



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

**REPRODUCCIÓN DE CAVITACIÓN HIDRODINÁMICA
LUMINISCENTE PARA LA LIMPIEZA DE AGUA A NIVEL
TERCIARIO**

T e s i s

que para obtener el grado de:

I N G E N I E R O M E C Á N I C O

P R E S E N T A N :

Octavio Enrique Carrillo Cortés

Gerardo Galindo Contreras

Ismael García Trinidad



Director de tesis:

Doctora Margarita Navarrete Montesinos

Mexico, D.F.

2012



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Índice General

RESUMEN	iii
Capitulo 1. Introducción	1
1.1 Breve revisión de los dispositivos que emplean cavitación hidrodinámica	3
1.2 Objetivos	5
Capitulo 2. Principios Básicos	6
2.1 Cavitación. <i>Cavitación hidrodinámica. Cavitación en bombas. Comportamiento ideal y cavitante de una bomba centrífuga. Cavitación en tuberías y válvulas</i>	6
2.2 Diseño conceptual de la cavitación hidrodinámica luminiscente para la limpieza de agua	12
Capitulo 3. Circuitos hidráulicos	14
3.1 Pruebas de concepto. Diseño preliminar usando una Bomba de 3/4 HP. Modificación del Impulsor	14
3.2 Implementación del Circuito Hidráulico 1. <i>Pruebas de obtención de flujo cavitante</i>	16
3.3 Rediseño e implementación de Circuito Hidráulico 1. <i>Pruebas de obtención del flujo cavitante</i>	19
3.4 Diseño y pruebas para escalar la cavitación hidrodinámica con una Bomba Centrífuga de 5 HP y Tubo Venturi. Diseño del Circuito Hidráulico 2. Tubo Venturi. Diseño del Tubo Venturi	23
3.5 Implementación del Circuito Hidráulico 2	26
3.6 Manufactura / Impulsor y Tubo Venturi	30
Capitulo 4. Pruebas del flujo cavitante y luminiscencia al circuito hidráulico 2 (Bomba Centrífuga de 5 HP)	35
4.1 Rediseño e implementación del circuito hidráulico 2. Pruebas al flujo cavitante. Arreglo experimental	36
4.2 Verificación de la luminiscencia por captura de emisión de luz mediante foto-multiplicador.	40
4.3 Pruebas de limpieza de agua con cavitación hidrodinámica rotatoria. Uso de azul de metileno como colorante a limpiar. Corridas experimentales en función del tiempo. Determinación de la degradación del azul de metileno mediante espectroscopia de transmisión, en función del tiempo de cavitación. Metodología para la obtención de espectros.	42
Capítulo 5. Resultados (Circuito Hidráulico 2)	48
5.1 Cálculo del número de cavitación para el impulsor y tubo Venturi.	48
5.2 Detección de pulsos de luz en la cavitación.	56
5.3 Adquisición del ruido del sistema cavitante.	59
5.4 Graficas de degradación en función del tiempo y temperatura.	60
Conclusiones y Recomendaciones	63
Referencias	64
Anexo. Manuales de bombas y equipo electrónico.	66
1.1 Bomba Centrífuga generalidades. Introducción y funcionamiento. Clasificación de las bombas centrífugas.	66
1.2 Equipo: Osciloscopio, Fotomultiplicador, Sensor de Fuerza y sensor piezoeléctrico de película.	73

RESUMEN

Con el objetivo de estudiar la cavitación hidrodinámica luminiscente y aplicarla para la limpieza y desinfección de agua se ha implementado un circuito hidráulico cerrado de 70 litros, en donde se verifica la reproducción de la luminiscencia, así como la limpieza de agua de un colorante orgánico. El circuito se compone principalmente por una bomba centrífuga de 5 HP con su impulsor modificado, un tubo Venturi, una válvula reguladora y un tanque de almacenamiento. La modificación realizada al impulsor consistió en la reducción de su área de salida que provoca un decremento en la presión local alcanzando la presión de vapor del líquido ocasionando la formación de múltiples cavidades.

Como una primera aproximación, el concepto de la cavitación hidrodinámica se probó en un circuito hidráulico usando una bomba de $\frac{3}{4}$ de HP. El circuito se reconfiguro en tres ocasiones por inconvenientes en la parte de la tubería y accesorios. En la tercera reconfiguración, se consiguió observar a simple vista la cavitación tipo vórtice a la salida de la bomba. Sin embargo, este hecho demandaba una corriente de 23 A al motor de la bomba, provocando un sobrecalentamiento, por lo que el circuito funcionaba solamente 15 minutos con la válvula de regulación de gasto cerrada y 3 minutos con la válvula abierta. Aún así, el circuito se prueba para degradar un colorante orgánico (azul de metileno) a una concentración de 0.3 mg por cada litro de agua, y además se combina la cavitación con otros agentes químicos para aumentar la sinergia del sistema. Con éste circuito se realizaron tres corridas experimentales considerando el concepto de sinergia; aplicando: a) cavitación, b) cavitación + % de Peróxido de Hidrogeno (H_2O_2), y c) cavitación + % Peróxido de Hidrogeno (H_2O_2) + % escoria de cobre. Esta última, se realizo con el propósito de emular una reacción tipo Fenton. Para cada caso se coleccionan muestras de agua a diferentes lapsos de tiempo, para su posterior análisis. El análisis de las muestras de agua procesada se realizo mediante espectroscopia óptica, los resultados arrojaron que usando cavitación y peróxido de hidrogeno se aumentaba la sinergia alcanzando casi 20% de la degradación del colorante en una hora. También se observó el inconveniente de utilizar un exceso de oxidante como el H_2O_2 , ya que causo corrosión tanto en el impulsor como en la carcasa de la bomba. Para allanar el problema de calentamiento de la bomba se decide utilizar una bomba con mayor potencia, 5 HP. Para este nuevo circuito se utilizo la misma modificación en el impulsor de la bomba. A este sistema se le agrega además un tubo Venturi para duplicar el fenómeno de cavitación, así se tienen dos dispositivos en serie para alcanzar la cavitación hidrodinámica luminiscente, la cual se comprobó instrumentando con sensores optoelectrónicos al circuito hidráulico. Este circuito también se probó para degradar el mismo colorante orgánico a la misma concentración descrita anteriormente. Para este efecto, se llevaron a cabo dos corridas experimentales: a) cavitación y b) cavitación + tubo Venturi. Usando el método b) se alcanzó el 85% en la degradación del colorante orgánico en un tiempo de 3 horas con 30 minutos. En este circuito ya no se empleo oxidantes químicos.

Introducción

A nivel mundial la demanda de agua potable y de uso diario se encuentra en aumento, se estima que desde 1900 a la fecha se ha multiplicado por seis, este problema es debido al incremento exponencial de la población humana, que alcanzará a mediados de este siglo de 10000 a 12000 millones de habitantes [1].

En México, generalmente el agua que utilizamos para nuestras actividades ya sea en nuestra vivienda, en la escuela o en el entorno proviene de fuentes tales como: agua de lluvia, aguas superficiales y las subterráneas. Estas fuentes en su estado natural no deberían representar riesgo para la salud, sin embargo la mayoría de ellas ya se encuentran contaminadas debido al uso de químicos que se han empleado durante más de 50 años en la producción agrícola, industrial, y de los alimentos, etc. por lo tanto necesitan tratamiento ya sea químico, físico o biológico para su recuperación como líquido vital. Por ejemplo, en el tratamiento de aguas residuales se tienen en general cuatro etapas que comprenden procesos químicos, físicos y biológicos [2]:

- Tratamiento preliminar, destinado a la eliminación de residuos fácilmente separables y en algunos casos un proceso de pre-aireación.
- Tratamiento primario que comprende procesos de sedimentación y tamizado.
- Tratamiento secundario que comprende procesos biológicos aerobios y anaerobios y físico-químico (floculación) para reducir la mayor parte de la DBO (Demanda biológica de oxígeno)
- Tratamiento terciario o avanzado que está dirigido a la reducción final de la DBO, metales pesados y/o contaminantes químicos específicos y la eliminación de patógenos y parásitos.

Sin embargo, dichos procesos presentan una eficiencia baja con respecto a la remoción de contaminantes orgánicos, por lo que en años recientes se ha optado por la integración de varias tecnologías que hagan los procesos de remoción más eficientes y económicas.

Las principales tecnologías integradas que se encuentran en desarrollo son:

1. **Ultrasonido** / H_2O_2 ú ozono (1996-
2. Degradación **sonoquímica** / oxidación en fase húmeda (1985-
3. UV / H_2O_2 u ozono (1988-
4. Ozono/ H_2O_2 (1994-
5. Procesos foto-Fenton / [UV- H_2O_2 - $F_2(II)$ u $F_2(III)$] (1992-
6. Oxidación **sono-fotocatalítica** (1998-
7. *Procesos de oxidación avanzada* seguida por oxidación biológica (1999-
8. Catálisis sólida y **ultrasonido** (semiconductores y la luz UV solar) (2003-

El **sinergismo** esperado en la integración de estos métodos es un aumento en la generación de **radicales hidroxilo** $\cdot OH$. La eficiencia de los procesos y la magnitud del **sinergismo** dependen no solamente del aumento en la generación del **número de radicales hidroxilo** sino también de las condiciones que permitan un mejor

contacto entre dichos **radicales** con las **moléculas contaminantes** así como la optimización de los oxidantes y la actividad catalítica. Generalmente la combinación de dos o más procesos de **oxidación avanzada** permite un aumento en la generación del **radical hidroxilo**, los cuales eventualmente resulta en un **mejoramiento en la tasa de oxidación**.

Entre los procesos anteriormente descritos, la efectividad del uso del ultrasonido se debe a que éste produce el fenómeno de la cavitación. Desde hace 70 años la industria utiliza este principio y emplea reactores ultrasónicos para acelerar todos sus procesos que implican reacciones químicas y ha logrado la degradación del Yodo, de desperdicios orgánicos, ruptura celular de organismos biológicos y la desinfección de agua. También se sabe que bajo ciertas condiciones de irradiación ultrasónica se alcanza: la cavitación luminiscente. Así, la luminiscencia por cavitación de múltiples burbujas se obtiene irradiando ultrasonido pulsado; es errática e impredecible y se forman nubes de burbujas en diferentes partes del fluido en donde se aplica. En la sonoluminiscencia controlada, se aplica un campo senoidal en donde se logra atrapar una burbuja que cuando alcanza la estabilidad emite luz en cada ciclo, (SBL).

La sonoluminiscencia, la traducción de sonido a luz, es un fenómeno que empuja a la mecánica de fluidos hacia sus límites. En un estado inicial con longitud de onda larga y bajo número de Mach, (un campo difuso en la región del ultrasonido), tal como es generada por una burbuja de gas controlada por un campo acústico, espontáneamente se enfoca con una alta densidad de energía en la burbuja generando movimiento supersónico y un cambio de fase en la materia. La burbuja emite pulsos de luz en los picos-segundos con un espectro de entre 190-780 nm. La teoría más aceptada para la sonoluminiscencia implica la formación de un plasma denso "frío" por la implosión de una onda de choque, y hasta la fecha no se ha detectado la onda de implosión o el plasma directamente.

La cavitación al re-producirse en millones de lugares en forma simultánea, dentro de un reactor, genera condiciones de altas temperaturas y presiones en forma localizada preservando el medio global a condiciones ambientales. Los radicales libres que se generan en el proceso, debido a la disociación del vapor de agua atrapado en las burbujas, intensifican las reacciones químicas de oxidación de la materia orgánica. No importando el método de producción de la cavitación sus aplicaciones se encuentran ya en la síntesis química, la biotecnología, la sonocristalización, la atomización, y por supuesto en la limpieza y desinfección de agua, etc. Para la última aplicación, se debe tener especial cuidado en el diseño del reactor, ya que al ser la cavitación generadora de reacciones químicas podría formar subproductos no convenientes, por ejemplo si el agua a desinfectar contiene impurezas metálicas podría haber formación de moléculas complejas y súper-oxidantes si se alcanzan las temperaturas de ionización en la última etapa del colapso. Por lo que debemos conocer el mecanismo físico para hacer colapsar las burbujas a una temperatura y presión controlada para emplear su potencial a la ingeniería. Actualmente, la cavitación es una de las alternativas potenciales más eficientes para el tratamiento de aguas residuales [3-5]. Se han comparado diferentes técnicas de cavitación, y es la cavitación hidrodinámica generada mediante cambios de presión por medios geométricos, la que ha demostrado ser una de las más eficientes [6,8]. A continuación se describen los dispositivos que ya se encuentran reportados y patentados a nivel mundial.

1.1 Breve revisión de los dispositivos que emplean cavitación hidrodinámica

En la Tabla 1 se resumen los avances reportados que se han logrado a nivel mundial para alcanzar la cavitación hidrodinámica y los procesos en donde se ha aplicado en forma exitosa. Los trabajos más sobresalientes se describen brevemente a continuación:

Tabla 1. Una visión general de la investigación actual en las aplicaciones de la cavitación.

Grupo	Tipo de Cavitación	Aplicación	Estado
Parag R. Gogate Universidad de Mumbai, India	Acústica Hidrodinámica	Tratamiento de agua, biocombustibles, síntesis orgánica, destrucción orgánica	Investigación en curso
Rashmi Chand Universidad de Albertay, Escocia	Acústica Hidrodinámica	Oxidación general orgánica	Investigación en curso
Arisdyne Systems, Cleveland, Ohio	Hidrodinámica	Tecnología de combustibles	Unidad Comercial
Cavitation Technologies, Inc. CA	Hidrodinámica	Tecnología de combustibles	Unidad Comercial
Dynaflow, Inc. J MD	Hidrodinámica	Oxidación y desinfección, CDF	Unidad Comercial
Hydro Dynamics, Inc, Georgia	Hidrodinámica	Tecnología de combustibles, procesamiento de comidas	Unidad Comercial
Kenneth S. Suslick Universidad de Illinois	Ultrasónica	Materiales orgánicos, materiales inorgánicos y química orgánica	Investigación en curso
OceanSaver AS, Norway	Pulso de onda de choque	Agua de lastre	Unidad Comercial
VRTX Advanced fluid technology	Hidrodinámica	Enfriamiento con agua, Digestor para tratamiento de agua, biodiesel, etc.	Unidad Comercial

a) Degradación de p-nitrofenol usando cavitación acústica y reacciones tipo Fenton

Se combina la cavitación ultrasónica y reacciones tipo Fenton para el tratamiento de aguas residuales. Se modela experimentalmente utilizando el p-nitrofenol como contaminante en agua bajo diversas condiciones de operación. La tasa de degradación máxima alcanzada fue del 66.4%, [9].

b) Degradación de Fenol utilizando reactores ultrasónicos de 20, 300 y 520 kHz con peróxido de hidrógeno, ozono y metales de valencia cero

Su estudio de la degradación de Fenol por oxidación avanzada utilizando reactores ultrasónicos de 20, 300 y 520 kHz. Los estudios sobre degradación de Fenol indicaron que la degradación se intensificó con la presencia de un catalizador y peróxido de hidrógeno, lo cual aumentó los radicales hidroxilo en el sistema. Sus datos experimentales mostraron que cuando la reacción estaba sometida a 300 kHz, la remoción completa de fenol se lograba en 25 min, mientras que en el caso de 20 kHz, el fenol dejaba de detectarse después de 45 minutos. En la investigación de ZVC utilizando las diferentes frecuencias, se observó una remoción del 10 al 98% de Fenol, [10].

c) Arisdyn Systems, Inc.

Utiliza la cavitación hidrodinámica con catalizadores para la producción de biocombustibles, entre los que se encuentran el biodiesel, y el etanol. Para la producción de biodiesel, la cavitación forma una emulsión con un tamaño de gota controlado que permite una reacción rápida y eficiente, aumentando la eficiencia del catalizador. Para la producción de etanol utiliza las fuerzas de corte de cavitación para romper las partículas de maíz para liberar las moléculas de almidón atrapadas en la estructura celular y así aumentar la eficiencia enzimática de la masa. La aplicación del flujo de cavitación controlado (CFC) antes de la sacarificación mejora el tamaño de la partícula y la tasa de conversión del almidón a azúcar para la fermentación posterior al etanol. El CFC rompe las paredes celulares y libera las moléculas de almidón atrapadas. Esto aumenta la accesibilidad de

moléculas de almidón a las enzimas, lo que conduce a un azúcar superior y la alta producción en última instancia de etanol, [11].

d) Cavitation Technologies, Inc.

