotografías rápidas y audio.

**Tabla 10. Condiciones del arranque de la prueba.**

Corriente de operación:	7.5 Amp. ( 32.7%)
Temperatura inicial del fluido:	25°C
Temperatura final del fluido:	31° C
Tiempo de operación de la prueba:	20 min

Un detalle que no se dejó pasar por alto fue el observar a simple vista la luminiscencia en el Venturi. Para ello se cubren ventanas para evitar la entrada de luz del exterior al interior



del laboratorio (fig. 35), se cubren los leds luminosos de los equipos de medición utilizados en el momento y se apagan luces. Se dejan pasar 10 minutos para adaptarse a las condiciones de oscuridad, entonces se inicia el arranque del circuito y poco a poco se llega al 38% (fig. 36), de la potencia de trabajo de la bomba, donde se da la cavitación. Se observan esporádicos destellos luminosos en el lado divergente del Venturi de una duración aproximada de 9 ns [1], luces color azul muy tenues apenas perceptibles por el ojo humano.



**Fig. 35** Aspecto del laboratorio durante las pruebas con la cámara PHANTOM

En estas mismas condiciones se adquirieron fotografías y películas con la cámara PHANTOM (fig. 37), se intenta obtener imágenes de los destellos que se apreciaron a simple vista, pero fue complicado retener la imagen de la luminiscencia, debido a la duración de la luz. También se captura ruido con el micrófono interno de la cámara NIKON.



**Fig. 36** Imágenes del fenómeno de la cavitación al 38% de la potencia de la bomba con cámara NIKON.



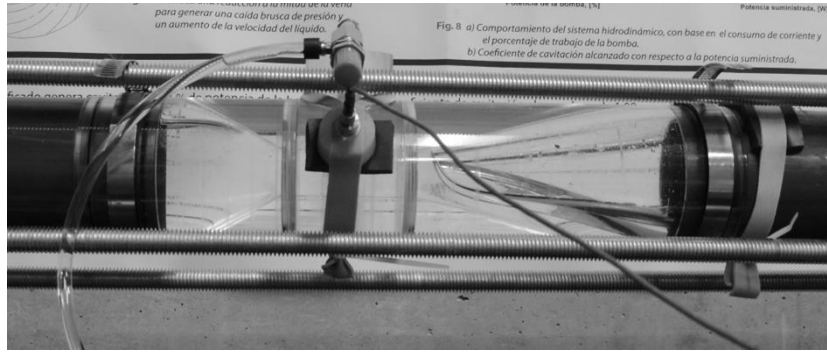
Fig. 37 Una de las imágenes con cámara PHANTOM

En la tabla 11, se presenta el número de lecturas y los porcentajes de incrementos de velocidad de la motobomba, así como el tiempo de duración de la grabación.

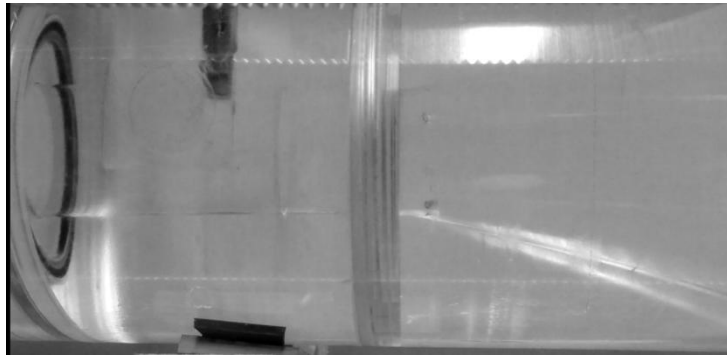
**Tabla 11 Tiempo de grabación con la cámara PHANTOM**

No. captura	Pot de bomba%	Corriente Amperes	T grabación (s)	Efecto producido por la cavitación
1	30	7.5	16	Inicio formación burbujas y ruido (fig. 39).
2	35	8.0	10	Aumento de burbujas
3	36	8.25	06	Se escucha ruido burbujas y se incrementa la temperatura (imagen fig. 40).
4	38	8.65	07	
5	39	8.95	06	
6	39	8-95	08	Se intensifica ruido y formación de nubes de burbujas.
7	39	8.95	15	
8	40	9.25	11	Fluyen nubes de burbujas, ruido intenso.
9	41	9.55	10	
10	41	9.55	21	
11	42	9.95	18	Fuerte ruido y vibración con flujo completamente blanco de burbujas.
12	43	11.1	21	Cavitación.

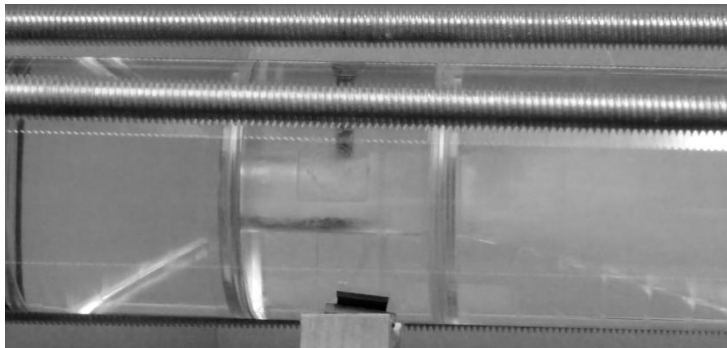
\*Estado de la cámara PHANTOM: 35000 cuadros/s; Resolución: 512x128; 38  $\mu$ s. de respuesta



**Fig. 38 Venturi instrumentado para la captura de imágenes de video y fotografía**



**Fig.39 Formación de burbujas al 24 % de operación de la motobomba**



**Fig. 40 Cavitación al 36% de operación de la motobomba**

### C). Adquisición de datos con sistema de enfriamiento.

Hay que mencionar que para esta prueba para adquisición de datos, se incluye el sistema de enfriamiento referenciado anteriormente con el serpentín inmerso en el tanque principal, además se integra a la instrumentación el manómetro diferencial tipo U.

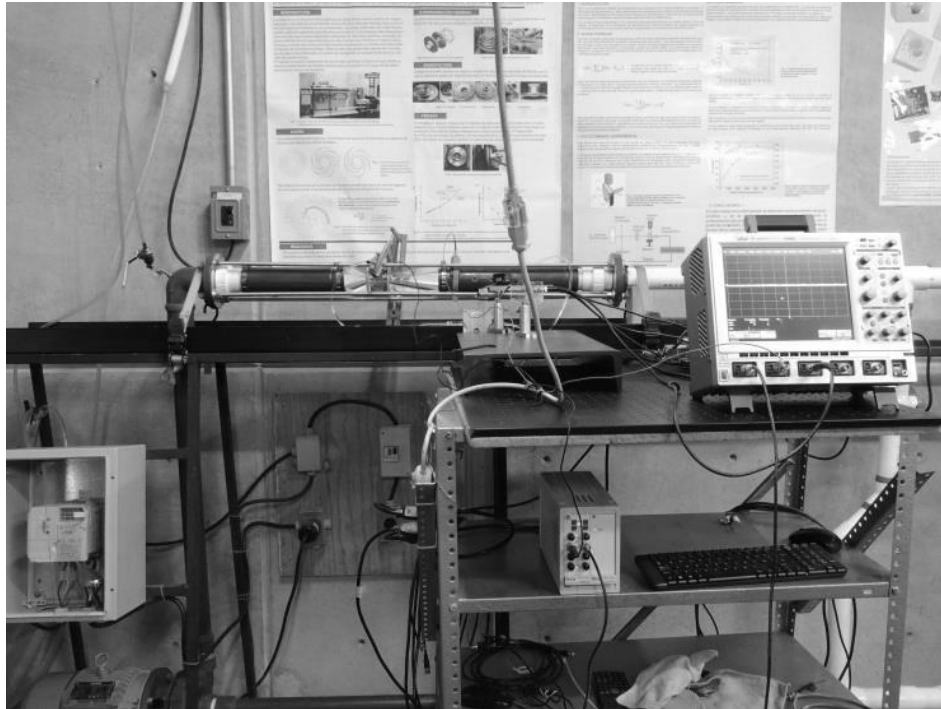


Fig. 41. Circuito hidrodinámico instrumentado

Una vez complementada y preparada la instrumentación (fig. 41) se da inicio a esta segunda prueba conforme a la descripción hecha para cada sensor. Cabe aclarar que se tenían considerados dos piezoeléctricos, pero se complica un poco, debido al espacio del tornillo de presión que se utiliza para aplicarle la presión requerida al sensor de fuerza como parte de su calibración, así que solo se instala uno a la salida del Venturi. El fotomultiplicador no tuvo mayor problema ya que se fija en la mesa de trabajo y se acerca a la distancia de 10 cm alejado de la ventana.