Para el refinamiento de aceites de origen vegetal, logran separar los ácidos grasos de una mezcla de agua y el aceite vegetal, esto ocurre por medio de nano reactores que son de su invención, ésta reacción provoca que las impurezas sean retiradas del aceite, [12].

e) DynaFlow, Inc.

La empresa ha desarrollado diversos aparatos para la generación de burbujas, entre ellos está DynaSwirl[®] y StratoJet[®], los cuales dependiendo las necesidades de uso generan burbujas de tamaño que van desde los nanómetros hasta los milimétricos en diámetro. La utilidad de éstos equipos es muy variada, ya que va desde la limpieza de materiales, cómo el uso de la cavitación y su capacidad de erosionar materiales, para cortarlos.

Otros usos de los equipos es la generación de burbujas en mercurio, así como también la aplicación de tratamiento de agua, tanto a nivel consumo usado por la industria naval. El principio de funcionamiento del DynaSwirl[®] es el crear un vórtice en un flujo constante para generar una baja presión y con ello, la generación de burbujas, el tamaño de las mismas, depende de la capacidad de la bomba usada, así como la configuración de las tuberías usadas. El StratoJet[®] utiliza resonancia acústica en un flujo creando así un vórtice de cavitación, [13].

f) Hydrodynamics Inc.

Empresa dedicada a la manufactura de bombas que producen cavitación hidrodinámica controlada, diseñando rotores especiales para evitar daños, produciendo burbujas microscópicas que son usadas en dos tipos de proceso. Uno de sus procesos aprovecha la cavitación para calentar líquidos en cuestión de segundos, ya sea en forma continua o discontinua. Otra característica que aprovechan de la cavitación es el colapso de las burbujas para generar mezclas de diversas sustancias, ya sea líquido-líquido, líquido-gas o incluso sólido-líquido [14].

g) Kenneth S. Suslick

El Grupo de investigación del Profesor Suslick, en la Universidad de Illinois, investiga los efectos químicos del ultrasonido (sonoluminiscencia y la síntesis de nanomateriales) y detección de químicos (optoelectrónica, etc.). Algunos de sus estudios son sobre los efectos del ultrasonido, la sonoquímica, como lo son el efecto de cavitación y el aumento de temperatura [15].

h) OceanSaver / Empresa dedicada al tratamiento de agua de lastre.

Utiliza los principios de pre-filtrado y desinfección, con una supersaturación de nitrógeno en el agua de lastre y consiste en dos etapas.

1. El agua de lastre es impulsada a bordo de las naves por medio de bombas y es filtrada mecánicamente, mediante filtros mecánicos automatizados. El filtro es autolimpiable equipado con una red de 40 micrómetros de radio. El filtro remueve alrededor de 60-80% de la carga orgánica de alrededor de 40 micrómetros. El filtro regresa toda la carga orgánica al mar.
2. El agua es expuesta a una inyección del desinfectante. Un desinfectante que se produce mediante un proceso electrodiálítico, esto se lleva a cabo por una unidad llamada (C2ETM).

No hablan mucho acerca de este proceso, debido a su patente, [16].

i) VRTX

Esta empresa destaca por el uso de Cavitación Hidrodinámica Controlada (CHC) para el tratamiento de agua. Tienen 15 años ofreciendo estos servicios en los que se destaca:

- Reducción de consumo de agua
- Protección de equipos de refrigeración contra corrosión

Utiliza CHC con una combinación de filtros y procesos de control para mejorar la operación de equipos de refrigeración para reducir un consumo de agua y electricidad.

El sistema utilizado consiste en dos circuitos conectados a una torre refrigerante, un condensador, una lavadora de aire o un sistema de enfriamiento por fluido. En un circuito, el agua pasa a través de la cámara de tratamiento VRTX, utilizando CHC, para después pasar a la cuenca de enfriamiento o el sumidero. En el otro se utiliza un sistema de filtrado para remover carbonato de calcio u otras partículas que ocasionan un crecimiento bacteriológico.

De la revisión anterior, se destacan los siguientes aspectos:

- a) No indican si las burbujas cavitantes alcanzan a emitir luz,
- b) No hay un criterio para definir la eficiencia de la cavitación (no es suficiente el coeficiente de cavitación) como generadora de radicales hidroxilo, y
- c) No hay un diagrama paramétrico entre el tamaño de la burbuja, coeficiente de cavitación, ondas de choque, radicales hidroxilo, y temperatura.

Por lo anterior, un criterio preliminar es establecer la luminiscencia de la burbuja como un factor de eficiencia ya que si en el colapso se emite luz, se asegura la emisión de una onda de choque, y que al menos la temperatura alcanzada en el interior de la burbuja fue de alrededor de 15000°C durante la última etapa del colapso (~ ns), [17].

1.2 Objetivos

Objetivo general

- Modelado experimental para aplicar la cavitación hidrodinámica luminiscente para la limpieza y desinfección de agua a nivel terciario.

Objetivos particulares

- Revisión bibliográfica del tema abarcando artículos y patentes.
- Diseñar un sistema alternativo usando una bomba centrífuga para obtener cavitación hidrodinámica en forma continua modificando su impulsor.
- Implementar un circuito cerrado para probar el concepto.
- Re-escalar el sistema y realizar pruebas para determinar su viabilidad.
- Implementar un segundo sistema en serie para aumentar la eficiencia mediante un tubo Venturi.
- Aumentar la sinergia añadiendo un método de oxidación para una mayor eficiencia en la limpieza de agua.
- Tener un dispositivo portátil para dar a conocer el método y su eficiencia.

Principios Básicos

2.1 Cavitación

La cavitación es un proceso dinámico que se define generalmente como la **formación** de cavidades o burbujas (ya sea homogénea o no homogéneamente) y su subsecuente **crecimiento** y **colapso**; como resultado de una alta concentración de energía ($1-10^{18}$ kW/m³) dentro de un fluido [18]. Aquí, la palabra formación se refiere ya sea a la generación de una nueva cavidad o la expansión de una ya existente. Estas burbujas se localizan inmersas en el líquido o atrapadas en pequeñas fisuras, ya sea en la capa superficial o en partículas sólidas suspendidas.

Hay cuatro formas de inducir el **crecimiento de las burbujas** [19]:

1. Reduciendo la presión o incrementado la temperatura de una burbuja llena de gas, esto se conoce como: **Cavitación Gaseosa**
2. Reduciendo la presión a burbujas llenas de vapor se dice que hay **Cavitación Vaporosa**
3. Por desgasificación del líquido (difusión), esto se conoce como **Cavitación por Desgasificación**
4. Por aumento de temperatura de burbujas llenas de vapor, esto se conoce como **Cavitación por ebullición**

También, se distinguen cuatro diferentes tipos de cavitación de acuerdo de cómo las burbujas son generadas (como la energía es absorbida en el líquido) [19]:

- a) **Cavitación hidrodinámica**: se produce por variaciones de presión debido a los cambios de geometría del sistema que contiene un flujo de algún líquido.
- b) **Cavitación Acústica**: se enfocan ondas acústicas en un líquido que producen cambios de presión local.
- c) **Cavitación Óptica**: es producida por la ruptura del líquido por fotones de alta intensidad (láser enfocado en el interior de un líquido).
- d) **Cavitación por Partículas**: es producida por el bombardeo de partículas elementales enfocadas al interior de un líquido.

No importando el proceso por el cual se logra la cavitación, la concentración de energía se alcanza cuando en el colapso se emite un pulso de luz. En este trabajo nos enfocaremos solo a la cavitación hidrodinámica y la cavitación hidrodinámica luminiscente, la cual se describe en la siguiente sección.

Cavitación hidrodinámica

La cavitación hidrodinámica describe el proceso de la generación e implosión de burbujas que se producen en un líquido que fluye como resultado de una disminución y posterior aumento de la presión (figura 1). La cavitación sólo se producirá si la presión disminuye hasta cierto punto por debajo de la presión de vapor saturado del líquido. En sistemas de tuberías, la cavitación se produce normalmente, ya sea como resultado de un aumento en la energía cinética (a través de una constricción de la zona) o un aumento en la elevación de la tubería [20]. Las burbujas cavitantes liberan energía en forma localizada a través de la emisión de ondas de choque. Durante el corto tiempo que dura el colapso se alcanzan temperaturas ~ 5000 K, presiones ~ 1000 atm y con tasa de calentamiento y enfriamiento >109 K/s, y emisión de chorro de líquido ("jets") ~ 400 km/h. Este proceso se visualiza en la siguiente figura:

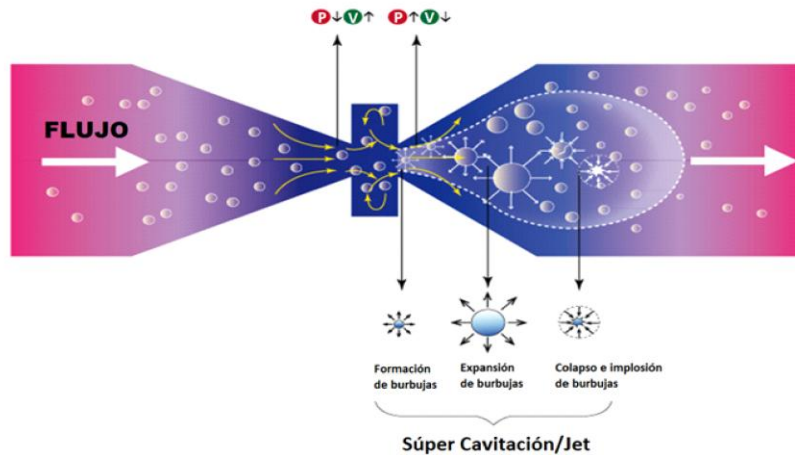
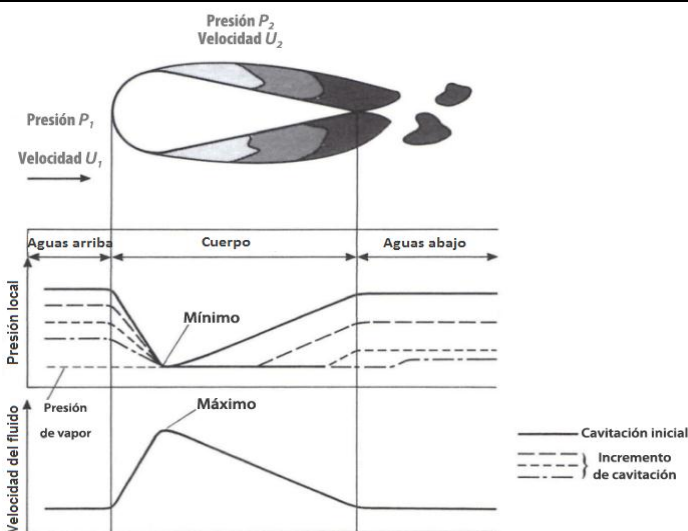


Figura 1. Principio de la cavitación generalizado en un tubo Venturi. En la figura se observan las tres etapas principales de la cavitación: formación de burbujas, expansión de burbujas y su colapso e implosión, [20].

En la figura 2, se muestra la cavitación alrededor de un perfil hidrodinámico, en donde se muestran las graficas de los cambios de presión y velocidad del fluido a lo largo del perfil.



El líquido fluye de izquierda a derecha, se acelera al pasar por la restricción causada por el cuerpo y llega al punto de máxima velocidad y mínima presión en la garganta. Si la presión aguas arriba es suficientemente alta, la presión de la garganta no cae por debajo de la presión de vapor del líquido, pero como la presión aguas arriba se reduce la cavitación se produce y se extiende hacia atrás.

Figura 2. Cavitación alrededor de un cuerpo sumergido en un flujo constante, [21].

Considerando la variación en la presión a lo largo del cuerpo sumergido que se muestra en la Figura 2 y aplicando la ecuación de Bernoulli tenemos:

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho u_1^2 = P_2 + \frac{1}{2}\rho u_2^2 = H \quad (\text{una constante})$$

Donde u es la velocidad en un punto donde la presión es P . Re-escribiéndola:

$$\left(u^2 + \frac{2P}{\rho}\right)^{\frac{1}{2}} = \left(\frac{2H}{\rho}\right)^{\frac{1}{2}}$$

Y si la velocidad del líquido u excede $(2H/\rho)^{\frac{1}{2}}$, la presión en un líquido incompresible debe ser negativa. En esta situación, el líquido tiende a formar cavidades las cuales expanden y equilibran la presión negativa. En situaciones prácticas, la presencia de pequeñas burbujas de gas insoluble o partículas de polvo en el flujo, ayudan a generar la cavitación [19].

La ecuación de Bernoulli nos permite definir un parámetro adimensional σ que mide la relevancia del flujo para la cavitación. El número de cavitación σ , se deduce de la relación entre la presión P y la velocidad del flujo u . La ecuación de Bernoulli establece que la caída de presión será proporcional al producto de la densidad y el cuadrado de la velocidad del flujo. Dividiendo la presión estática disponible, $P_0 - P_v$, por la presión dinámica del flujo conduce a que el número de la cavitación σ es

$$\sigma = \frac{P_0 - P_v}{\frac{1}{2}\rho u^2}$$

donde :

P_0 = Presión estática ambiental

P_v = Presión de vaporización del fluido

$\frac{1}{2}\rho u^2$ = Presión dinámica

El número de cavitación σ mide la resistencia del flujo a cavitarse en forma vaporosa. Cuanto mayor sea el número de cavitación menos probable es que ocurra y viceversa. Si la cavitación ocurre, la reducción del número de cavitación al disminuir la presión estática o por el aumento de la velocidad de flujo incrementará la extensión de la cavitación; aumentando el número de cavitación puede eliminarse completamente [19]. La cavitación producida de esta manera ocurre en hélices, perfiles de hidroaviones, lubricantes, rodillos giratorios, líquidos para maquinaria, válvulas de control, sellos, tubos Venturi y estructuras hidráulicas. La cavitación también se induce por calentamiento de cables y por ruptura de líquidos por alto voltaje.

Consecuencias de la cavitación

Una gran fuerza “local” es la consecuencia del colapso que causa daño a metales, emulsificación, sonoluminiscencia, sonoquímica, triboluminiscencia, homogenización de líquidos, destrucción de microorganismos, radicalización molecular, rompimiento de partículas sólidas, aceleración de reacciones químicas, además de otros fenómenos. Una gran parte de la energía disponible durante el colapso es transferida

y almacenada en una onda de choque antes de que la implosión termine [22]. Además, la cavitación como un inductor de procesos químicos fue desarrollado originalmente en Rusia por la década de 1960 [23]. Hay numerosos procesos cotidianos que emplean cavitación; los ejemplos incluyen pulidores ultrasónicos usados en joyería, litotricia para la destrucción de cálculos renales, instrumentos para la limpieza de dientes y aparatos para la homogenización de fluidos. La cavitación hidrodinámica controlada (CHC) es un proceso que trata de encontrar de manera óptima la cavitación y aprovechar la energía cinética contenida en el fluido sin dañar el aparato usado para producir el fenómeno.

Cavitación en bombas

La Figura 3a muestra el diagrama de una bomba succionado un líquido de densidad ρ y presión atmosférica P_a , a una altura h .

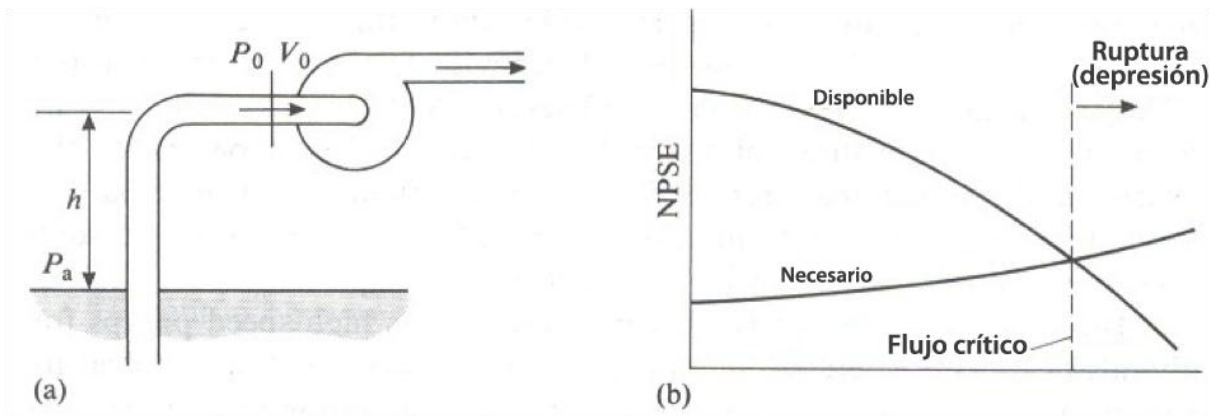


Figura 3. Diagrama esquemático de una bomba de flujo [24].

Si h_p es la pérdida de carga debido a la bomba en la tubería de aspiración; entonces de la Figura 3a tenemos que:

$$\frac{P_a}{\rho} - gh - g h_{pérdida} - \frac{V_0^2}{2} = \frac{P_0}{\rho}$$

en donde si la presión de entrada P_0 desciende cerca de la presión de vapor del líquido P_v , o si la velocidad de entrada V_0 es alta, se producirá lo que se conoce como: cavitación hidrodinámica vaporosa. Por otro lado, si la bomba trabaja a presiones bajas de aspiración cerca del punto de ebullición del líquido es más probable que se produzca la cavitación por ebullición.

El rendimiento de succión que se presenta en una bomba (o cavitación) se evalúa considerando la **energía de succión total positiva o de cabezal** (NPSE o NPSH), representa la energía total por encima a la del vapor, y se define la NPSE disponible en dos formas:

1. En términos de las condiciones externas, y
2. En términos de la condición en la entrada de la bomba

El NPSE disponible es por lo tanto:

$$NPSE = \frac{P_0 - P_v}{\rho} - gh - gh_{pérdidas} = \frac{P_0 - P_v}{\rho} + \frac{V_0^2}{2}$$

Con el fin de evitar los efectos de cavitación, la *NPSE* disponible debe ser igual o superior a la *NPSE* requerida por la bomba. Ya que la pérdida de carga h_p en la tubería de entrada aumenta la velocidad de flujo, la *NPSE* disponible disminuye a velocidades bajas. La *NPSE* aumenta con la velocidad de flujo, por encima de un flujo crítico la *NPSE* que se requiere es mayor a la disponible, ver Figura 3b. En el flujo crítico, la cavitación causa que el flujo y eficiencia caigan, produciendo daños como la erosión y emisión de ruido. Una cavitación severa induce oscilaciones en el eje y pulsaciones de presión superiores a las esperadas por los rodamientos y sellos del fabricante, lo que lleva eventualmente a la falla en estas partes. La cavitación se evita mediante el aumento del diámetro de entrada, aumentando la presión del sistema, reduciendo la velocidad o por el rediseño de la bomba.

Comportamiento ideal y cavitante de una bomba centrífuga

En la figura 4 se muestran las graficas del comportamiento de la presión del líquido en el interior de una bomba de acuerdo a las presiones generadas en sus tres secciones, las cuales son: entrada (aspiración), centro del impulsor y salida (descarga). La primer gráfica muestra el comportamiento ideal en el que las presiones generadas están por encima de la línea teórica de presión de vapor del líquido (considerado flujo normal), mientras que la gráfica inferior el comportamiento de una bomba en donde la presión en la cámara del impulsor está por debajo de la curva de la presión de vapor del líquido (específicamente en la cámara del impulsor), es cuando se produce la cavitación que no es otra cosa que un flujo cavitante.

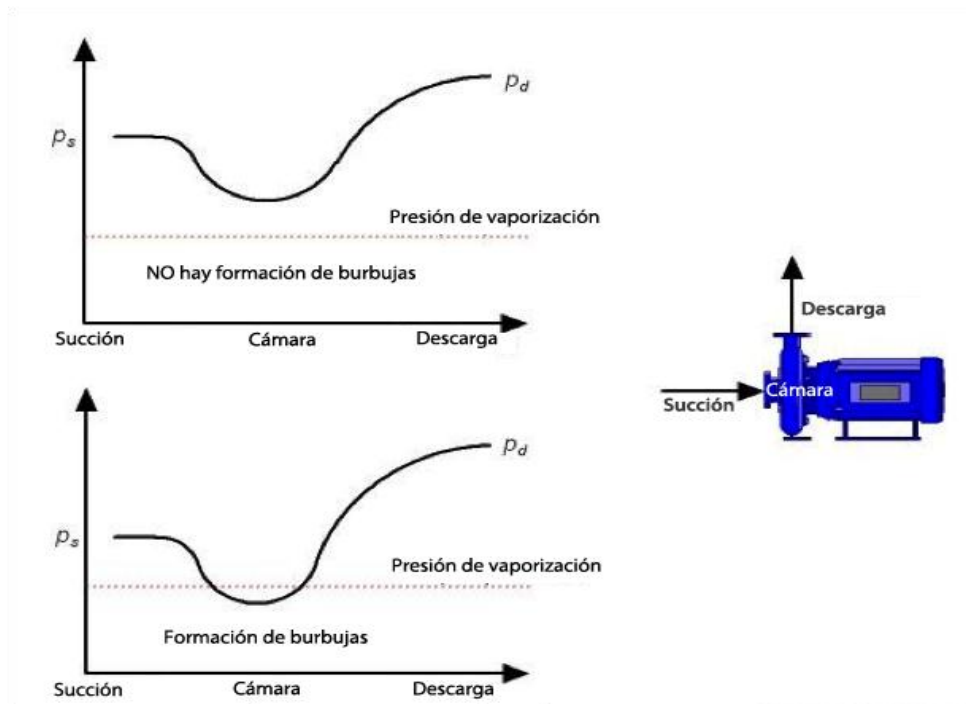


Figura 4. Comportamiento de la presión en las tres secciones de una bomba centrífuga, [25].

Cavitación en tuberías y válvulas

El estrangulamiento o cambio de perfil en tuberías hidráulicas produce una caída de presión local. En la figura 5 se ilustra la caída de presión para un tubo Venturi.

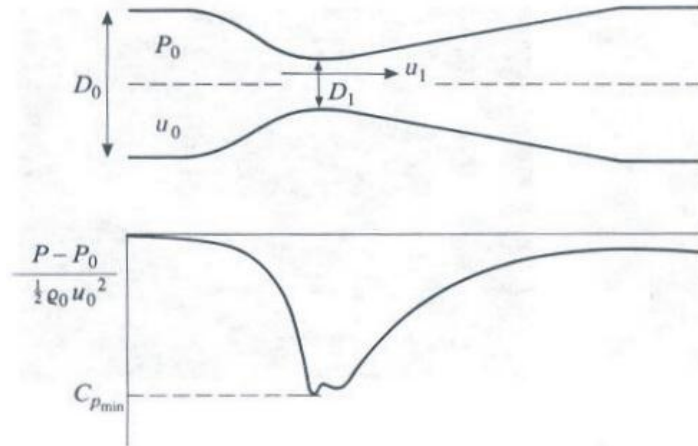


Figura 5. Distribución de presiones para el flujo a través de un tubo Venturi, [26].

Para encontrar el parámetro de cavitación en el dispositivo, una primera aproximación es definir P_1 como la presión en la garganta, así el índice crítico de inserción queda como:

$$|C_{P_{min}}| = \frac{P_0 - P_1}{\frac{1}{2} \rho_0 u_0^2}$$

Ahora, usando la ecuación de Bernoulli para las velocidades del flujo promedio tenemos:

$$P_0 + \frac{1}{2} \rho_0 u_0^2 = P_1 + \frac{1}{2} \rho_0 u_1^2$$

A mayor estrangulamiento mayor velocidad u_1 y menor presión P_1 . Si P_1 se reduce a la presión de vapor del líquido P_v , la cavitación se produce aguas abajo de la garganta del tubo Venturi. Considerando la ecuación de continuidad, tenemos que:

$$u_0 D_0^2 = u_1 D_1^2$$

Por lo que:

$$|C_{P_{min}}| = \frac{P_0 - P_1}{\frac{1}{2} \rho_0 u_0^2} = \left(\frac{u_1}{u_0}\right)^2 - 1 = \left(\frac{D_0}{D_1}\right)^4 - 1$$

Una válvula es una constricción para el flujo y podría producir cavitación, dependiendo de su construcción y el grado de apertura. A mayor apertura menos probable es la cavitación. Es evidente que lo mejor es evitar el uso de válvulas en una posición ligeramente abierta.

También, se podría considerar un número de cavitación en la garganta como:

$$\sigma_T = \frac{P_T - P_v}{\frac{1}{2}\rho u_T^2}$$

en donde P_T y u_T es la presión y la velocidad en la garganta.

Si σ_T se mide ya sea para una válvula u orificio, con estos valores se evalúa el grado de cavitación que se produce.

Para que se de comienzo a la cavitación continua es necesario un valor aproximado de 0.6 y para empezar el daño es alrededor de 0.3 (recordando que entre mayor sea el número de cavitación menor es la cavitación).

En los codos la presión aumenta en la pared exterior y disminuye en la pared interior. Entre más aguda sea la curva ($< 90^\circ$) más probable es la cavitación. También, la cavitación es menos probable si la región de baja presión es pequeña, lo que permite menor tiempo para que los núcleos se conviertan en burbujas.

2.2 Diseño conceptual de la cavitación hidrodinámica luminiscente para la limpieza de agua

Para llevar a cabo este proceso se requiere de los siguientes puntos:

- **Primero:** se necesita formar cavidades (homogénea o no homogéneamente), que debido a las condiciones del agua a tratar, se obtendrá en mayor proporción la cavitación no homogénea, ya que en el agua las partículas suspendidas facilitan este proceso.
- **Segundo:** incrementar el tamaño de las burbujas y asegurar la presencia de vapor del líquido y un porcentaje de aire en el interior de las burbujas.
- **Tercero:** obtener el colapso de las mismas, ocasionando una implosión no lineal para que sea generada la luminiscencia, reacciones químicas, ondas de choque y aumento en la temperatura. Se requiere de cierto porcentaje de aire en el proceso debido a que en él se encuentra Argón, gas inerte que se requiere para llevarse a cabo la luminiscencia.
- **Cuarto:** acoplar un dispositivo para hacer recircular el agua.

En el esquema de la figura 6 se representa en forma simplificada el proceso que se requiere para alcanzar la limpieza del agua por medio de cavitación.

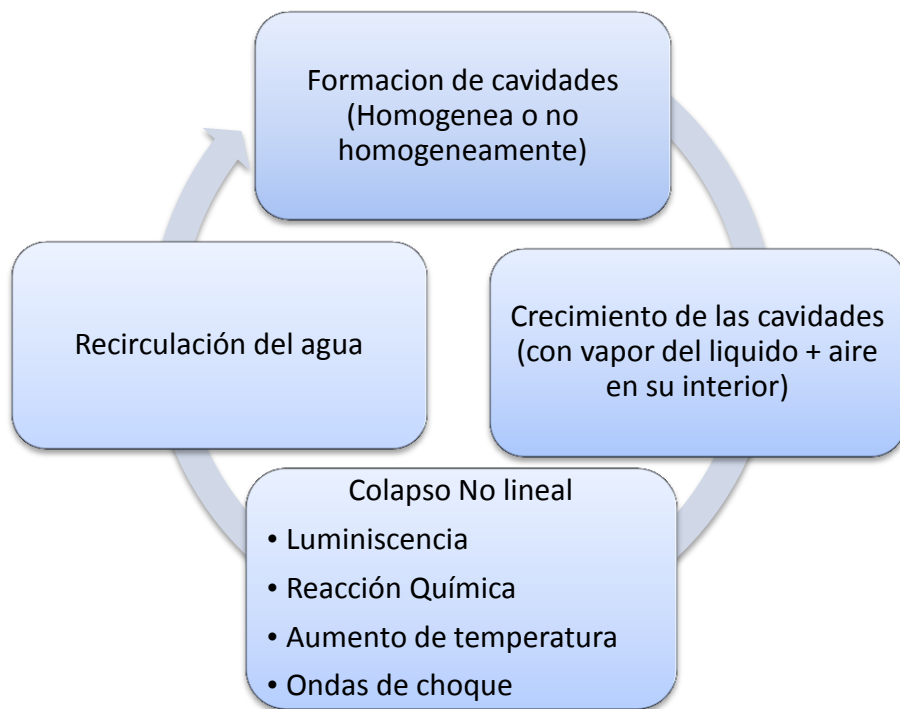


Figura 6. Diagrama a bloques de las etapas que hay que alcanzar para obtener la cavitación controlada.

Circuitos Hidráulicos

Para observar la reproducción de la cavitación hidrodinámica luminiscente se requiere diseñar e implementar un circuito hidráulico el cual nos facilite la medición de los parámetros que afectan su reproducción.

Como una primera aproximación se ensambla un sencillo circuito hidráulico, que tiene como principales componentes; una bomba centrífuga de $\frac{3}{4}$ de HP, una válvula de retroalimentación y un tanque de almacenamiento. Se realiza una modificación al impulsor de una bomba centrífuga y se ensambla un circuito designado “Circuito hidráulico 1”.

Este circuito cuenta con una válvula de retroalimentación de flujo con la cual se regula el gasto cavitante. Después de realizar pruebas exitosas de limpieza de agua con el circuito, se decide aumentar la capacidad de circulación y re-escalar la cavitación incorporando un tubo Venturi. Así, un segundo circuito es implementado con una bomba de 5 HP y un tubo Venturi. Con esta segunda aproximación experimental se logra ver en todo su esplendor la cavitación luminiscente en un flujo másico a alta velocidad. Este segundo circuito es probado nuevamente la limpieza de agua de un colorante orgánico.

3.1 Pruebas de concepto

Diseño preliminar usando una Bomba $\frac{3}{4}$ HP

El perfil de presiones que favorece la cavitación que se produce en la cámara del impulsor de una bomba, establece una zona de generación de burbujas que normalmente no es deseable debido a los problemas de desgaste que se suscitan en los materiales. Sin embargo, en nuestro caso realizamos éste fenómeno aplicando un cambio a la geometría de salida de los alabes del impulsor, así disminuimos aún más el perfil de presiones que se genera en la cámara y con ello generamos más la cavitación.

Para lograr este cometido, se analiza el espacio que existe entre el impulsor y la carcasa de la bomba. El espacio existente nos da una libertad de 5 mm, por lo que se planea la modificación del impulsor, añadiendo una obstrucción, con orificios a la salida de cada alabe, esto con la intención de cambiar súbitamente la presión, ayudando de esta forma a la generación, cambio de tamaño y aumento en el número de burbujas.

Se piensa en la manufactura del impulsor, pero antes de ello se decide hacer dos fases experimentales para probar la viabilidad del proyecto, esto consiste en modificar el impulsor de la bomba, para ello se utiliza una abrazadera de acero inoxidable, actuando como cinturón, colocada en el impulsor, la abrazadera se fija en el impulsor, con ello se pretende simular la acción del cambio de presión por la modificación de geometría.

Después de la modificación del impulsor, la idea del circuito hidráulico, el cual sirviera a nuestro propósito fue el siguiente: Establecer un arreglo que contara con un tanque de almacenamiento, un tinaco de 450 litros de capacidad, éste conectado a la bomba directamente por medio de tubos de PVC de 1 pulgada de diámetro, a los que se les acopla tubo de acrílico de 1 ¼ de pulgada de diámetro por 60 cm de longitud a la entrada de la bomba y otro tubo de acrílico de 1 ¼ de pulgada por 90 cm de longitud a la salida de la bomba (figura 7), esto con la idea de observar el fluido a la entrada y salida de la bomba (antes y después de pasar por el nuevo impulsor), el tubo de acrílico a la salida de la bomba se conectara a la tubería de PVC, la cual desembocara al tinaco.

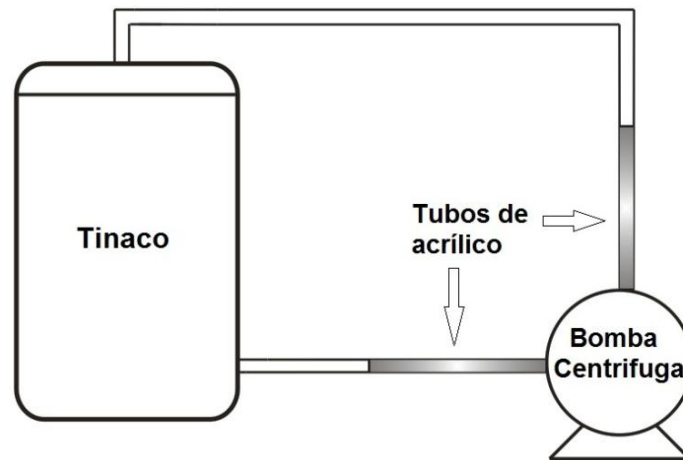


Figura 7. Se ilustra la primera idea planeada para la creación del circuito de pruebas.