#### Desarrollo experimental

Se inicia con el arranque del sistema de enfriamiento, siguiendo el procedimiento igual al de la primera prueba pero elevando la velocidad del motor con incrementos del 1%, iniciando en 20%, hasta alcanzar el 40% de trabajo de la bomba. Esta prueba se realiza con el laboratorio en condiciones de obscuridad ya que como se menciona anteriormente, el

fotomultiplicador es muy sensible a la luz y fácilmente se daña. La siguiente tabla es el resumen de los datos obtenidos de las 20 lecturas al incrementar la potencia de la bomba, con sus observaciones.

Tabla 12 Datos obtenidos de la prueba complementaria (fecha prueba:25 de febrero del 2015)

% Pot. Bomba	Corriente [A] (1)	Temp [° C]	P abs. [kPa]	Ruido [dB]	Observaciones directas
21	4.4±0.04	14	82439.9	88	
22	4.6±0.01	14	82539.2	88	
23	4.8±0.05	14	82726.5	88	Formación de las primeras burbujas
24	5.1±0.02	14	82859.9	88	Se escucha ligeramente ruido del flujo
25	5.3±0.03	14	82926.5	88	
26	5.4±0.11	14.5	83859.8	89	Crece número de burbujas y ruido
27	5.8±0.02	14.5	86659.6	89	
28	6.0±0.08	15	88526.1	89	
29	6.2±0.02	15	89192.7	88.5	
30	6.5±0.02	15	90525.9	89	Se observa incremento importante de burbujas
31	6.8±0.03	16	93325.7	89.2	
32	7.1±0.02	16	96658.6	98.5	El ruido ya es más intenso y se siente mayor vibración en el tubo
33	7.4±0.02	17	98658.6	99	
34	7.7±0.02	17.5	102524.9	99	Se observa una nube de burbujas constante y el ruido es muy intenso
35	8.0±0.07	18	105191.4	99	
36	8.2±0.02	18	106524.6	99	
37	8.5±0.01	18	109324.4	99	
38	8.9±0.02	18.5	113324.1	99	
39	9.2±0.01	19	118390.3	99	
40	9.7±0.01	20	159320.3	119	Se crea una densa nube de burbujas y ruido muy intenso

Notas:

1. El valor de la corriente corresponde a su promedio por cada cambio de valor del porcentaje de la potencia de la bomba.
2. La diferencia de presiones se da en términos de presión absoluta que se define con la siguiente ecuación:

$$P_{abs} = P_{man} + P_{atm}$$

Dónde  $P_{abs}$ =Presión absoluta

$P_{man}$  = Presión manométrica en D. F.

$P_{atm}$  = Presión atmosférica

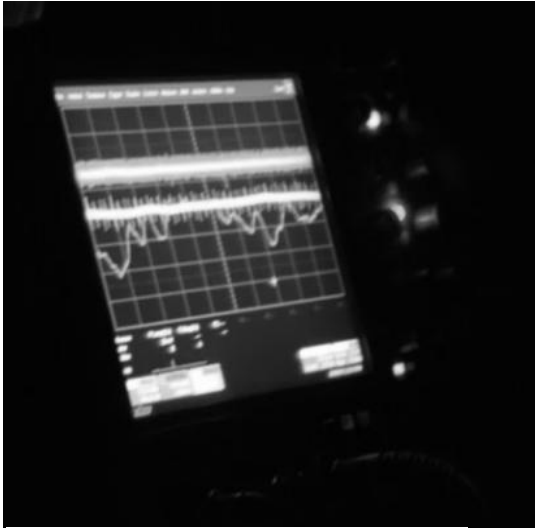


Fig 42 Imágen grafica en osciloscopio

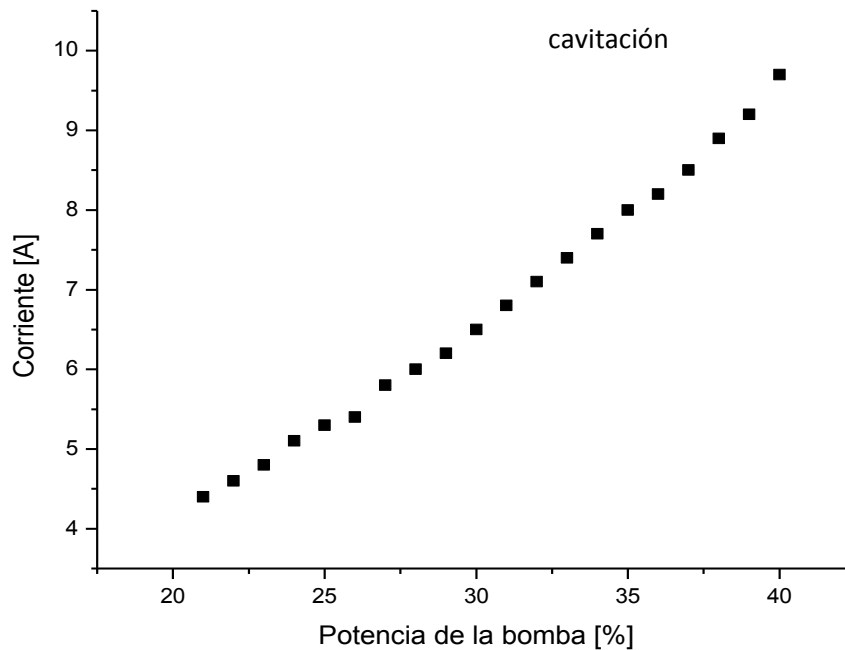


Fig. 43 Adquisición de datos en manómetro

## 6 RESULTADOS Y ANÁLISIS

A partir de las pruebas realizadas anteriormente, se adquieren datos (ver tabla 12) y señales, de las variables involucradas que permiten el análisis y estudio de la cavitación. A continuación se presentan las gráficas generadas a partir de los datos obtenidos de al hacer variar la potencia de la bomba contra las variables generadas por la cavitación como corriente (A), diferencia de presiones (kPa), temperatura (°C)

### 6.1 GRÁFICA CORRIENTE [A] VS POTENCIA DE LA BOMBA [%]



Gráfica 1. Relación corriente vs Potencia de la Bomba. En las lecturas 39 y 40, se observa un ligero incremento en el consumo de corriente debido a la presencia de cavitación máxima.

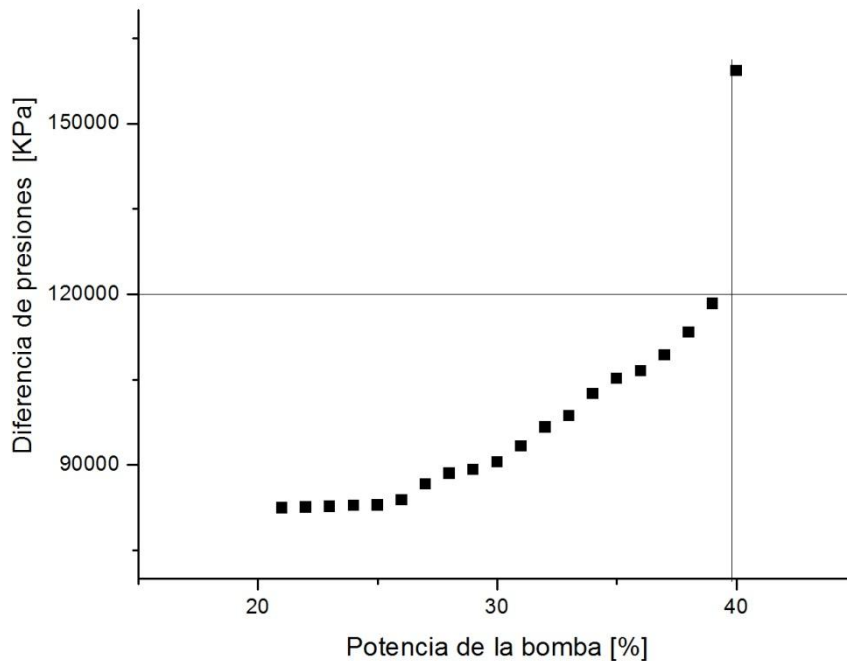
**Tabla 13. Adquisición de datos de corriente [A] vs Potencia de la bomba [%].**

[%]	<b>21</b>	<b>22</b>	<b>23</b>	<b>24</b>	<b>25</b>	<b>26</b>	<b>27</b>	<b>28</b>	<b>29</b>	<b>30</b>
[A]	4.4	4.6	4.8	5.1	5.3	5.4	5.8	6.0	6.2	6.5
[%]	<b>31</b>	<b>32</b>	<b>33</b>	<b>34</b>	<b>35</b>	<b>36</b>	<b>37</b>	<b>38</b>	<b>39</b>	<b>40</b>
[A]	6.8	7.1	7.4	7.7	8.0	8.2	8.5	8.9	9.2	9.70

En la gráfica no. 1 se observan los cambios de corriente con respecto a la potencia de la bomba. En intervalo del 39 al 40% se observa un incremento ligeramente mayor que en los anteriores, debido al desarrollo de la cavitación de mayor intensidad en ese intervalo.

## 6.2 GRÁFICA DIFERENCIA DE PRESIONES (kPa) VS POTENCIA DE LA BOMBA (%)

La siguiente gráfica se obtiene a partir de la adquisición de datos obtenidos del manómetro diferencial. Se observa que a partir del 25% inicia un incremento de presión más significativo que en los puntos anteriores.



Gráfica. 2. Diferencia de presión vs Potencia de la bomba. En este caso es más visible el cambio de presiones con la presencia de la cavitación, y es más notorio a partir del 25% de operación de la potencia de la bomba en adelante ya que se observa una elevación de la curva en ese intervalo.

**Tabla 14. Adquisición de datos de Diferencia de presión [Pa] vs Potencia de la bomba [%].**

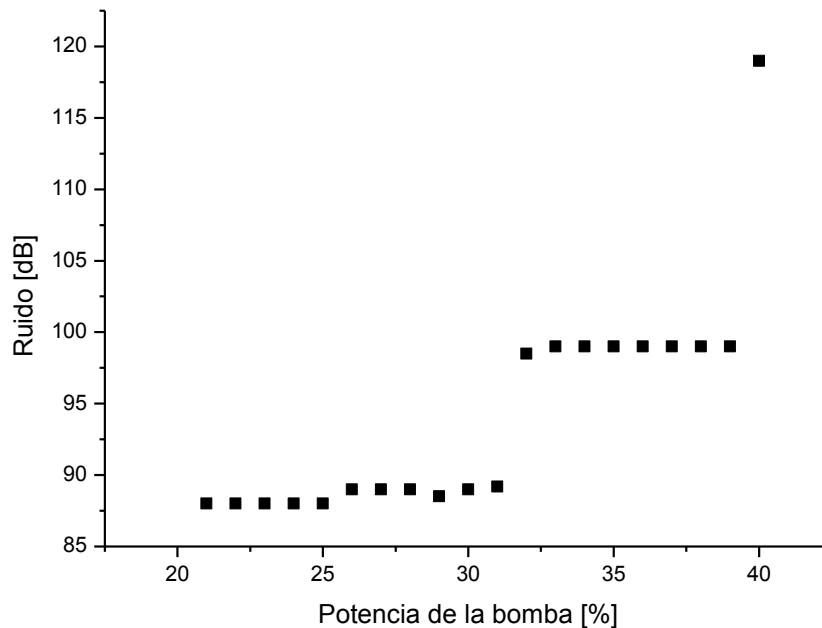
[%]	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
[kPa]	82439	82539	82726	82859	82926	83859	86659	88526	89192	90525
[%]	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
[kPa]	93326	96658	98658	102524	105191	106524	109324	113324	118390	159320

Con esta gráfica se logra observar las etapas de la cavitación más claramente a partir del 20% se inicia la cavitación, en el intervalo del 25 al 33% se desarrolla la cavitación, en el intervalo de 33% al 38% se observa la cavitación total.



### 6.3 GRÁFICA RUIDO (dB) VS POTENCIA DE LA BOMBA (%).

En la gráfica 15 definida por la intensidad del ruido exterior del tubo Venturi se observa cómo se mantiene en un nivel de intensidad después del 25% y en el 33% de la potencia de la bomba, que nos refiere cambios de estado en la cavitación, y es más evidente el cambio a partir del 39% que la cavitación alcanza su mayor intensidad. Cabe hacer notar que el ruido generado es muy intenso.



Gráfica 3. Ruido vs Potencia de la bomba. La lectura tomada del decibelímetro ns muestra cómo en cada lectura de la potencia de la bomba, el crecimiento de la curva se da en intervalos, del 20 al 25%, del 26 al 39% y el 40% punto de máximo desarrollo de la cavitación.

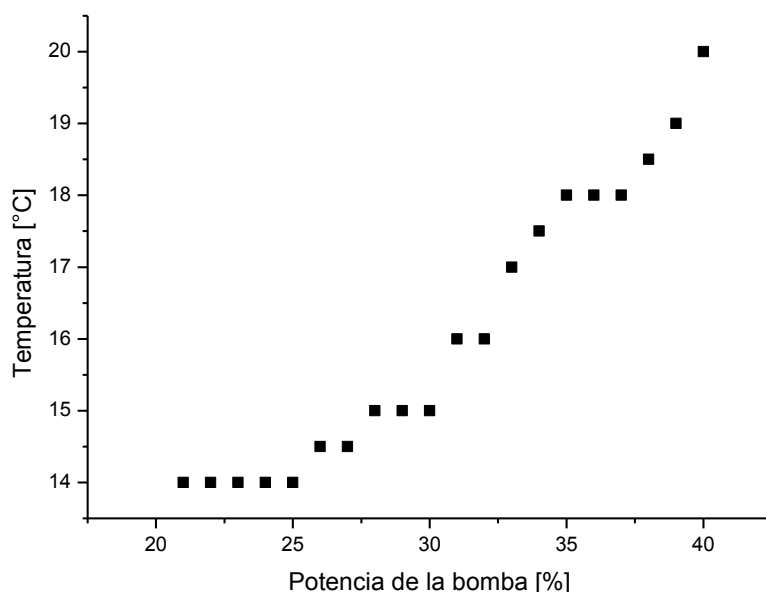
**Tabla 15. Adquisición de datos de Ruido [dB] vs Potencia de la bomba [%].**

<b>[%]</b>	<b>21</b>	<b>22</b>	<b>23</b>	<b>24</b>	<b>25</b>	<b>26</b>	<b>27</b>	<b>28</b>	<b>29</b>	<b>30</b>
<b>[dB]</b>	88	88	88	88	88	89	89	89	88.5	89
<b>[%]</b>	<b>31</b>	<b>32</b>	<b>33</b>	<b>34</b>	<b>35</b>	<b>36</b>	<b>37</b>	<b>38</b>	<b>39</b>	<b>40</b>
<b>[dB]</b>	89.2	98.5	99	99	99	99	99	99	99	119

Los cambios que se distinguen en la gráfica del manómetro son detectables por el sonómetro y se infiere que los cambios de presión interna mantienen el mismo patrón del ruido externo.