El diseño del circuito se propone con la idea de recircular el líquido, el problema que se observa en este diseño es el control que se tiene del flujo, es por ello que no se lleva a cabo. El control del flujo hizo replantear el diseño del circuito, determinando el uso de válvulas para este propósito, por lo tanto, el circuito hidráulico a desarrollar se describe en el apartado 3.3 Implementación del circuito hidráulico 1.

Modificación del Impulsor

Tomando en cuenta las consideraciones para llevar a cabo la generación de cavitación, y analizando las características de un impulsor cerrado de bomba centrífuga (figura 8b), se plantea el concepto de la disminución y posterior aumento de la presión en el impulsor, llegando a la hipótesis de que con la disminución del área a la salida del impulsor se provocara dicho efecto en la presión, para llevar a cabo lo anterior, se modifica el impulsor de la bomba, ajustando una abrazadera de acero inoxidable, la cual tuviera ciertas características, entre ellas que en su totalidad tuviera aperturas u orificios, además de que fuese de un material que no se corra (figura 8a).

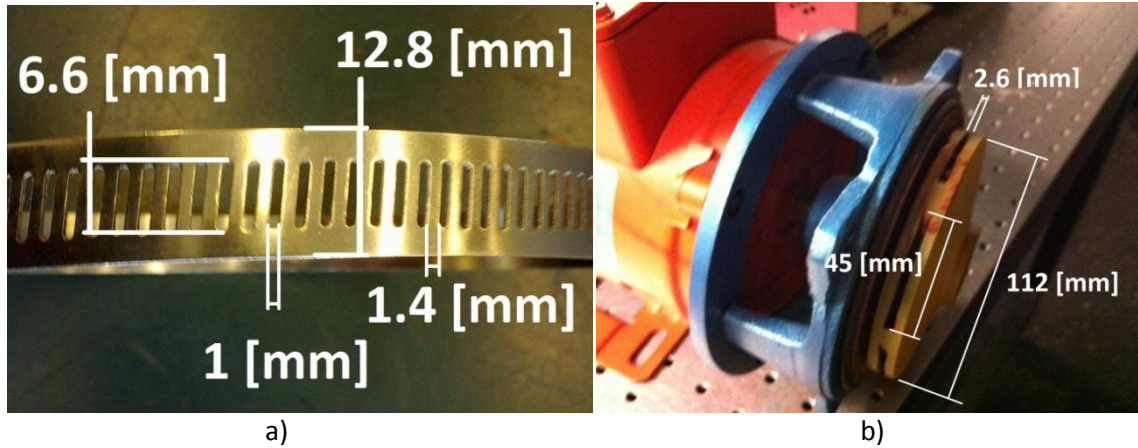


Figura 8. a) Abrazadera de acero inoxidable, en la cual se ilustran las medidas a considerar en la obstrucción del fluido, b) Medidas principales del impulsor cerrado de la bomba centrífuga de $\frac{3}{4}$ de HP.

Las dimensiones de los orificios de la abrazadera son de 6.6 mm de longitud por 1 mm de ancho y una separación de 1.4 mm entre ellas, tomando en cuenta estas medidas y relacionándolas con el diseño del impulsor, el cual es de 112 mm de diámetro y en la salida de los alabes las dimensiones son 2.6 mm de ancho por ~ 45 mm de longitud (ver figura 8), tomando en cuenta que el impulsor consta de 6 alabes con un área de $\sim 102 \text{ mm}^2$ cada uno, la superficie que la abrazadera cubre en el impulsor es de $\sim 58 \text{ mm}^2$, dejando un área descubierta de $\sim 44 \text{ mm}^2$, la cual es por donde pasa el flujo de agua, obteniendo así una reducción de área de $\sim 56.8 \%$.

3.2 Implementación del Circuito Hidráulico 1

El diseño del circuito consta de dos mallas, esto por la válvula de regulación de gasto que se observa en el tubo vertical, que es la válvula principal en el sistema, el diseño del arreglo del circuito 1, se ilustra en la Figura 9.

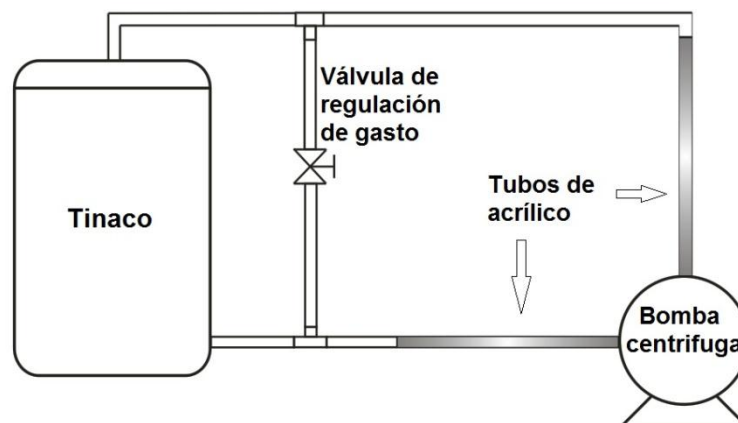


Figura 9. Primer diseño del arreglo para la producción de cavitación

Después del arreglo llevado a cabo en el impulsor, también se modifica la carcasa de la bomba, en esta se incorporan unas ventanas de acrílico (figura 10a) para observar lo que ocurre dentro de la misma, como también se rectifican los accesorios de PVC para que ajusten a los tubos de acrílico, ya que no son de las mismas medidas, este proceso se lleva a cabo por medio de un maquinado en torno mecánico convencional, posteriormente los tubos de acrílico son pegados con resina epoxica a los accesorios correspondientes (figura 10b).

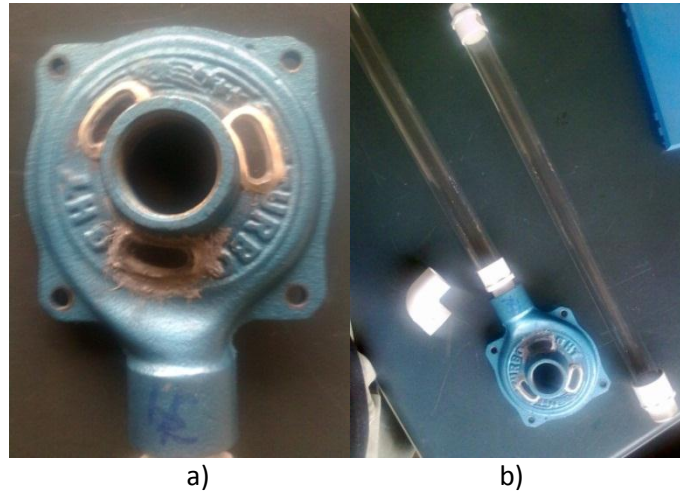


Figura 10. a) Incorporación de ventanas de acrílico a carcasa, b) Acoplamiento de la tubería de acrílico con accesorios de PVC.

El siguiente paso a desarrollar es el armado del circuito, para esto se localiza un espacio donde las condiciones sean las apropiadas para la elaboración del arreglo, ya que se utiliza un colorante orgánico (azul de metileno) en el agua, el cual se degrada con la presencia de luz solar (radiación ultravioleta 200 – 300 nm) (ver capítulo 4.3) por eso es indispensable que el espacio disponible este aislado para garantizar que los resultados en las muestras no sean afectados.

Teniendo el espacio adecuado, se instala el circuito preliminar el cual se muestra en la figura 11.



Figura 11. Primer circuito hidráulico desarrollado físicamente para la producción de cavitación.

En el funcionamiento de este circuito se observa la presencia de burbujas a la salida de la bomba, sin tener claro si este fenómeno es cavitación o simplemente el aire que entra a la bomba por medio de la tubería de succión, debido a la diferencia de diámetros de tubería que se instaló en el sistema, que a la salida del tinaco es de $\frac{1}{2}$

pulgada y a la entrada de la bomba de 1 pulgada, esto ocasiona que el flujo a la entrada de la bomba no sea el adecuado, provocando la presencia de aire en la tubería. Por lo tanto se decide aumentar la distancia entre la bomba y el tinaco para que el flujo se estabilice y haya menor presencia de aire a la entrada de la bomba, esta modificación se tiene que realizar a lo que nos permite el espacio utilizado, lo que obliga a un nuevo modelo hidráulico (figura 12).

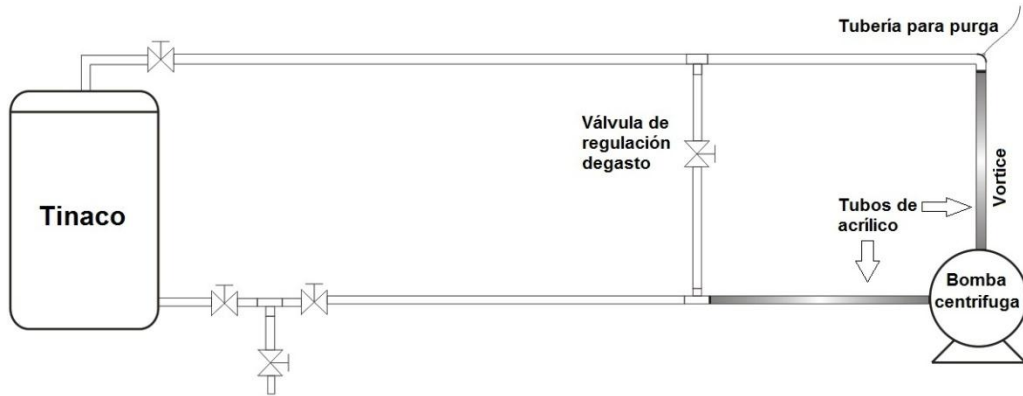


Figura 12. Diseño de distribución de distancias en el circuito hidráulico para estabilizar el flujo a la entrada de la bomba.

En este circuito se destaca la presencia de una tubería para purga en la parte más alta de la salida de la bomba, esto para evitar el exceso de aire dentro de la tubería así como también la colocación de válvulas que se encuentran a la salida del tinaco, para vaciar el mismo cuando se requiera, en la figura 13 se muestra la implementación del diseño con la nueva distribución de distancias. Al hacer funcionar este circuito se observa que la cantidad de aire que entra a la bomba disminuye considerablemente. Al realizar las pruebas se percato que al abrir completamente la válvula de regulación de gasto, la bomba se esfuerza más y por ende se sobrecalienta, causando que se apague repentinamente, estas discrepancias de comportamiento hacen que se establezcan ciertos parámetros para el funcionamiento de la bomba, ya que se producen algunos cambios en la demanda de corriente de la bomba.



Figura 13. Fotos del circuito hidráulico incrementado en la distancia respecto al tinaco y bomba.

En situación normal de operación, la bomba requiere una corriente de 10 A y cuando se modifica el impulsor aumenta a 11 A, un cambio que representa una ligera variación en el desempeño de la bomba, aunque la funcionalidad es bastante parecida; al momento en el que la válvula es abierta, la demanda de corriente alcanza los 23 A, más del doble que la corriente normal, lo que provoca un sobrecalentamiento en la bomba y

subsecuente paro, el tiempo de operación en estas condiciones es de ~ 3 min, y de ~ 15 min cuando la válvula se encuentra cerrada. El hecho de que la bomba deje de funcionar en tan poco tiempo, obliga a realizar modificaciones al circuito de pruebas, una de ellas es la disminución del volumen de agua en el tanque de almacenamiento, que pasa de 250 litros a 130 litros, esto para disminuir el tiempo necesario para que el volumen total de agua cumpla cierto número de ciclos para la toma de muestras.

Pruebas de obtención de flujo cavitante

En la figura 14 se muestra el efecto de la cavitación a diversos niveles de apertura de la válvula de regulación de gasto.

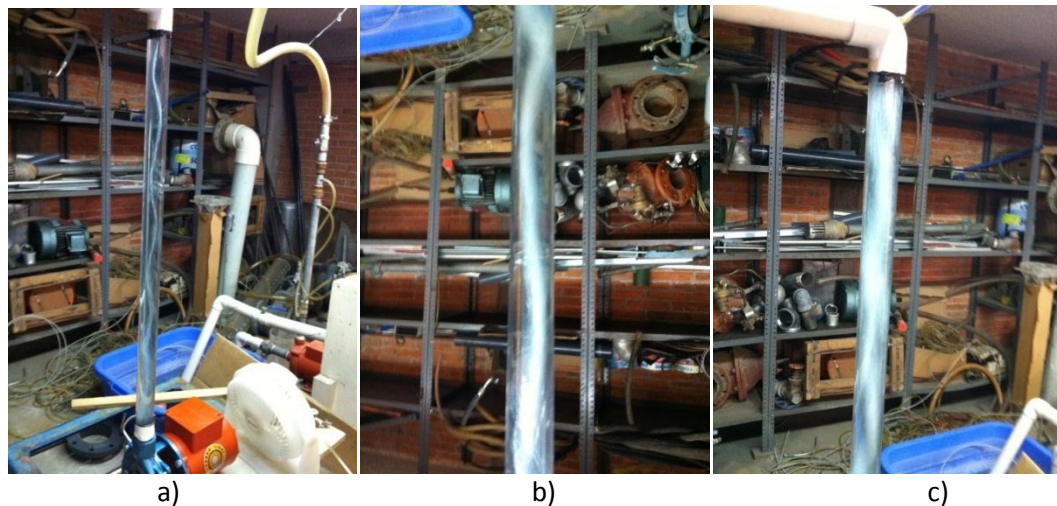


Figura 14. Vorticidad a diversos niveles de apertura de la válvula de regulación de gasto. a) Válvula cerrada; b) Válvula a 50% de apertura; c) Válvula a 80% de apertura.

Por lo tanto la válvula de regulación de gasto se convirtió en la reguladora de la cavitación, debido a que depende de su nivel de apertura para ocasionar un efecto a mayor o menor intensidad. Cuando la válvula se encuentra completamente abierta, la cavitación que se genera es de forma violenta, mientras que al mantenerla cerrada, la cavitación es de tipo vórtice.

3.3 Rediseño e implementación de Circuito Hidráulico 1

El problema anterior sumado al gran volumen de agua que se tiene aún con la reducción a 130 litros, provoca que se opte por cambiar el tanque, por uno de menor volumen. El nuevo tanque tiene una capacidad de 70 litros, que a diferencia del tanque anterior el cual tiene la salida de agua de $\frac{1}{2}$ pulgada de diámetro y a la misma altura de la entrada de la bomba. El nuevo tanque que se utiliza, tiene una salida de 1 pulgada y esta a una altura mayor que la bomba, esto para garantizar que haya una suficiente presión de agua, quedando el rediseño como se muestra en la figura 15.

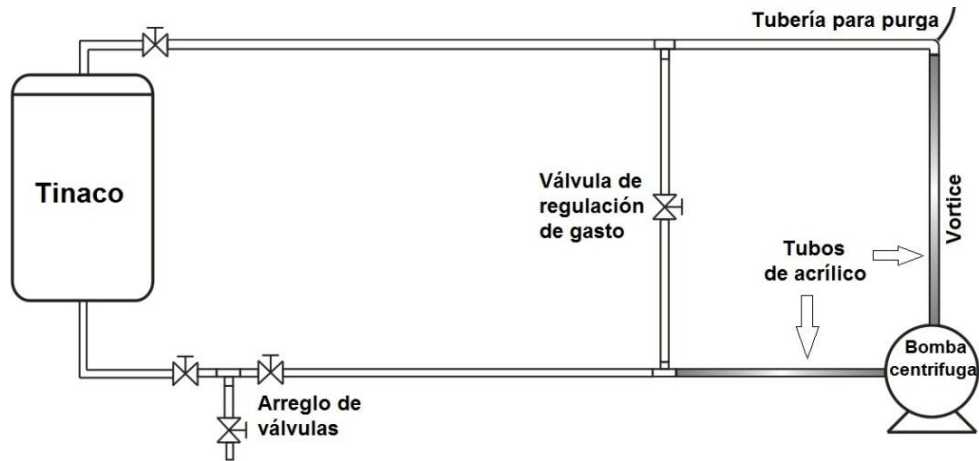


Figura 15. Rediseño del circuito hidráulico 1, donde se muestra cada uno de sus principales componentes.

En la implementación de este circuito se utilizan dos mesas de diferentes tamaños, para que el tanque quede a una altura mayor que la bomba, para esto es necesaria la utilización de tablas, para que la salida de agua del tinaco quede en la parte inferior del mismo (figura 16).



Figura 16. Vista de la salida de agua del tinaco y tablas usadas para incrementar la altura del tinaco.