#### 6.4 GRÁFICA TEMPERATURA (°C) VS POTENCIA DE LA BOMBA (%).

La gráfica de la temperatura muestra los incrementos, manteniendo cierto ritmo escalonado, aunque se observa que desde el 37% hasta 40% el cambio es más significativo. Hay que notar que a pesar de que se mantiene en operación el equipo de control de temperatura, se da un importante incremento, que también hay que decirlo, que entre cada muestra se mantenía entre uno y tres minutos trabajando en cada lectura mientras se adquirían los datos. También hay que notar que en el intervalo del 37 al 39% se eleva con mayor velocidad la temperatura, y es en ese intervalo donde aumenta la cavitación.



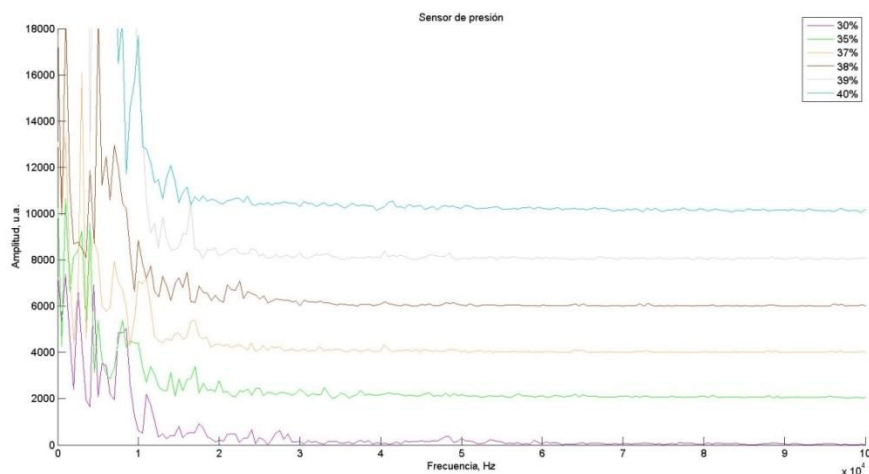
Gráfica 4. Temperatura vs Potencia de la bomba. Aún cuando se tiene control de la temperatura, se observa un importante incremento de esta y se observa en el intervalo de 36 a 40% de operación de la potencia de la bomba, se mantiene en subida, mismo intervalo en que es máxima la cavitación.

**Tabla 16. Adquisición de datos de Temperatura [°C] vs Potencia de la Bomba [%].**

[%]	<b>21</b>	<b>22</b>	<b>23</b>	<b>24</b>	<b>25</b>	<b>26</b>	<b>27</b>	<b>28</b>	<b>29</b>	<b>30</b>
[°C]	14	14	14	14	14	14.5	14.5	15	15	15
[%]	<b>31</b>	<b>32</b>	<b>33</b>	<b>34</b>	<b>35</b>	<b>36</b>	<b>37</b>	<b>38</b>	<b>39</b>	<b>40</b>
[°C]	16	16	17	17.5	18	18	18	18.5	19	20

## 6.5 ESPECTROS AMPLITUD FRECUENCIA

### Sensor de presión

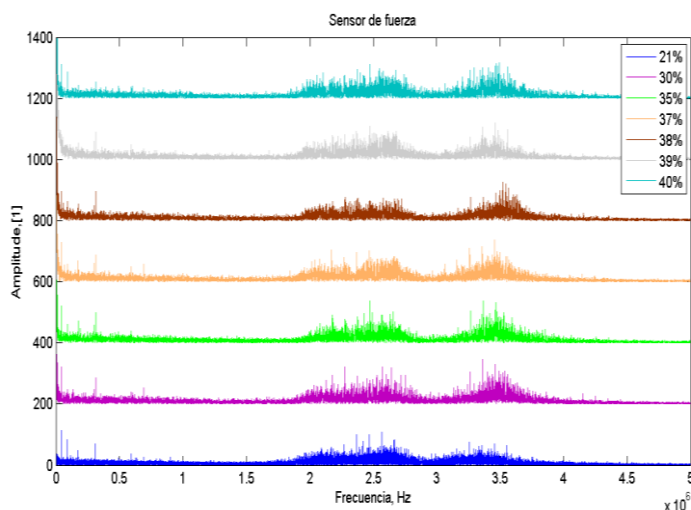


Gráfica 5. Detalle de los espectros del rango de 0 a 100 KHz

La gráfica no 5, muestra los espectros de amplitud con respecto a la frecuencia adquiridos por el sensor de presión. No se observa ningún cambio respecto a las variaciones de potencia, lo cual indica que el sensor no se fijó correctamente.

### Sensor de fuerza

En la gráfica 6 se tienen los espectros de señal Amplitud-Frecuencia del sensor de fuerza, que representan la intensidad de vibraciones superficiales del venturi generadas en diferentes porcentajes de potencia.

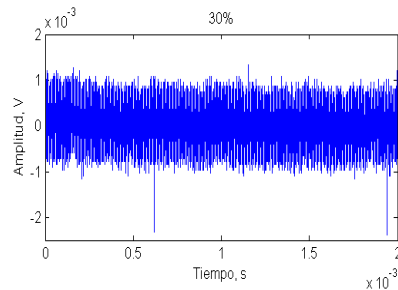


Gráfica 6 Espectros de amplitud-Frecuencia de las señales del sensor de fuerza en función del % de la operación de la potencia de la bomba

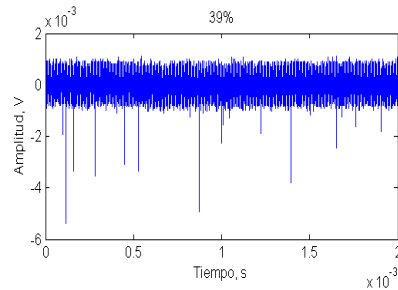
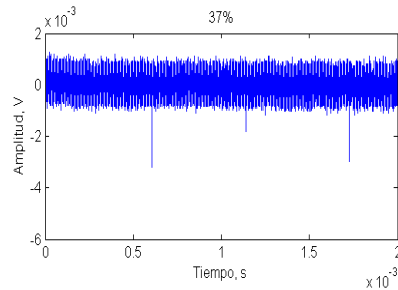
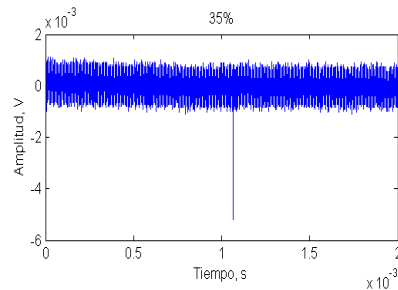
## 6.6 SEÑALES DE AMPLITUD (V)-TIEMPO (s).

En la fig. 44 se presentan las señales del fotomultiplicador. Se aprecian cómo aumenta el número de impulsos de acuerdo al aumento del nivel de potencia de la bomba. En la grafica a) del 30% se observan dos impulsos de apenas 2 mv, En cambio en la b) de 39%, aparece un número mayor de impulsos en el mismo período de tiempo y se observan algunos impulsos de mas de 5 mv.

a).30



b) 33



c) 37%

d) 39%

Fig. 44 Señales de Amplitud vs Tiempo del fotomultiplicador con respecto al porcentaje de potencia de la bomba: a) 30%, b) 33%, c) 37% y d) 39%.

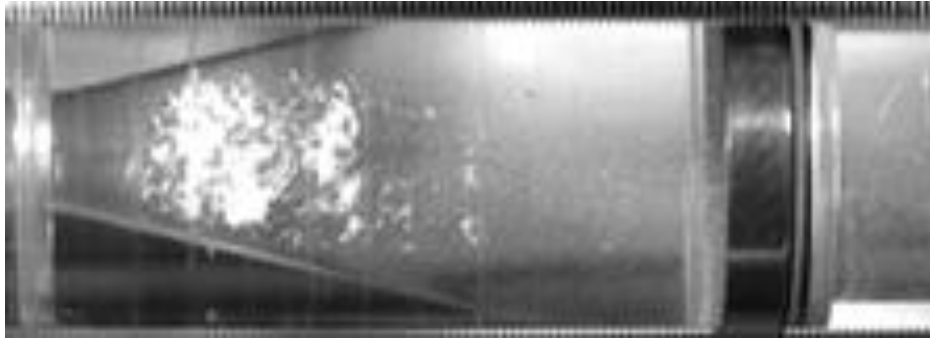
## 6.7 IMÁGENES DE FOTOGRAFÍA RÁPIDA

A continuación en las figuras 45, 46, 47 y 48, se observan imágenes del uso de la cámara PHANTOM y se muestran cuatro fotografías del 30%, 35%, 37% y el 39%.