Considerando el calentamiento de la bomba se colocó un ventilador para atenuar ese efecto e incrementar la duración del funcionamiento de la misma, quedando como se muestra a continuación el circuito final de la bomba $\frac{3}{4}$ HP, ver figura 17. Debido a la distancia que se tenía entre bomba y tinaco se tuvo que implementar un soporte para la tubería y así permaneciera estable el sistema.



Figura 17. Diferentes ángulos de la implementación del rediseño para el circuito de la bomba ¼ HP, donde se muestra la cavitación tipo vórtice a la salida de la bomba.

Pruebas de obtención del flujo cavitante

La metodología que se siguió para probar este sistema, fue efectuar tres casos para realizar la experimentación:

- 1) Agua de la llave
- 2) Agua de la llave + H₂O₂ (40 ml, 30% Vol)
- 3) Agua de la llave + H₂O₂ (40 ml, 30% Vol) + partículas de cobre en polvo (50 gr)

Los tres casos están bajo las mismas condiciones, y en los tres casos se utiliza azul de metileno a una concentración conocida para degradarlo. Para cada caso se tomaron muestras del líquido en función del tiempo de proceso y posteriormente se determinó la reducción del colorante por medio de espectroscopia.

A continuación en las tablas 2, 3 y 4 se despliegan las condiciones y los resultados para cada caso; así como su respectivo espectro de transmisión (figura 18, 19 y 20).

Tabla 2. Azul de Metileno

Gasto	Muestra #	Tiempo (min)	Intensidad (u. a.)
<i>l/s</i>	6	143	9379.37
0.714	5	120	8966.54
	4	85	8966.54
	3	49	8883.86
	2	17	8662.93
	1	6	8378.22
	Original	0	7763.49

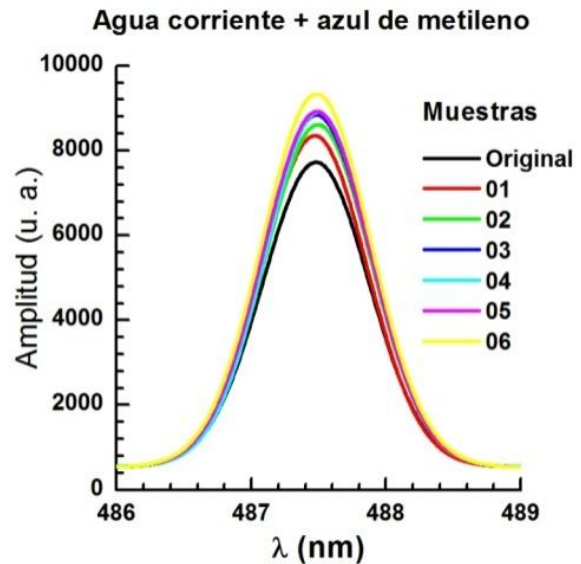


Figura 18. Caracterización del proceso de limpieza usando solo cavitación hidrodinámica.

Tabla 3. Azul de metileno + peróxido

Gasto	Muestra #	Tiempo (min)	Intensidad (u. a.)
l/s	4	58	9298.34
0.714	3	33	8943.05
	2	10	8427.99
	1	0	7832.45

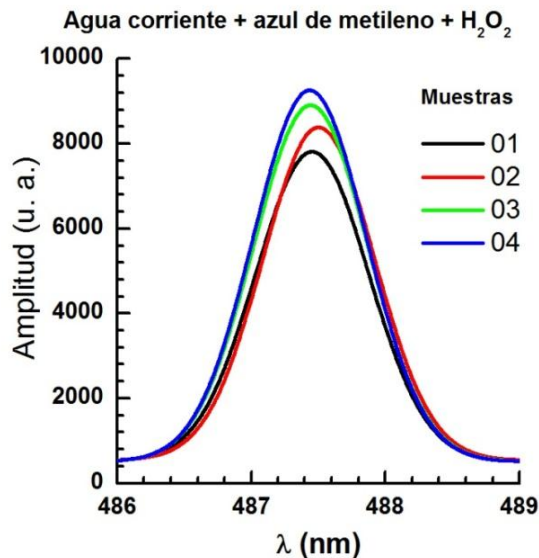


Figura 19. Caracterización del proceso de limpieza usando cavitación hidrodinámica + H₂O₂.

Tabla 4. Azul de Metileno + H₂O₂ + partículas de cobre

Gasto	Muestra #	Tiempo (min)	Intensidad (u. a.)
l/s	5	114	8860.10
0.714	4	97	8460.90
	3	77	8132.96
	2	13	7938.32
	1	0	7729.46

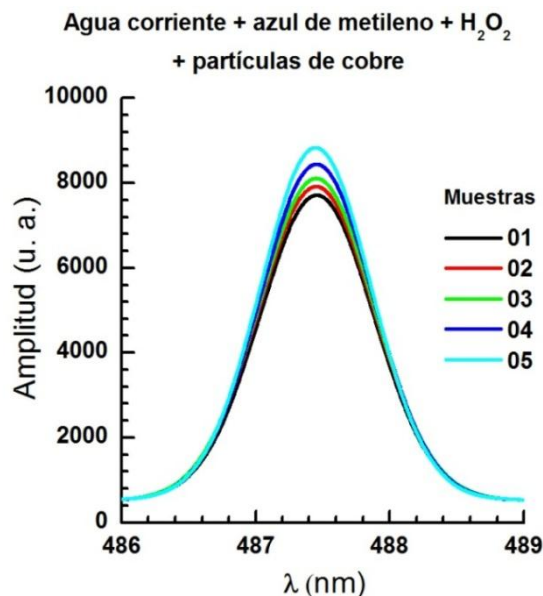


Figura 20. Caracterización del proceso de limpieza usando cavitación hidrodinámica + H₂O₂ + partículas de cobre.

Comparando los resultados de los casos se tiene que en los tres se obtuvo la degradación del azul de metileno, en el primero la limpieza fue lenta, en el segundo caso hubo una buena sinergia entre los procesos y en el ultimo la reacción Fenton se inhibió, por lo tanto, la mejor fue la primera, teniendo en cuenta que a la mezcla no se le añade nada, por tal motivo el experimento es apropiado para llevarse a cabo a mayor escala.

3.4 Diseño y pruebas para escalar la cavitación hidrodinámica con una Bomba Centrífuga de 5 HP y Tubo Venturi

De acuerdo a los resultados en el circuito de la bomba de $\frac{3}{4}$ HP, los cuales fueron satisfactorios respecto a la hipótesis planteada, se decidió escalar el circuito utilizando una bomba centrífuga de 5 HP, para este caso se implemento un accesorio en el cual se pueda intercambiar un tubo de PVC hidráulico convencional por un tubo Venturi, esto a la salida de la bomba, con esto se dispone a observar el comportamiento del fluido a estas dos diferentes situaciones.

Diseño del Circuito hidráulico 2

Para el diseño de este nuevo circuito hidráulico se toma como referencia el circuito 1. Al cual se le integra la purga para el aire en la parte alta de la salida de la bomba, en este caso se coloca una llave de paso para cerrar cuando sea necesario, un accesorio para intercambiar el tubo Venturi y la tubería de PVC y una válvula para la evacuación del fluido en el sistema, además se consideran las dimensiones del lugar donde se tiene que instalar, quedando los diseños como se muestran en las figuras 21 y 22.

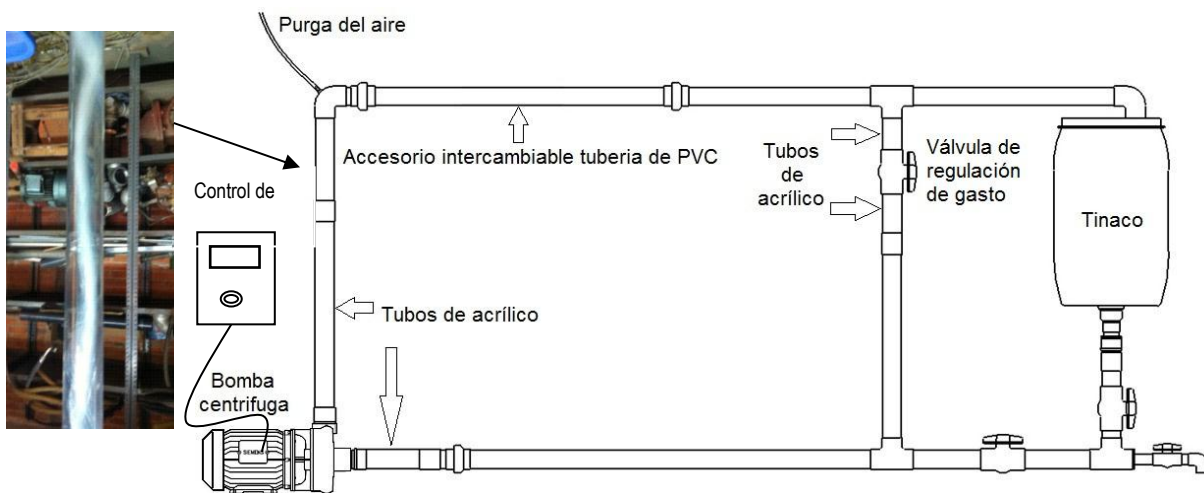


Figura 21. Configuración del circuito hidráulico con bomba de 5 HP, donde se presentan los componentes principales, como son: bomba centrífuga, tubería de acrílico (visualización del flujo), purga par la evacuación del aire, accesorio intercambiable (en este caso tubería de PVC), válvula principal (regulación de gasto) y tinaco.

Tubo Venturi

Es un tubo formado por dos secciones cónicas unidas por un tubo estrecho en el que el fluido se desplaza consecuentemente a mayor velocidad.

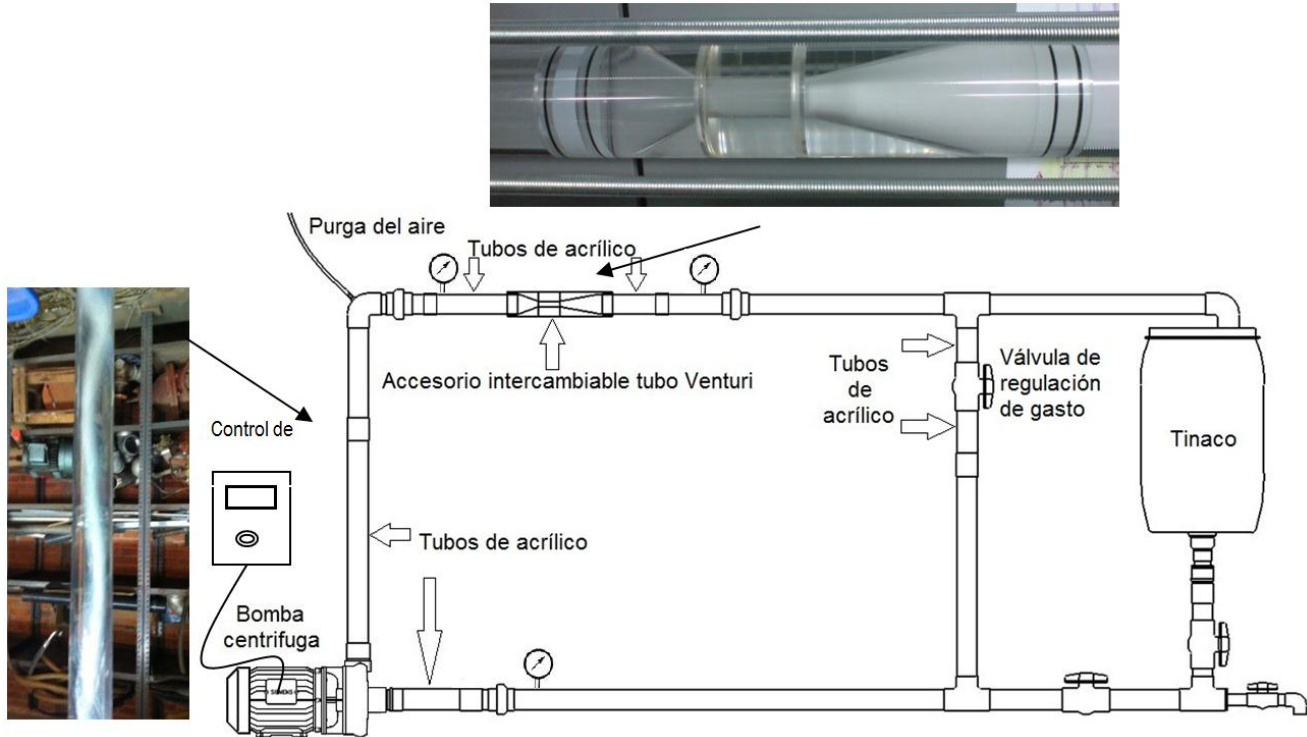


Figura 22. Configuración del circuito hidráulico con bomba de 5 HP, donde se presentan los componentes principales, como son: bomba centrífuga, tubería de acrílico (visualización del flujo), purga por la evacuación del aire, accesorio intercambiable (en este caso tubo Venturi), válvula principal (regulación de gasto) y tinaco.

Para este diseño también se contempla la utilización de tubos de acrílico a la entrada y salida de la bomba centrífuga, válvula de regulación de gasto, y tubo Venturi.

El efecto Venturi se explica por el principio de Bernoulli y el principio de continuidad de masa. Si el caudal de un flujo es constante pero la sección disminuye, necesariamente la velocidad aumenta. Por el teorema de conservación de la energía, si la energía cinética aumenta, la energía determinada por el valor de la presión disminuye forzosamente. Si en este punto del conducto se introduce el extremo de otro conducto, se produce una aspiración del fluido contenido en este segundo conducto (figura 23) [27].

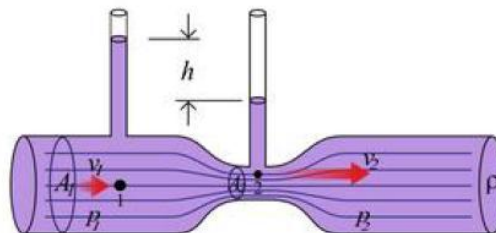
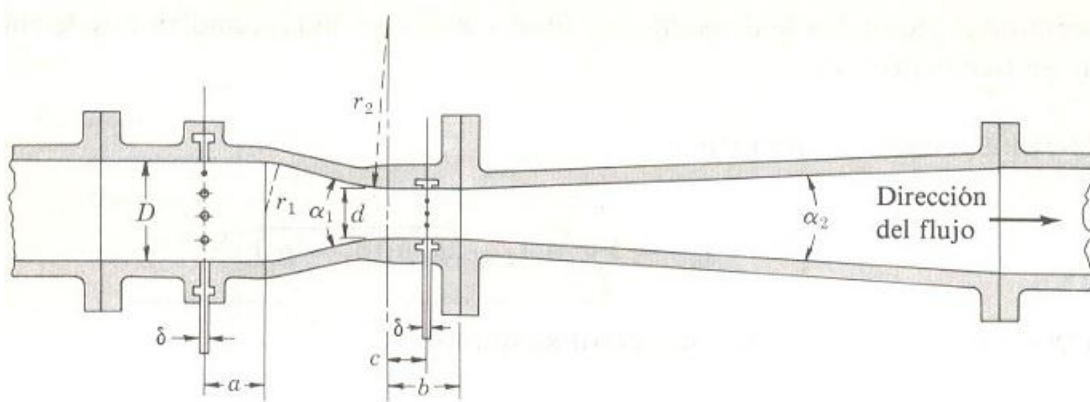


Figura 23. Efecto Venturi [27].

Diseño del Tubo Venturi

En el diseño del tubo venturi, las relaciones se tomaron del estándar de construcción de los medidores con obstrucción, según la Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos (ASME). Las proporciones recomendadas se muestran en la figura 24.