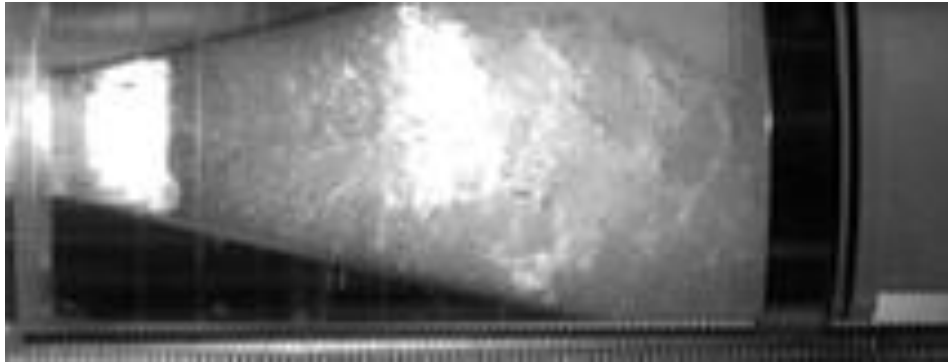
a). Fig. 45. Al 30 % cavitación en proceso.



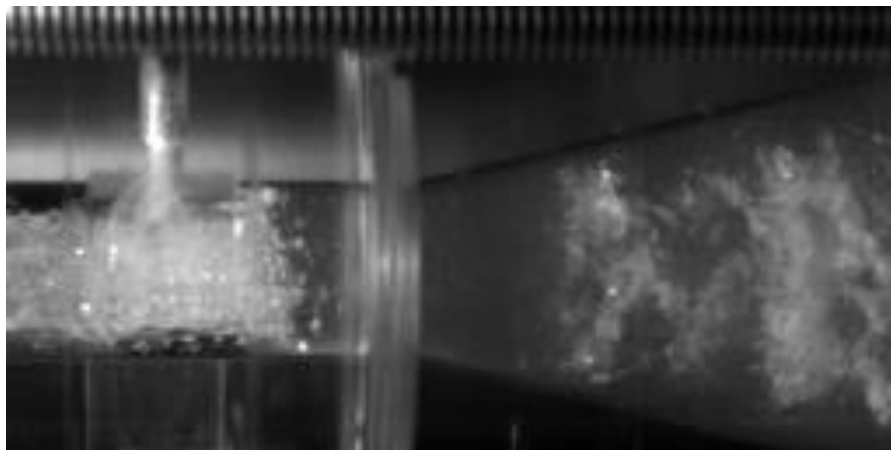
**Fig. 46. Al 35% se observa con poco cambio en el flujo del propanodiol.**



**c). Fig. 47. Al 37%. Se logran observar dos nubes de burbujas, una que sale de la garganta y la otra expandiéndose en el lado divergente del venturi.**



**d). Fig. 48. Al 39% se observa una nube mas dispersa que sale del venturi y ocupa casi el 70% de la parte divergente, mientras en la garganta se comprime la nube.**



## 7. CONCLUSIONES

Actualmente, con una buena técnica en la implementación de la instrumentación, aplicada a la experimentación, permite tener avances importantes en la adquisición de datos e imágenes del fenómeno de la cavitación hidrodinámica para su adecuada interpretación, y aunque en esta tesis se establece un método para facilitar el arranque del sistema, el muestreo y adquisición de datos, este varía según las circunstancias de cada prueba.

Se realizan dos pruebas, la primera para comprobar el buen funcionamiento del circuito hidrodinámico y la adquisición de imágenes de fotografía y video con cámara fotográfica y cámara rápida (PHANTOM) y la segunda se agregan sensores de fuerza, de presión, y luz, además de los siguientes instrumentos: sonómetro, manómetro, termómetro, amperímetro, con sus respectivas variables de salida.

También se obtienen espectros de frecuencia con respecto al tiempo y señales de amplitud-tiempo, generados por el fotomultiplicador y los sensores de fuerza y presión, respectivamente.

Por último se presentan fotografías adquiridas por la cámara NIKON y la cámara PHANTOM dentro del intervalo de pruebas, aumentando en unidades de porcentaje de la potencia de la bomba, y muestran el comportamiento del flujo del fluido dentro del Venturi.

Es evidente que con un mayor número de instrumentos se tienen más variables y con ello un mejor concepto del estudio de la cavitación, pero es importante tomar en cuenta la selección de los instrumentos que cumplan con las especificaciones que el fenómeno de la cavitación tiene.

En base a ello, se desprende la selección de los sensores e instrumentos útiles que se encuentran dentro de los parámetros de estudio desarrollados por la cavitación. Finalmente, se recomienda realizar algunas modificaciones externas al Venturi para posicionar de mejor manera los sensores, como el hecho de fabricarlo en su exterior de forma hexagonal para que los sensores tengan una cara plana para una colocación óptima, también es recomendable armar una estructura tubular de aluminio movable alrededor del Venturi que permita fijar y apoyar los instrumentos de medición y evitar acercarlos y retirarlos manualmente en cada lectura ya que no existe una consistencia en la distancia de acercamiento al Venturi y la adquisición de audio externo y a la medición del ruido.

## 8. BIBLIOGRAFIA

- [1]. CAVITATION, Robert T. Knapp, James W. Daily, Frederick G. Hammit. McGraw Hill Co. 1970.
- [2] Rotation Generator of Hidrodinamic Cavitation for Water Treatment. Martin Perkasec, Mojca Zupanc, Mateuz Dular, Tina Kosjek, Ester Heat, Boris Kompare, Brane Sirok. Separation and Purification Technology. 10/2013. Available from: Mateuz Dular may 20, 2015
- [3] Tesis "Reproducción de la cavitación hidrodinámica para la limpieza y desinfección de agua en circuito hidráulico" E. Carrillo, G. Galindo, I. García, Dir. tesis Margarita Navarrete M. Fac. Ingeniería UNAM 2012.
- [4] Disminución de la viscosidad en líquidos mediante cavitación hidrodinámica, Vargas y D. Esquivel. Dir. de tesis Dra. Margarita Navarrete M. Fac. de Ingeniería , UNAM, 2014
- [5] Reproducción de la Cavitación Hidrodinámica Luminiscente para la Limpieza y desinfección de agua en un Circuito Hidráulico, E. Carrillo, G. Galindo, J. L. Naude, M. Villagrán, M. Navarrete, Instituto de Ingeniería de la UNAM.
- [6] Instrument system for monitoring cavitation noise. M. K. De and F. G. Hammitt. Department of Nuclear Engineering, The University of Michigan, 550 East University, Ann Arbor, Michigan 48109. Department of mechanical Engineering and Applied Mechanics, The University of Michigan, 550, East University, Ann Arbor, Michigan 48109.
- [7]). Experiences on cavitation detection methods. T. Koivela, A. Ellman and M. Vinelius. Institute of hydraulics and Automation, Tampere, University of Technologic
- [8] Single cavitation bubble generation and observation of the bubble collapse flow induced by pressure wave. Sheng Hsu He, Yang-Sheng Yuh, Keh-Chia Yieh, may 2009.
- [9] Design considerations in the development of a modern cavitation tunnel, P. A. Brander, Y. Lecoffre, G. J. Walker. Australian Maritime Hydrodynamics Research Center, Australian Maritime College, Tasmania 7248 Australia, School of engineering, University of Tasmania, Hobart; Tasmania 7001, Australia.
- [10] Characterization of the cavitation flow in converging-diverging nozzle based on experimental investigations, P. Rudoff, M. Hudec, M. Griger, and D. Stefan, Brno University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering, V. Kaplan Department of fluids Engineering, Technická 2896/261669 Brno Czechrepublic.
- [11] Experimental Research into time-frequency characteristics of cavitation noise using wavelet scalogram. Yongyong He, Yuan Liu, The State Key Laboratory of Tribology, Tsinghua University, Beijing, PRChina.
- [12 ]Métodos experimentales para ingenieros, Jack P Holman, Mcgraw hill, segunda edición. 1988
- [13] Sensores Piezoeléctricos, Martín Puppo, Martín Vázquez Tutor: Daniel Slomovitz  
Curso: Medidas Eléctricas, año 2012 Universidad de la República, Facultad de Ingeniería