D = Diámetro del tubo en la entrada y en la salida

d = Diámetro de la garganta como se requiera

$a = 0.25D$ a $0.75D$ para $4'' \leq D \leq 6''$, $0.25D$ a $0.50D$ para $6'' < D \leq 32''$

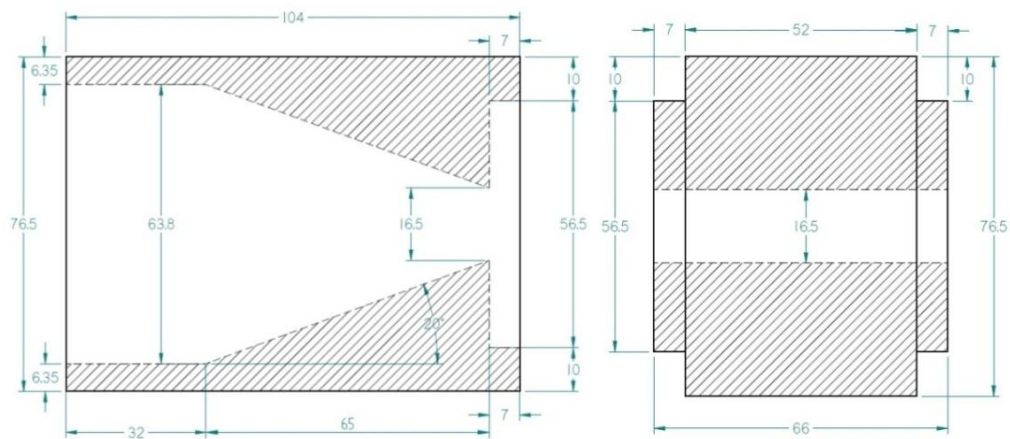
$b = d$, $c = d/2$

δ = de $3/16$ in a $1/2$ in de acuerdo con D . Cámara anular de presión con cuando menos cuatro salidas para piezómetros

$r_2 = 3.5d$ a $3.75d$, $r_1 = 0$ a $1.375D$, $\alpha_1 = 21^\circ \pm 2^\circ$.

Figura 24. Proporciones recomendadas de tubos Venturi [28].

Tomando en cuenta el estándar de ASME se elabora el diseño para el tubo Venturi, el cual consiste en tres piezas quedando representado en los siguientes planos (figura 25 y figura 26).



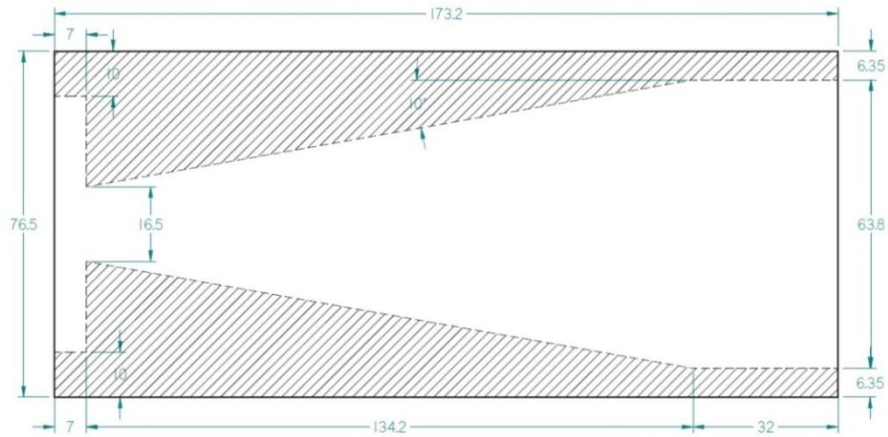


Figura 25. Diseño de las tres piezas del tubo Venturi, (acot [mm]).

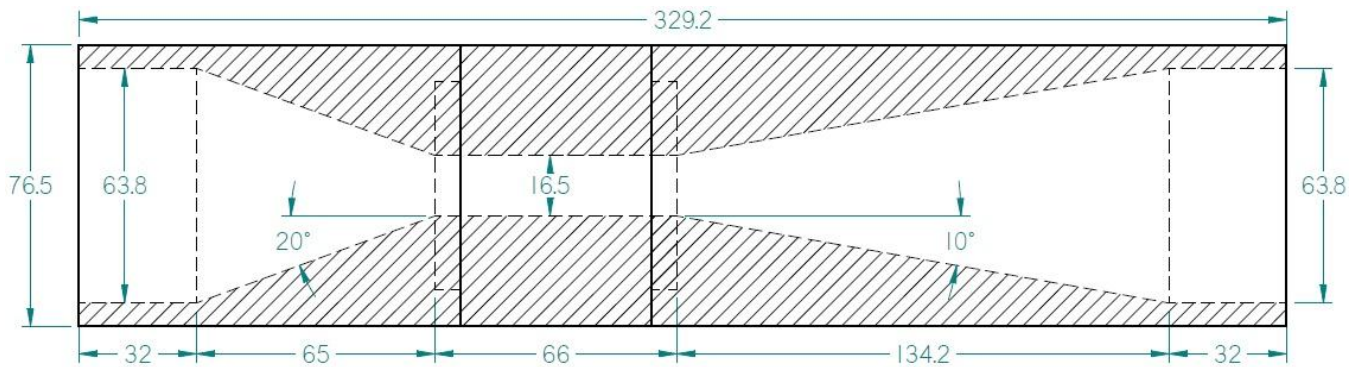


Figura 26. Ensamble del tubo Venturi.

3.5 Implementación del circuito Hidráulico 2

Para la elaboración de este circuito fue necesaria la utilización de un nuevo espacio, ya que en el lugar donde se llevo a cabo la implementación del circuito 1, no se contaban con las instalaciones adecuadas (conexión trifásica, control de temperatura del ambiente “aire acondicionado”, etc.). Teniendo el nuevo espacio con las características necesarias para la implementación del circuito 2, son seleccionados los materiales y accesorios a utilizar, en el caso de la tubería de PVC y acrílico, se utilizaron diámetros de 2 y 2 ½ pulgadas respectivamente, válvulas de bola, coples, conectores, tuercas unión, codos 90° y tubos T, de 2 pulgadas y cédula 40 (figura 27).



Figura 27. Accesorios hidráulicos de 2 pulgadas.

El siguiente paso es el acotamiento del circuito, y el subsecuente corte de la tubería, además del maquinado de los accesorios que se ajustan a los tubos de acrílico, posteriormente se monta cada una de las piezas y se pegan con un adhesivo para PVC, en el caso de la tubería de PVC y con resina epoxica en los tubos de acrílico, debido a las necesidades requeridas para la instalación del circuito, se determina una altura máxima en la tubería, la cual nos permita observar con mayor facilidad lo que ocurre en el sistema, está se establece en ~ 1.40 m. Considerando el nivel de la tubería, la bomba se instala a una elevación cercana al suelo, quedando la tubería de aspiración a ~ 15 cm respecto del mismo, considerando la distancia entre la bomba y salida del tinaco que es de ~ 2.75 m, se colocan apoyos en la tubería de aspiración para hacer resistente el circuito (figura 28).

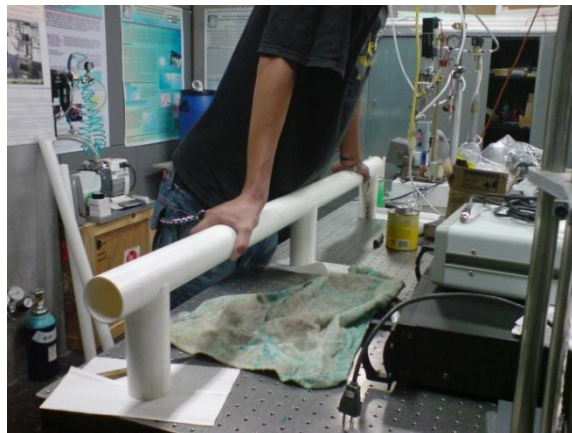


Figura 28. Implementación de los apoyos en tubería de aspiración.

Para este circuito la bomba fue modificada en el impulsor, como en el caso del circuito hidráulica 1 (capítulo 3.1), que a diferencia de la metodología usada para la modificación del impulsor anterior, en este caso se utilizó resina epoxica, solo para sujetar la abrazadera al impulsor, posteriormente se fijó con plastilina epoxica como se muestra en la figura 29.

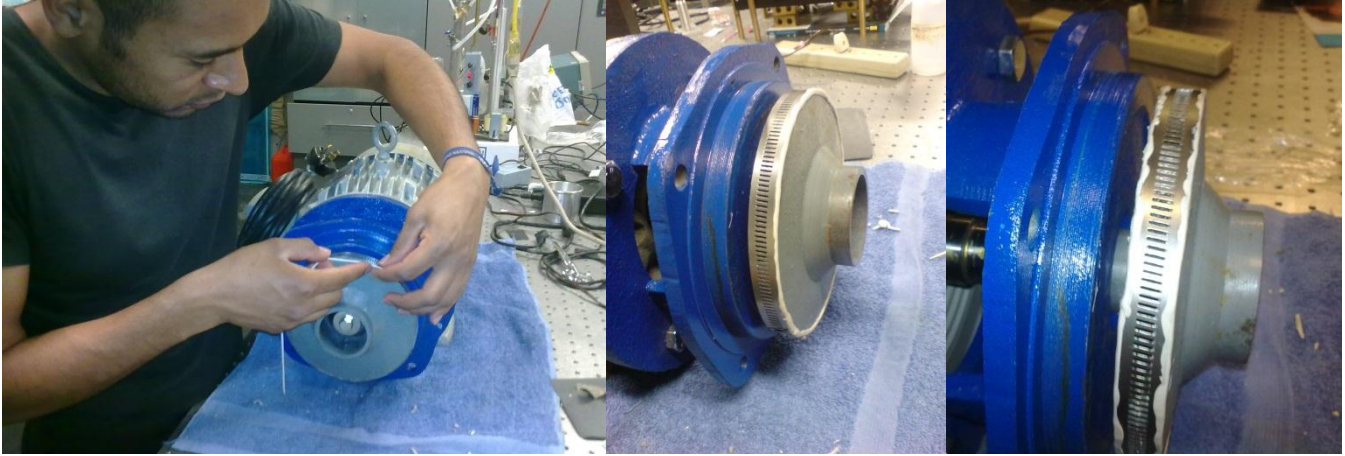


Figura 29. Proceso de modificación del impulsor usando plastilina epoxica.

Se construyo una base para que en ésta se fijara la bomba (figura 30), como también se instalo un guarda motor de la marca Schneider Electric® para arrancar la bomba y protegerla de cualquier sobrecarga, las especificaciones se muestran en la tabla 5.



Tabla 5. Especificaciones del guarda motor GV2ME21

Especificación	Valor
Categoría	Arrancador y Protector de Motor
Máximo Voltaje	600 VAC
Numero de Polos	3–Polos
Ajuste del control térmico	17A a 23A
Valuación de Caballos de Fuerza	5HP@200VAC – 7.5@230VAC – 15HP@460VAC – 20HP@575VAC

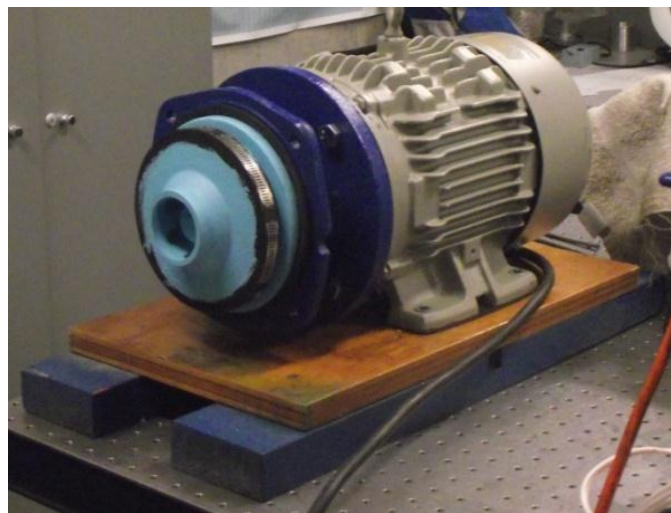


Figura 30. Base de madera empleada para figar la bomba.

Teniendo el circuito armado, se sujeta con tensores para fijar el sistema y reducir las vibraciones que se generen por el funcionamiento de la bomba (circulación del líquido), quedando implementado el primer diseño de la bomba de 5 HP como se muestra en la figura 31.



Figura 31. Circuito hidráulico bomba 5 HP, donde se muestra el arreglo de los tensores para reducir las vibraciones presentes en el sistema.

En la elaboración del accesorio intercambiable en el cual se re-escala la cavitación con la utilización de un tubo Venturi, se utilizan dos arreglos de tubos, los cuales se unen a los extremos del tubo Venturi, estos arreglos consisten de una tuerca unión, tubo de PVC, cople de PVC y tubo de acrílico, este ultimo se acopla al tubo Venturi (figura 32), el otro accesorio solo consta de un tubo de PVC hidráulico unido a una tuerca unión a cada extremo.



Figura 32. Accesorio del tubo Venturi.

Se seleccionan los lugares en donde se colocan manómetros diferenciales los cuales miden la presión del fluido, para esto se maquinan las bases en donde se colocan, éstas se fabrican con varilla de acrílico de 1 pulgada de

diámetro y ~3 cm de longitud, con un barreno al centro de ~7/16 de pulgada, en general los manómetros se colocan a la entrada y salida de la bomba y en el caso del tubo Venturi, a la entrada y salida del mismo, en la figura 33, se muestra la posición de los manómetros en el circuito hidráulico con tubo Venturi.



Figura 33. Circuito hidráulico de la bomba de 5 HP con tubo Venturi y manómetros instalados.

3.6 Modificación del Impulsor y manufactura del tubo Venturi

Modificación al Impulsor

Teniendo la abrazadera adecuada a nuestro propósito (ver sección 3.1), la cortamos y la soldamos de tal manera que ajuste con el impulsor. El área de contacto entre el impulsor y la abrazadera se limpia, teniendo lo anterior, se pega la abrazadera al impulsor con una resina epoxica, procurando no dejar un excedente de material en el impulsor para que no provoque inconvenientes a la hora de hacer funcionar la bomba, así como también asegurar que la modificación sea durable (figura 34).

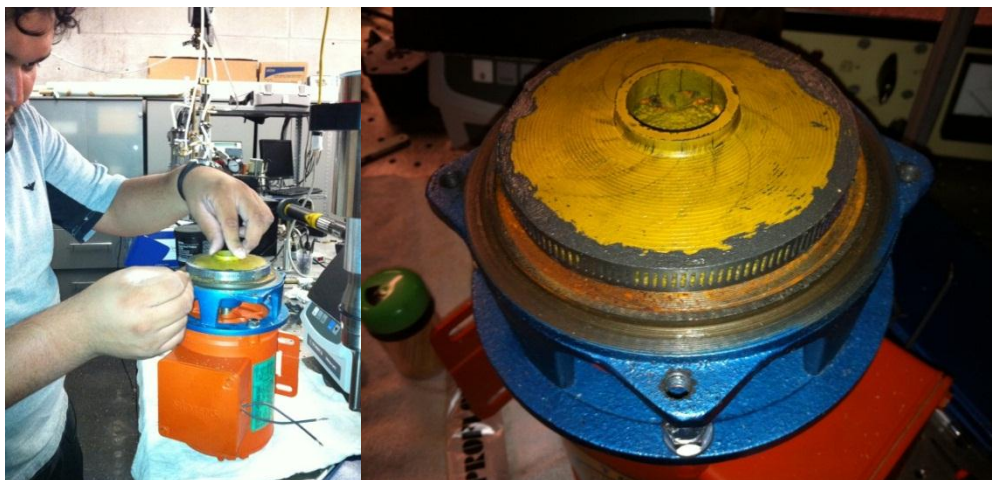


Figura 34. Aplicación de la resina epoxica.

Tubo Venturi

Teniendo los planos elaborados, el siguiente paso es su manufactura, la cual se describe brevemente a continuación:

- El material que se utilizó para la realización del tubo Venturi fue acrílico, el cual se eligió por sus propiedades (material translúcido, resistente a altas temperaturas 160°C punto de fusión, resistencia al impacto, baja densidad, etc.), las cuales nos permitan observar lo que ocurre en el fluido, se utilizó una placa de acrílico de ½ pulgada de espesor, a la que se le realizaron cortes cilíndricos de ~90 mm de diámetro con ayuda de una cierra cinta y se barreno el centro de cada pieza quedando como se muestra en la figura 35.

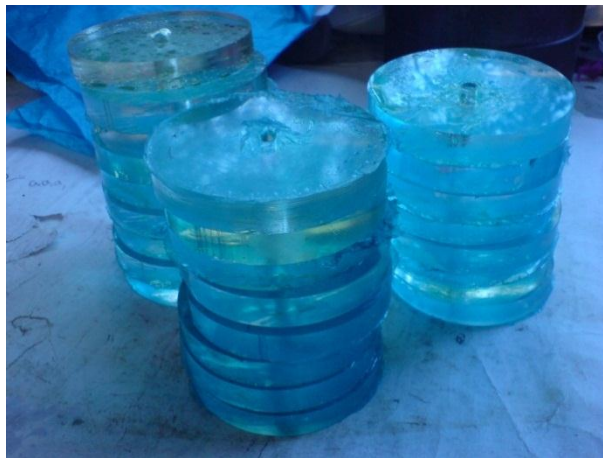


Figura 35. Cortes de la placa de acrílico.