- [14] Variadores de frecuencia, Sistemas de regulación y control automático, motores asíncronos trifásicos, curso 2010-2011
- [15] Instrumentación Electrónica y mediciones. William David Cooper, (p.1, 2, 10, 11, 452, 453), Prentice Hall Hispanoamericana, S. A., México-Englewood Cliffs. 1982.
- [16] La fotografía es.slideshare.net/enplastica/la-fotografa-analogica-6582204
- [17] Physics and Control of Cavitation. Jean-Pierre FRANC, University of Grenoble. LEIGI-BP 53-38041 Grenoble Cedex 9 FRANCE. Jean-Pierre.Franc@hmg\_inpg.fr
- [18] Introduction to Chemistry 3.1 Tema 3, Laboratory Exercise: Calibration of a Thermometer
- [19] Jean-François DULHOSTE – Escuela de Ingeniería Mecánica – ULA, Instrumentación. Tema 3
- [20] Medidor de energía para láseres pulsados en el intervalo de 200 a 400 nm y frecuencias de 1 a 20 Hz. Tesis Maestría, UNAM. Autor: Osvaldo Cruz Mondragón, Tutor: Dra Margarita Navarrete M. año 2012.
- [21] Operating Instructions for Model 452, Sound Level Meter, ANSI type 2, Scott Instrument Laboratories.
- [22] Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Escuela Superior Tepeji del Rio, Ingeniería Industrial, Ing. Rafael Soto.



## 9. ANEXOS

### A. SISTEMAS DE INSTRUMENTACIÓN

Los sistemas de adquisición de datos se usan para medir y registrar señales obtenidas en dos formas básicas: (a) Señales originadas de la medición directa de las cantidades eléctricas y (b) Señales originadas de los transductores. Los Sistemas de Instrumentación se clasifican en dos categorías: Sistemas Análogos y Sistemas Digitales. Los sistemas analógicos involucran señales continuas en el tiempo y los sistemas digitales se definen como pulsos discretos y discontinuos cuya relación con el tiempo contiene información acerca de la naturaleza de la cantidad [10].

Un sistema de adquisición de datos tiene los siguientes elementos:

- a). *Transductores*, para trasladar parámetros físicos en señales eléctricas
- b). *Condicionadores de señales* para amplificar, modificar o seleccionar cierta porción de estas señales.
- c). *Dispositivos de despliegue visual* para el control continuo de las señales de entrada. Estos dispositivos pueden incluir CRO de multicanal o de un solo canal, CRO de almacenamiento, medidores de panel, despliegues numéricos, etc.
- d). *Instrumentos de registro gráfico* para obtener registros permanentes de los datos de entrada. Estos instrumentos incluyen registradores de tinta para el registro continuo sobre gráficos de papel, sistemas de registro óptico tal como los registradores de galvanómetro de espejo y los registradores de ultravioleta.
- e). *Instrumentación de cinta magnética* para adquisición de datos de entrada, preservando su forma eléctrica y original y reproduciéndoles en una fecha posterior para su análisis más detallado.
- f) *Un sistema de adquisición de datos digital* puede incluir algunos o todos los elementos mostrados en el diagrama de bloques. La operación funcional esencial dentro de un sistema digital incluye la manipulación de las señales analógicas, la medición, conversión y manipulación de los datos digitales y el control de programación internos.

En seguida se definen cada uno de los conceptos que conforman este sistema de adquisición de datos digital:

*Transductores.* Traslada parámetros físicos a señales eléctricas aceptables al sistema.

*Acondicionador de señal.* Suministra potencia de excitación a circuitos de balanceo y elementos de calibración.

*Convertidor de señal.* Traslada la señal analógica a una forma aceptable por medio del convertidor analógico-digital.

*Convertidor analógico-digital (A/D).* Convierte el voltaje analógico en su equivalente digital.

*Equipo auxiliar.* Contiene los instrumentos para la programación del sistema y el procesamiento de los datos digitales. Funciones auxiliares típicas incluyen la linealización y comparación de límites.

*Registrador digital.* Registro de información digital en memorias digitales, o algún otro medio de grabación disponible.

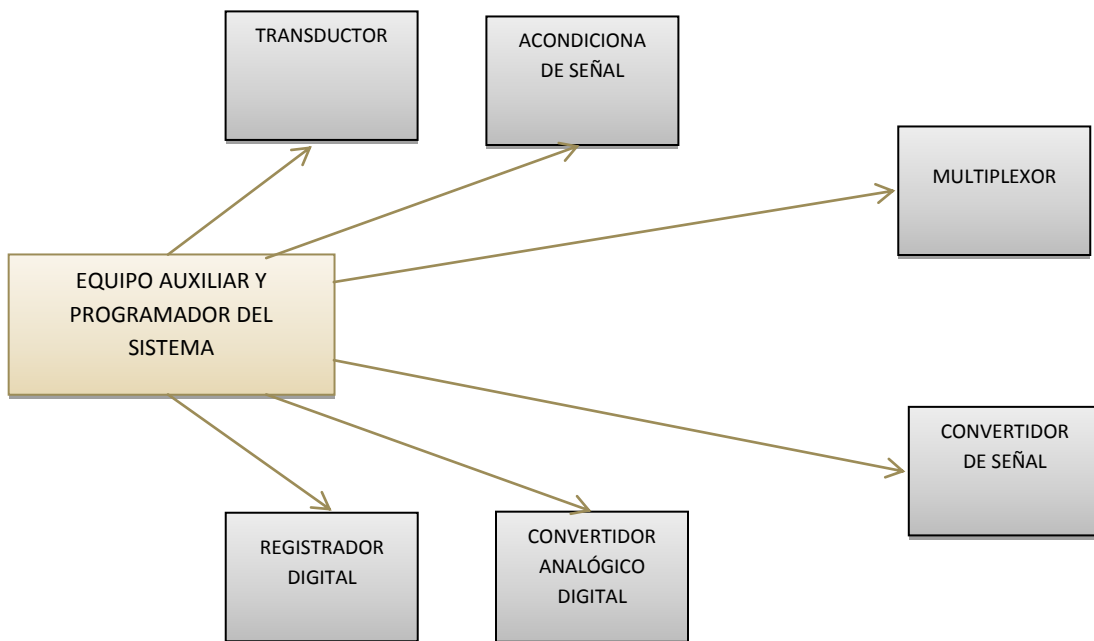


Diagrama de un sistema de instrumentación

## B. SENSORES Y TRANSDUCTORES

TRANSDUCTORES COMO ELEMENTOS DE ENTRADA A LOS SISTEMAS DE INSTRUMENTACIÓN [10].

Un sistema de instrumentación electrónico consiste de un número de componentes los cuales se usan para realizar una medición y registrar el resultado.



**DISPOSITIVO DE ENTRADA:** Este dispositivo, recibe la cantidad a medir entregándola en forma de señal eléctrica a la etapa de acondicionamiento.

**ACONDICIONADOR DE LA SEÑAL:** En esta etapa, la señal es amplificada, filtrada o modificada y entregada al dispositivo de salida.

**DISPOSITIVO DE SALIDA:** Puede ser un registro o bien un simple medidor indicador, un CRO, para desplegar visualmente la señal.

Para ello, el transductor convierte una forma de energía a otra, por ejemplo, un termistor reacciona a las variaciones de la temperatura, una fotocelda los cambios de la intensidad luminosa y el haz electrónico a los efectos de los campos magnéticos, etc.