- Teniendo las piezas cortadas de la placa de acrílico, se pegan con un adhesivo para obtener cada una de las partes cilíndricas requeridas para la manufactura del tubo Venturi (figura 36a), la forma de llevar a cabo este paso fue con la utilización de una prensa manual y una barra del diámetro del barreno que se realizó a cada pieza que se cortó de la placa, como se muestra en la figura 36b.

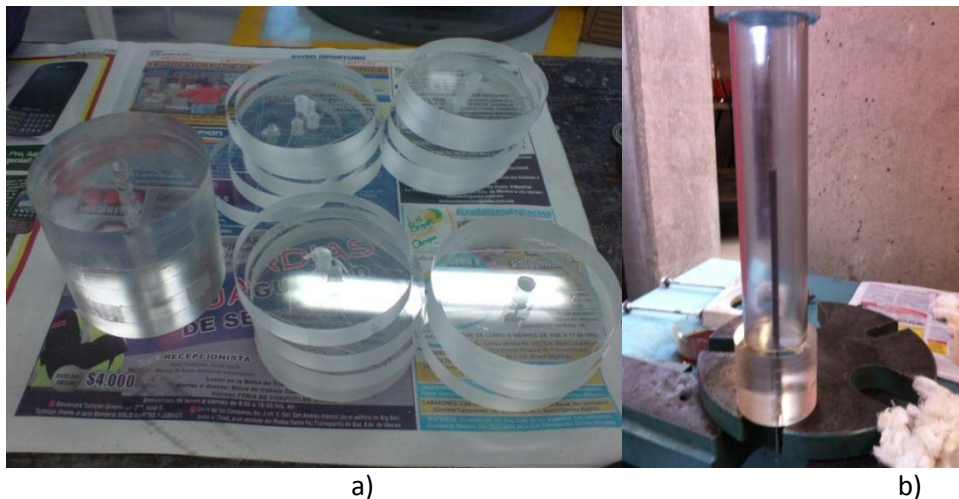


Figura 36. Metodología para pegar las piezas.

- Cada una de las piezas se maquina en torno mecánico con las operaciones denominadas cilindrado y careado para dejarlas al diámetro requerido y a la longitud deseada respectivamente (figura 37a), después de esto las piezas son pulidas para que adquieran una apariencia translúcida como se puede observar en la figura 37b.

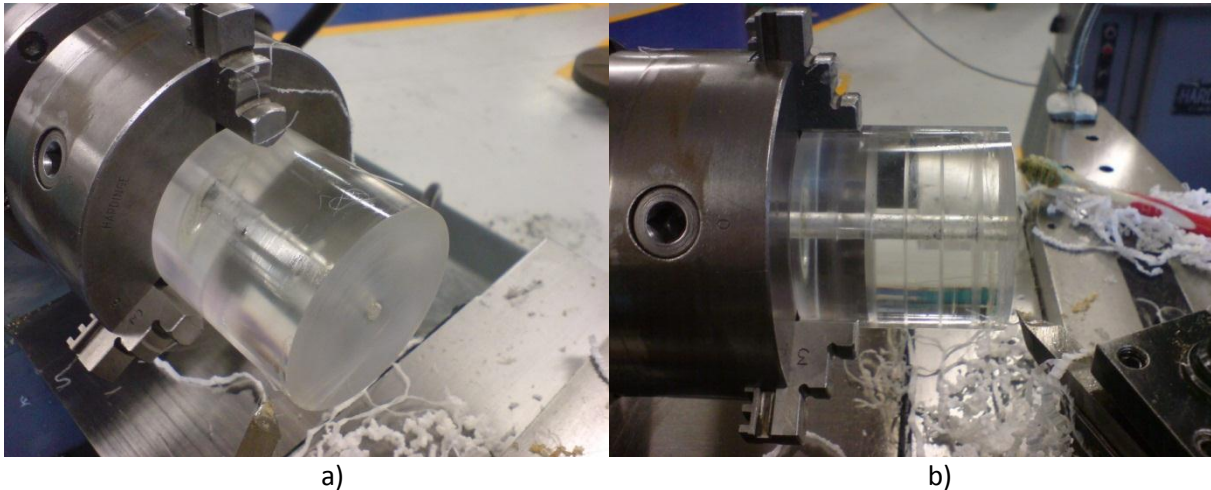


Figura 37. a) Ajuste de dimensiones, b) pulido de la pieza.

- El siguiente paso consiste en maquinar el interior de cada parte que va a constituir el tubo Venturi, para la segunda sección, que es la pieza central del tubo, se realiza un cilindrado recto interior con una barra y/o buril para interiores hasta obtener el diámetro deseado y sobre toda su longitud (figura 38).



Figura 38. Cilindrado interior.

- Para las partes de los costados, el proceso es diferente, en estos casos primero se lleva a cabo una operación de cilindrado interior a una longitud de 32 mm y un diámetro de 63.8 mm, para que embone con la tubería previa y posterior al tubo Venturi (figura 39), seguido de la operación de cilindrado cónico interior para así obtener los ángulos convergente y divergente de cada pieza.

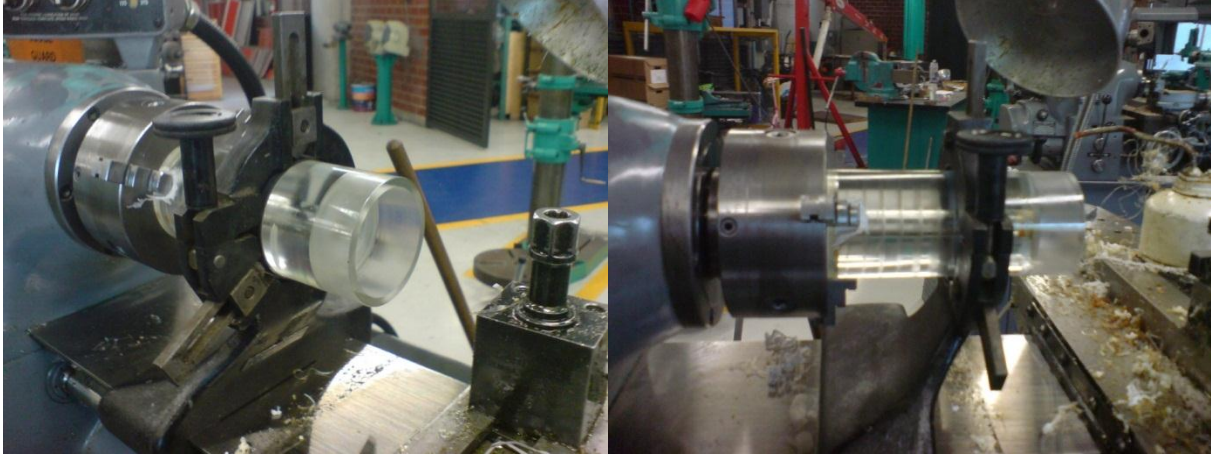


Figura 39. Manufactura de la zona de conexión con la tubería previa y posterior al tubo Venturi.

- El siguiente proceso que se realiza es maquinar la sección en la cual se unirán las partes del tubo Venturi, en este caso, la pieza central se realiza diferente a la de los extremos, en la cual la operación de cilindrado es exterior de 7 mm de longitud por 10 mm de profundidad, quedando con un diámetro de ~ 56.5 mm, como se muestra en la figura 40, y en las piezas de los extremos el cilindrado es interior de 7 mm de longitud por un diámetro de ~ 56.5 mm.



Figura 40. Maquinado de acoplamiento.

- El proceso subsecuente en la manufactura del tubo Venturi es la realización de ranuras para arosellos (figura 41a), esto con la finalidad de garantizar que no haya fugas entre cada una de las piezas y por ultimo se realiza el proceso de roscado en las partes de unión de cada pieza, cabe mencionar que en las partes de los extremos el roscado es interno y en la parte del centro el roscado es externo (figura 41b).

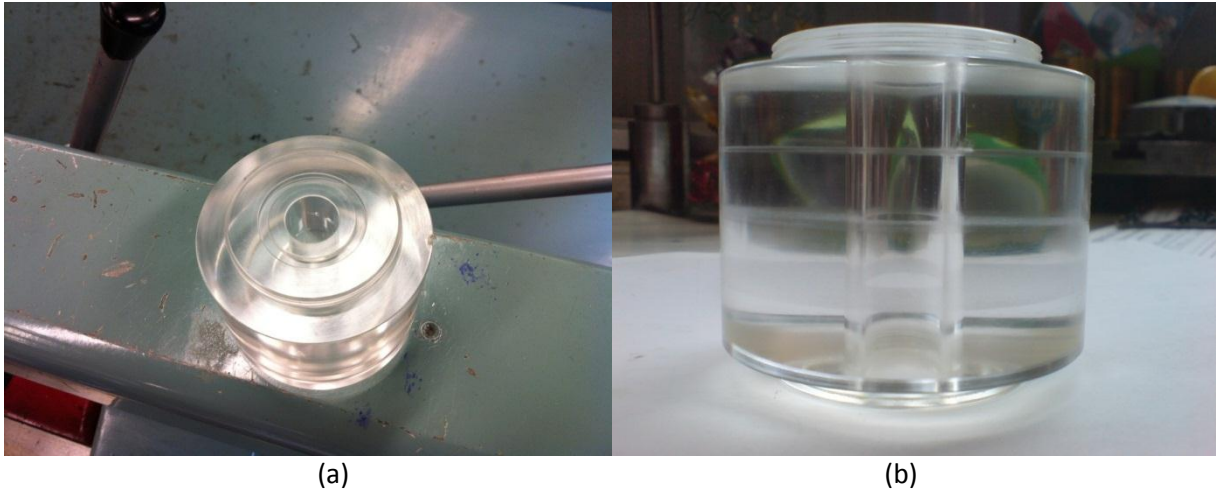


Figura 41. a) Ranura para arosellos, b) roscado exterior.

- El último paso en la elaboración del tubo Venturi es su ensamble, el cual queda como se muestra en la figura 42.

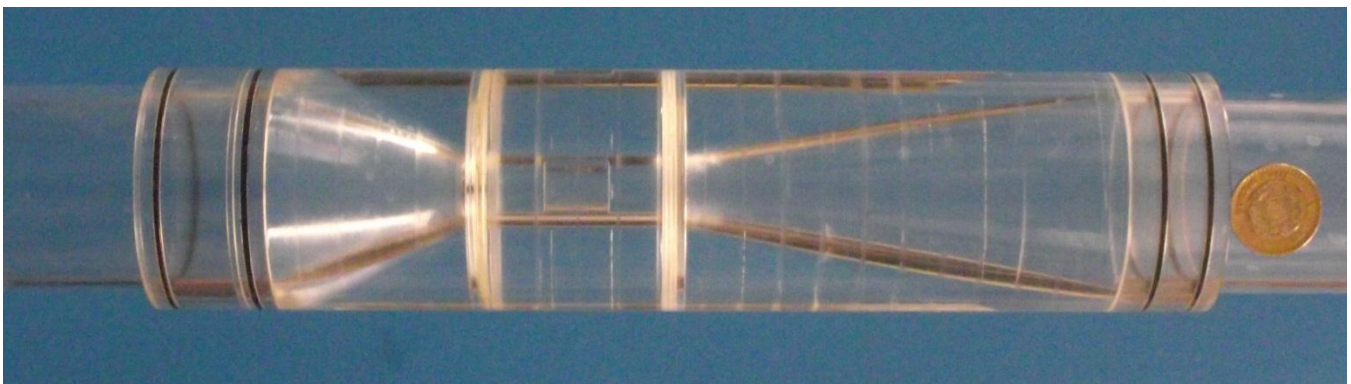


Figura 42. Tubo Venturi terminado.

Pruebas del flujo cavitante y luminiscencia al circuito hidráulico 2 (Bomba 5 HP)

Al circuito hidráulico de 5 HP se le realizaron dos pruebas, la primera se realizó al circuito sin la implementación del tubo Venturi y la segunda con la implementación del tubo Venturi, estos casos se describen a continuación:

Caso 1: Circuito hidráulico simple.

En la prueba realizada a este circuito se alcanza la cavitación tipo vórtice, solo que a diferencia del obtenido en el circuito 1, este vórtice es más violento, y solo se distingue con la válvula de regulación de gasto totalmente cerrada, si esta válvula se abre, lo que se observaba es solo un flujo continuo de burbujas.

Caso 2: Circuito hidráulico con tubo Venturi.

Para este circuito al hacerlo funcionar, la presión que se genera a la salida de la bomba y entrada del tubo Venturi es mayor a la soportada por el conector (3.5 atm), considerando que a éste se le removió material para acoplarlo al tubo de acrílico, causando que el conector no soporte toda esa carga y por ende se fracture (figura 43), ocasionando que se vuelva a maquinar el accesorio, pero ahora se utiliza un conector hidráulico de PVC cédula 80, el cual soporta la carga suministrada por el sistema, aun con la remoción de material. Otro percance es la estabilidad del sistema, la cual provoca que surjan fugas entre la tubería de acrílico y tubo Venturi. Debido a la presión antes mencionada, la solución inmediata a este percance es la utilización de tensores que sujetan el tubo Venturi para que no se desplace y cause el desprendimiento de la tubería que lo conforma (figura 44).

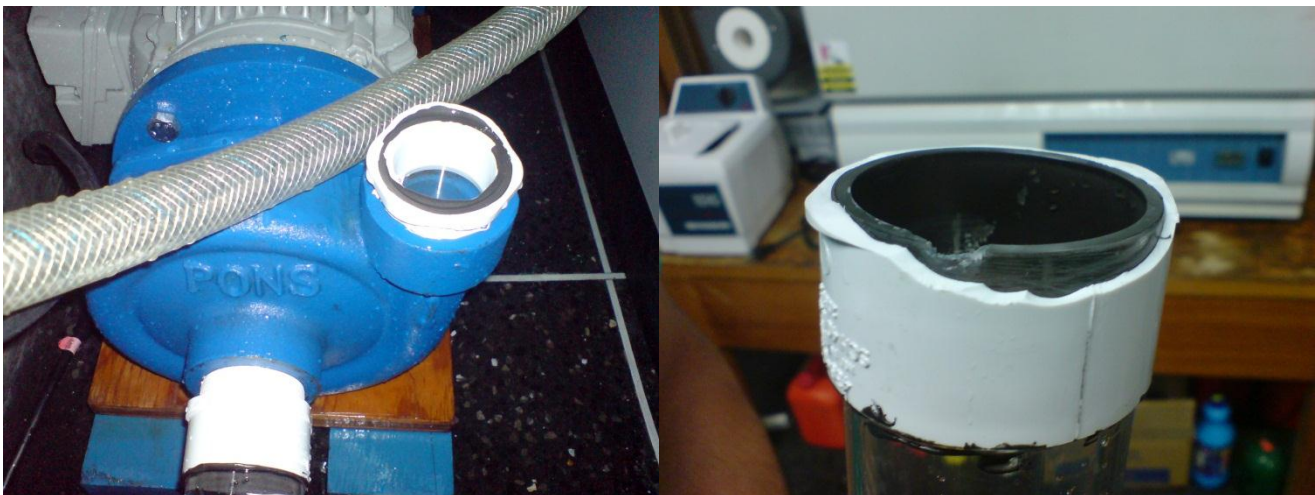


Figura 43. Fractura del conector a la salida de la bomba.