A continuación se muestra una tabla con la clasificación de los transductores de acuerdo a los principios eléctricos que involucran. Se dividen en dos partes; los transductores pasivos, que requieren potencia externa como capacitores o resistores y los transductores que no requieren potencia externa, de autogeneración.

En la siguiente tabla, se presentan un buen número de transductores disponibles comercialmente para su aplicación en la ingeniería de la instrumentación: TIPOS DE TRANSDUCTORES.

**TRANSDUCTORES PASIVOS (CON POTENCIA EXTERNA)**

Parámetro eléctrico y clase de transductor	Principio de operación y naturaleza del dispositivo	Aplicación Típica
<b>Resistencia Dispositivo potenciómetro</b>	La posición del cursor por medio de una fuerza eléctrica varía la resistencia del potenciómetro o de un circuito puente	Presión Desplazamiento
<b>Galga extensiométrica resistiva</b>	La resistencia de un alambre, o de un semiconductor se modifica por elongación debido a esfuerzos aplicados externamente.	Fuerza, Torque, Desplazamiento
<b>Termistor</b>	La resistencia de un cierto óxido de metal con un coeficiente resistivo de temperatura negativo se cambia	Temperatura

	con la temperatura.	
<b>Celda fotoconductora</b>	La resistencia de la celda como un elemento de un circuito varia con la luz incidente.	Relé fotosensible
<b>Capacitancia, galga de presión de capacitancia variable</b>	La distancia entre dos placas paralelas se varia por la aplicación de una fuerza externa.	Desplazamiento, presión
<b>Micrófono de condensador</b>	La presión del sonido varia la distancia entre una placa fija y un diafragma móvil.	Voz, música, Ruido
<b>Tubo fotomultiplicador</b>	Emisión electrónica debido a radiación incidente sobre superficies fotosensibles.	Luz y radiación, relés fotosensibles

### **TRANSDUCTORES DE AUTOGENERACIÓN (SIN POTENCIA EXTERNA)**

<b>Termocupla y Termopila</b>	<b>Se genera una FEM cuando la unión de dos metales o semiconductores diferentes se calienta.</b>	<b>Temperatura, flujo de calor, radiación</b>
<b>Generador de bobina móvil</b>	El movimiento de una bobina dentro de un campo magnético genera un voltaje	Velocidad, Vibración
<b>Detector Piezoeléctrico</b>	Se genera una fem cuando se le aplica una fuerza externa a ciertos materiales cristalinos, tal como el cuarzo.	Sonido, vibración, Cambios de presión
<b>Celda Fotovoltáica</b>	Se genera un voltaje en un dispositivo semiconductor cuando la energía radiante estimula la celda	Medidor de luz, Celda solar

### **SENSOR DE FUERZA PCB PIEZOTRONICS, MODELO 200B05**

Estos sensores están diseñados para medir fuerza de impacto y compresión, varían desde 44.48 N hasta 22.40 kN (10 lbs a 50000 lbs ), la superficie sensora se localiza en la parte superior, diseñada para medir fuerza aplicada axialmente al sensor.

Modo de instalación:

Se debe montar sobre una superficie plana para no afectar su sensibilidad, y esa superficie se mantiene dentro de un TIR de 0.001 (fig 50).

Una característica de este sensor es que deberá precargar con una cantidad especificada que viene en la hoja de datos que asegura su calibración, con una buena salida lineal en un intervalo de operación más bajo del sensor.

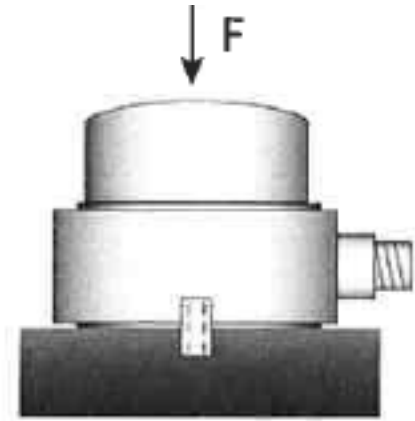


Fig. 49. Posición de un buen acoplamiento del sensor de fuerza

**Tabla 17. Hoja de especificaciones del sensor de fuerza, mod. 200B05.**

Especificaciones	Cantidad
Sensitividad	224.82 mV/kN
Intervalo de medición (compresión)	22.24 kN
Fuerza estática máxima	35.59 Kn
Resolución de ancho de banda (1-100000 Hz)	0.4448 N-ms
Respuesta en baja frecuencia (+0.5%)	0.003 Hz
Límite de frecuencia superior	75 KHz
No-linealidad	$\leq 1\% FS$

Especificaciones eléctricas

Constante de tiempo de descarga	$\geq 200seg$
Voltaje de excitación	20 a 30 VCD
Corriente de excitación constante	2 a 20 mA
Impedancia de salida	< 100 ohms
Voltaje de Bias de salida	8 a 14 VCD

## FOTOMULTIPLICADORES (sensores ópticos)

Tabla 18 Fotomultiplicador. Hamamatsu™ serie H5784

Parámetro		Unidad
Espectro	185 a 820	Nm
Voltaje de entrada	+11.5 a +15.5	V
Voltaje máximo de entrada	+12	V
Corriente máxima de entrada	9	mA
Corriente máxima de salida	12	μA
Voltaje de control máximo	+1	V
Área efectiva	8	Mm de diám.
Longitud de onda de pico de sensibilidad	400	Nm
Sensibilidad min.		
Luminosa Tip.	80	μA/lm
Obscura	150	
<b>Cátodo:</b>		
Proporción Rojo/Blanco	0.2	
Sensibilidad radiante	60	mA/W
Sensibilidad Tip	15	A/lm
Luminosa máx.	75	
<b>Anodo: Sensibilidad radiante (a 420 nm)</b>	21	μA/nW
Corriente Tip.	0.5	nA
Obscura Máx.	4	
Tiempo de subida del pulso	0.65	ns
<b>Tiempo de subida</b>	0.78	Ns
<b>Onda de ruido</b>	1.2	mV
<b>Tiempo de aislamiento</b>	2	S
<b>Temperatura de funcionamiento</b>	+5 a +50	°C
<b>Temperatura de almacenamiento</b>	-20 a +50	°C

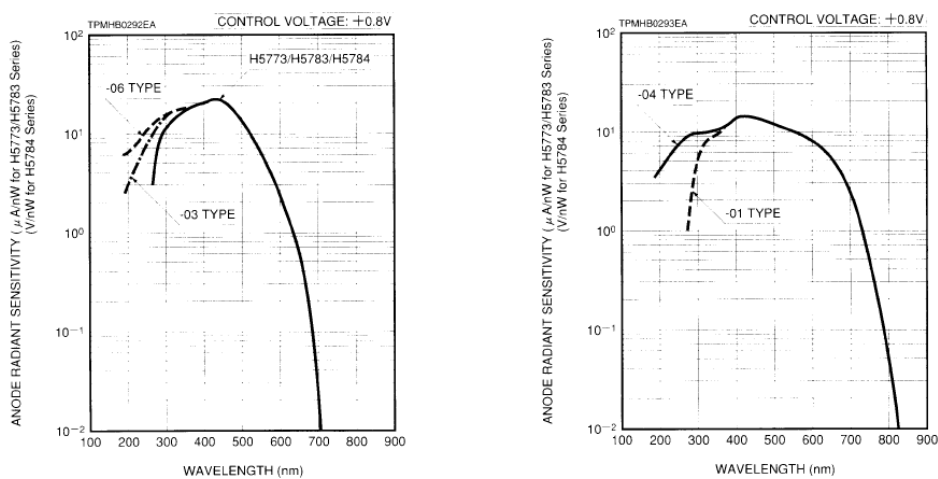


Fig 50 Gráficas de longitud de onda vs sensibilidad del fotomultiplicador

## PIEZOELÉTRICOS

Pierre y Jaque Curie descubrieron en 1880 que algunos materiales cristalinos al comprimirse producen un voltaje proporcional a la presión ejercida y al aplicarle un campo eléctrico a través del material se produce una deformación correspondiente. A esta característica se le llama piezoelectricidad. Aunque la piezoelectricidad se encuentra en varios tipos de materiales naturales, actualmente muchos dispositivos utilizan cerámica poli cristalina como el plomo zirconato titanato (PZT). Se dice que un material posee propiedades piezoeléctricas si una carga eléctrica se produce al aplicarse un esfuerzo mecánico, conocido como “efecto generador”, y al contrario, al aplicarle un campo eléctrico producirá un esfuerzo mecánico sobre el material, conocido como “efecto motor”. Algunos materiales cristalinos de origen natural poseen esas propiedades como el cuarzo y el turmalina, como también algunos producidos artificialmente como sal de Rochelle, dihidrógeno fosfato de amonio (ADP) y sulfato de litio ( $\text{Li}_2\text{SO}_4$ ) [12]

Los cerámicos piezoeléctricos también poseen propiedades piroeléctricas. Un cambio de temperatura producirá un cambio en sus dimensiones mecánicas, que a su vez se produce un esfuerzo en el cerámico y corresponde a una carga eléctrica en la superficie del electrodo dónde se crean muy altos potencial.

Recientemente se están utilizando también polímeros ferro-eléctricos entre los que destacan el fluoruro de polivinilideno, material de alta sensibilidad piezoeléctrica que sirve de base para algunos sensores modernos experimentales de diversas magnitudes mecánicas, eléctricas y ópticas. Actualmente se estudia su aplicabilidad en la detección táctil de robots y en prótesis de miembros. En aplicaciones como sensores, destacan los cristales de cuarzo tallados según determinadas direcciones preferentes en forma de láminas sobre cuyas caras opuestas se depositan electrodos metálicos (generalmente de oro o de plata). Dependiendo de la dirección del corte se consiguen láminas sensibles a deformaciones por compresión, esfuerzo cortante o flexión (ver fig. 8).

## TERMÓMETROS

El termómetro es un instrumento de medición de la temperatura que usa el principio de dilatación, por lo que se prefiere el uso de materiales con un alto coeficiente de dilatación, de modo que al aumentar la temperatura, la dilatación sea fácilmente visible. El creador del primer termoscopio fue Galileo Galilei; éste podría considerarse el predecesor del termómetro. Consistía en un tubo de vidrio que terminaba con una esfera en su parte superior que se sumergía dentro de un líquido mezcla de alcohol y agua. Al

calentar el agua, ésta comenzaba a subir por el tubo. Sanctorius incorporó una graduación numérica a instrumento de Galilei, con el que surgió el termómetro.

## ESCALA DE TEMPERATURAS

La escala más usada en la mayoría de los países, es la escala centígrada, denominación usual renombrada en 1948 como Celcius, en honor a Anders Celcius (1701-1744). Otras escalas de fabricación de termómetros, son:

- Fahrenheit, una unidad de temperatura absoluta propuesta por Gabriel Fahrenheit en 1724.
- Réaumur, en desuso.
- Kelvin o temperatura absoluta, usada casi exclusivamente en laboratorios, la cual se corresponde con una propiedad intrínseca de la materia.

## TIPOS DE TERMÓMETROS

Termómetro de vidrio: Es un tubo de vidrio sellado que contiene un líquido, generalmente mercurio o alcohol, cuyo volumen cambia con la temperatura de manera uniforme. Este cambio de volumen se visualiza en una escala grauada que por lo general está dada en grados Celsius. El termómetro de mercurio fue inventado por Fahrenheit en el año de 1724.

Termómetro de resistencia: Consiste en un alambre de platino cuya resistencia eléctrica cambia cuando cambia la temperatura.

Termopar: Es un dispositivo utilizado para medir temperaturas basado en la fuerza electromotriz que se genera al calentar la soldadura de dos metales distintos.

Pirómetro: Los pirómetros se utilizan para medir temperaturas elevadas.

Termómetro de lámina bimetálica: Formado por dos láminas de metales de coeficientes de dilatación muy distintos, y arrollados dejando el de mayor coeficiente en el interior. Se utiliza sobre todo como sensor de temperatura en el termohigrógrafo.

## C. MEDICIONES Y ERRORES

Las mediciones generalmente involucran la utilización de un Instrumento como medio físico para determinar una cantidad o variable y se define como un dispositivo para determinar el valor o la magnitud de una cantidad o variable. En la realización de mediciones se emplean diferentes términos los cuales se definen como [10]:



EXACTITUD: Es la lectura del instrumento aproximada al valor real de la variable medida.

PRECISIÓN: Es la repetición de las medidas de la variable en las mismas condiciones.

SENSIBILIDAD: La relación de la señal de salida o respuesta del instrumento al cambio de la entrada o variable medida.

ERROR: La desviación del valor verdadero al valor medido.

Al realizar mediciones de precisión, se recomienda registrar una serie de mediciones en vez de confiar en una sola observación. Métodos alternos de medición, así como el uso de diferentes instrumentos para realizar el mismo experimento proveen de una buena técnica para mejorar la exactitud, aun cuando es difícil evitar el error del instrumento.

CIFRAS SIGNIFICATIVAS. Estas dan información respecto a la magnitud y precisión de las mediciones de una cantidad. Entre más cifras significativas, mayor es la precisión de una medición.

## D. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

El análisis estadístico de los datos de las mediciones permite determinar analíticamente del resultado final. Para que los métodos estadísticos y su interpretación sean significativos, se requieren normalmente un gran número de mediciones. También los errores sistemáticos deben ser pequeños comparados con los errores residuales a al azar, porque el tratamiento estadístico no puede resolver tendencias fijas contenidas en todas las mediciones.

MEDIA ARITMÉTICA

La media aritmética está dada por:

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n}{n} = \frac{\sum x_n}{n}$$

Dónde:  $\bar{x}$  = media aritmética

$x_n$  = lecturas tomadas

n = número de lecturas

DESVIACIÓN DE LA MEDIA Es el alejamiento de una lectura dada de la media aritmética del grupo de lecturas. Si d es la desviación de la primera lectura  $x_1$  y  $d_2$  es para la segunda lectura  $x_2$ , entonces la desviación de la media se puede expresar como:

$$d_1 = x_1 - \bar{x}$$

$$d_2 = x_2 - \bar{x}$$

$$d_3 = x_3 - \bar{x}$$

**DESVIACIÓN PROMEDIA** Es una indicación de la precisión de los instrumentos empleados al hacer las mediciones. Es la suma algebraica de los valores absolutos de las desviaciones, dividida por el número de lecturas. El valor absoluto de la desviación promedia se puede expresar como:

$$D = \frac{|d_1| + |d_2| + |d_3| + \dots + |d_n|}{n} = \frac{\sum d_n}{n}$$

**DESVIACIÓN ESTÁNDAR** En el análisis estadístico de errores al azar, la desviación de la raíz de la media al cuadrado o desviación estándar es una ayuda valiosa. Por definición la desviación estándar de un número infinito de datos, es la raíz cuadrada de la suma de todas las desviaciones individuales al cuadrado, dividido por el número de lecturas. Expresado matemáticamente tenemos:

$$\sigma = \sqrt{\frac{d_1^2 + d_2^2 + d_3^2 + \dots + d_n^2}{n}} = \sqrt{\frac{\sum d_n^2}{n}}$$

En la práctica el número posible de observaciones es finito. La desviación estándar de un número finito de datos está dada por:

$$\sigma = \sqrt{\frac{d_1^2 + d_2^2 + d_3^2 + \dots + d_n^2}{n - 1}} = \sqrt{\frac{\sum d_n^2}{n - 1}}$$

Otra expresión para la misma cantidad es la varianza o desviación media al cuadrado, la cual es la misma cantidad como la desviación estándar excepto que la raíz cuadrada no se extrae:

$$\text{Varianza } (\mathcal{V}) = \text{desviación media al cuadrado} = \sigma^2$$

La mayoría de los resultados analíticos se establecen en términos de la desviación estándar.