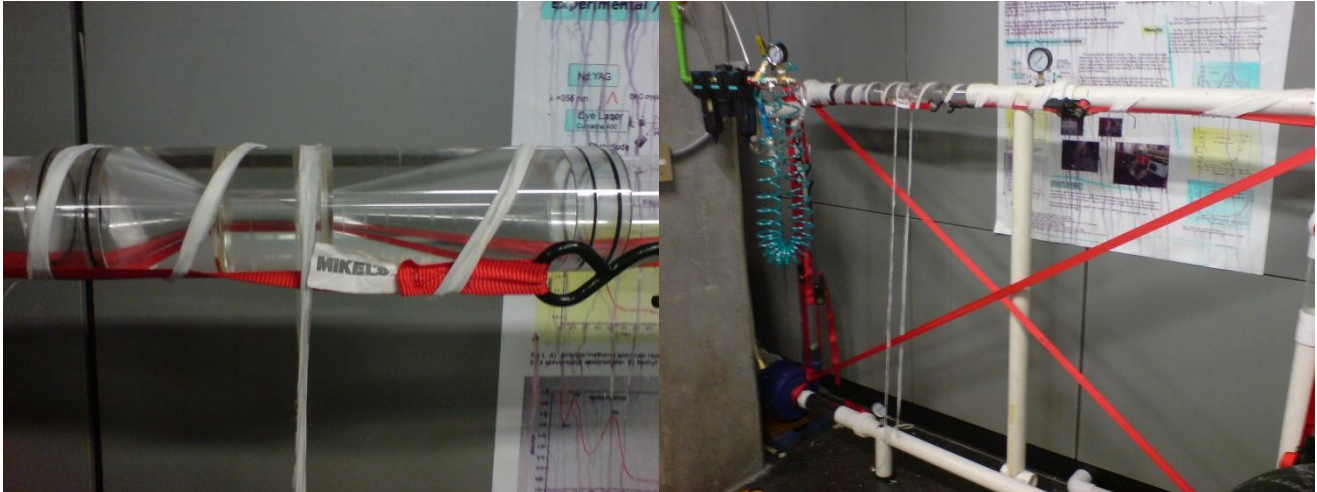


Figura 44. Sujeción del tubo Venturi con sensores.

4.1 Rediseño e implementación del circuito hidráulico 2

Debido a las fugas en el accesorio del tubo Venturi se optó por adaptar un sistema, el cual nos garantizara una completa inmovilidad del tubo Venturi con los tubos de acrílico, a los cuales está acoplado el sistema propuesto, para este objetivo se considera la utilización de dos bridas de PVC hidráulico de 2 pulgadas cedula 80, colocadas a los extremos del accesorio del tubo Venturi, cuatro espárragos de 3/8 de pulgada por 120 cm de longitud, tuercas y rondanas de 3/8 de pulgada (figura 45). Debido a que en el circuito hidráulico, ya no se podían hacer modificaciones (quitar y/o despegar accesorios), se optó por la modificación de las bridas para que éstas fueran colocadas en el circuito, el proceso que se realizó es descrito a continuación:

- La modificación que se efectuó en las bridas, fue realizar una ranura de 65 mm perpendicular al origen, en la cual se introdujera la tubería del circuito, la ranura fue maquinada en una cierra cinta, con el objetivo de volver a colocar la parte que se cortara de la brida.
- Se manufacturaron placas de acero de ~ 1 mm de espesor, estas placas fueron diseñadas para proporcionar una resistencia extra a la brida modificada, debido al corte realizado en éstas, las placas tienen la forma del perfil de las bridas.
- Se colocaron las bridas en la tubería del circuito, para que posteriormente fueran pegadas a la pieza que se removió con el corte realizado a la brida, el pegamento utilizado en esta etapa fue plastilina epoxica.
- Teniendo ambas bridas acopladas y pegadas, se colocan las placas de acero, los espárragos, las rondanas y las tuercas, estas últimas se utilizan en ambas partes de la brida y se ajustan sin la necesidad de utilizar algún tipo de herramienta.



Figura 45. Modificación del accesorio del tubo Venturi.

Una de las finalidades de esta modificación fue que este diseño permitiera el intercambio entre los accesorios (tubo PVC y Venturi).

Al hacer la modificación anterior se aprovechó para destapar la bomba y verificar si había indicios de daño por cavitación, tanto en la carcasa como en el impulsor, estos daños no se encontraron, solo presencia de oxido, lo que llevo a que se limpiara toda la superficie interior de la bomba. Lo que se logra observar en el impulsor es el desprendimiento de la plastilina epoxica, la cual a elevadas revoluciones y sometida a la presencia de agua adquirió una textura blanda, lo que ocasiono su desprendimiento, por tal motivo se retiro todo residuo de plastilina epoxica en el impulsor, para aplicar resina epoxica en su lugar (figura 46a), ya que éste material resulta con mejores características mecánicas para nuestra aplicación. Después de haber concluido la limpieza de la bomba, se le aplican dos capas de pintura para alberca con la finalidad de protegerla de la corrosión, los acabados se muestran en la figura 46b.

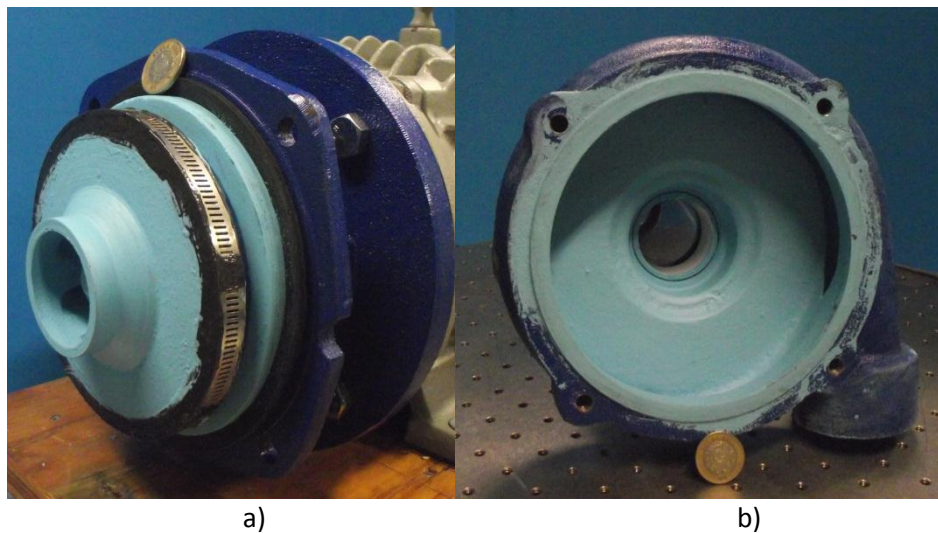


Figura 46. a) Muestra el acabado de la resina epoxica y de la pintura en el impulsor, b) Acabado de la carcasa después de aplicar la pintura para alberca.

El siguiente paso en el proceso fue armar la bomba y colocarla en el circuito, así como todo el armado del mismo, se vuelven a colocar los tensores para que el sistema quede completo y listo para su funcionamiento, este circuito se presenta en la figura 47.



Figura 47. Ajustes realizados al circuito hidráulico 2.

Pruebas al flujo cavitante

Después de haber terminado el rediseño del circuito hidráulico, y consiguiendo la ausencia de fugas, se observó el comportamiento del flujo al pasar por el tubo Venturi, que a la entrada del mismo se presentó un flujo de burbujas, éstas se incrementaron al pasar por el cuello del tubo Venturi, y a la salida del mismo, su incremento fue mayor, dando la ilusión que el flujo pareciera ser solo de burbujas, como se presenta en la figura 48.

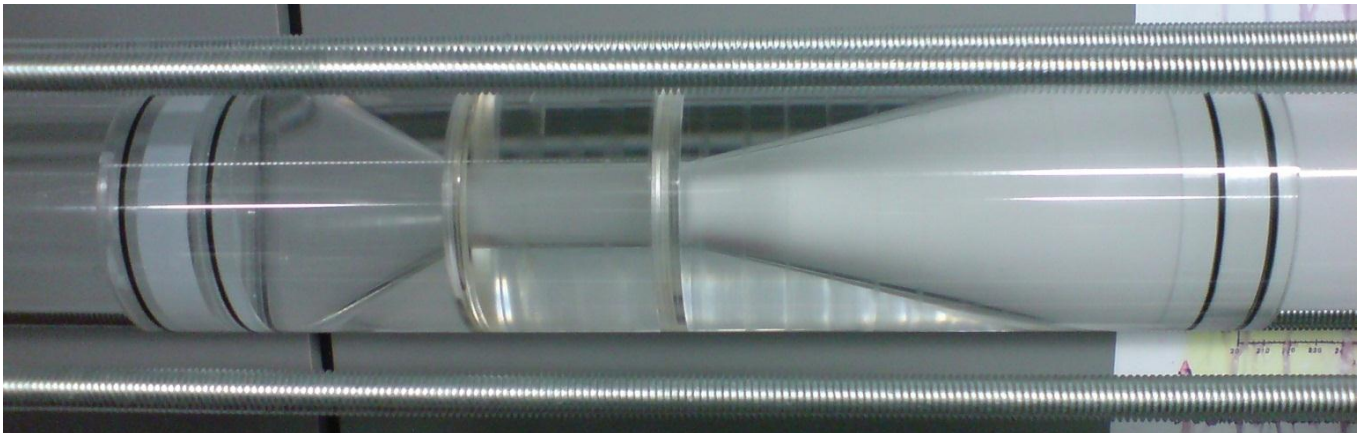


Figura 48. Presencia del flujo cavitante en tubo Venturi.

Teniendo la re-escalación de la cavitación en el tubo Venturi, se continuó con las pruebas para determinar si se presentaba la cavitación luminiscente. La primera prueba realizada para determinar la luminiscencia fue hacer funcionar el sistema en un cuarto oscuro, con lo cual se logró determinar la presencia de luz, la mayor manifestación de luz ocurrió de 10 a 15 cm de distancia a la salida del tubo Venturi (pequeños destellos de color azul tenue), por lo cual se determinó realizar más pruebas las cuales comprobarían lo que se observó a simple vista.

El arreglo experimental usado en la determinación de la cavitación luminiscente y equipo utilizado para la misma, son descritos en las siguientes secciones.

Arreglo experimental

A continuación se presenta el arreglo implementado para la detección de luminiscencia en el recorrido del flujo dentro del circuito, el cual fue integrado por el siguiente equipo:

- Osciloscopio
- Fotomultiplicador
- Sensor de Fuerza
- Sensor de Película
- Cámara fotográfica

Se colocó el equipo de la forma como se ilustra a continuación (figura 49).

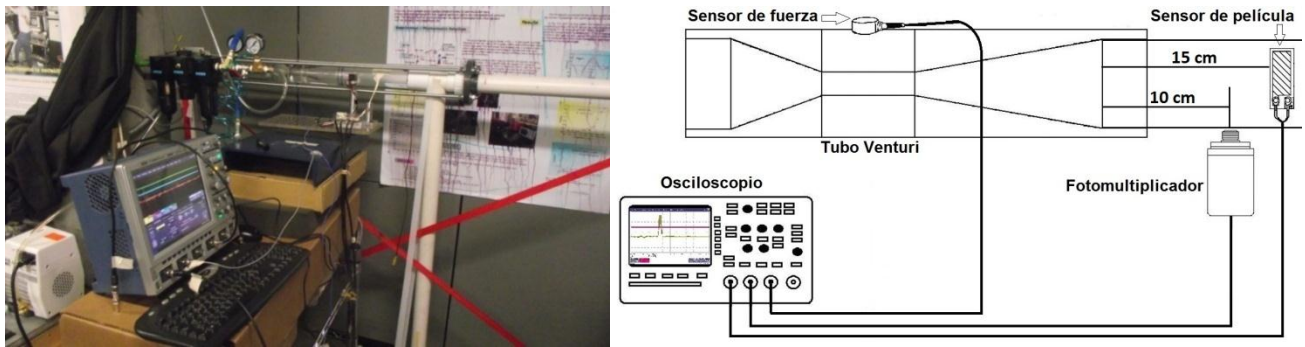


Figura 49. Arreglo experimental empleado en la detección de la cavitación luminiscente.

Para este arreglo se tomaron varias lecturas en el osciloscopio, a continuación se ilustra en la figura 50, la lectura en la que se obtuvo uno de los pulsos de luz.



Figura 50. Muestra de la pantalla del osciloscopio a la hora de tomar una lectura del arreglo implementado en el tubo Venturi.

4.2 Verificación de la luminiscencia por captura de emisión de luz mediante foto-multiplicador

Metodología para la obtención de pulsos de luz mediante foto-multiplicador

En la obtención de datos en el análisis del pulso, se utilizó un fotomultiplicador Hamamatsu™ serie H5784 y el osciloscopio LeCroy WaveRunner® Xi-A.

Se tenía preparado el arreglo experimental para la recopilación de información mediante el sensor de fuerza PCB Piezotronics™ 200B04, el sensor piezoeléctrico de película LDT1-028K, y cámara Fujifilm® modelo FinePix S1600 para grabar audio. La figura 49 muestra la distribución del equipo. Los canales se asignaron en el siguiente orden:

- Canal 1 - Sensor de fuerza PCB Piezotronics™ 200B04
- Canal 2 - Sensor piezoeléctrico de película LDT1-028K
- Canal 3 - Fotomultiplicador Hamamatsu™ serie H5784

Para la realización de la captura de emisión de luz se lleva a cabo el siguiente proceso:

- a) Teniendo los canales para cada sensor, se establecen las características para el transcurso de las pruebas, las cuales se muestran en la figura 51.
- b) El siguiente paso es detectar un pulso de luz, el cual se hizo pausando el osciloscopio en el momento en que la pantalla del osciloscopio mostraba actividad en el canal asignado al Fotomultiplicador (figura 51).



Figura 51. Captura de pantalla de la información mostrada en el osciloscopio LeCroy, durante la obtención de datos. Con una resolución horizontal de 5 ms a 100 MS/s (100 millones de muestra por segundo).

- c) Una vez detectado el pulso en el osciloscopio, la información se guarda, los archivos generados por el osciloscopio se guardan de forma separada por canal, asignando en el nombre del archivo un número progresivo según el momento en el que fue guardado, los archivos se guardan en extensión (.txt).
- d) Para su análisis se usó el software OriginLab®, importándolos a la interfaz del programa.
- e) Se realizaron gráficas para cada canal independientemente de la cantidad de puntos generados para cada uno, por lo que la información obtenida fue acotada. La acotación se hizo para obtener solo los datos del pulso.

El canal asignado al fotomultiplicador fue el tres, después de realizar lo anterior, se observa en la siguiente gráfica el pulso (figura 52).

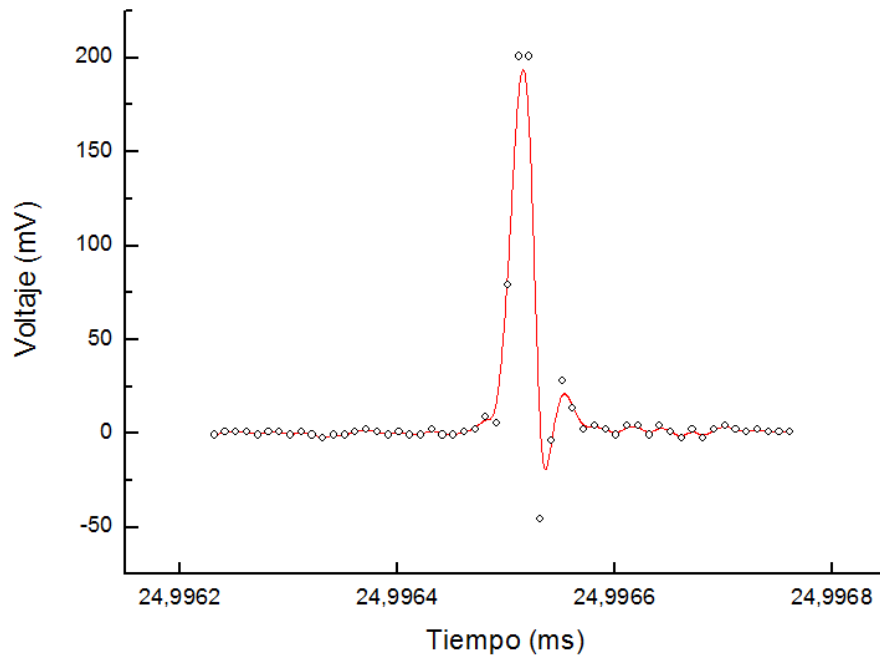


Figura 52. Gráfica de un pulso de luz detectado por el fotomultiplicador usado en el arreglo experimental para la medición y comprobación de la luminiscencia presente en la cavitación.

El pulso resultante en esta medición fue de ~200 mV, en la gráfica se observa una saturación, lo que indica que pudo haber sido mayor, pero debido a la resolución usada en el procesamiento de datos, se perdió información, el ancho del pulso para este evento fue de 22 ns, que es el indicador principal del tiempo de duración del fenómeno.

El inconveniente de haber utilizado tubo de acrílico de un espesor de 5 mm, provocó que el fotomultiplicador no obtuviera una mayor cantidad de puntos en la sección del pulso.

4.3 Pruebas de limpieza de agua con cavitación hidrodinámica rotatoria.

Uso de azul de metileno como colorante a limpiar

Uno de los contaminantes de aguas de mayor impacto en el medio ambiente, son los colorantes producidos en diversas industrias, principalmente textiles. Se estima que entre el 10 – 15% de los colorantes usados en estas industrias son arrojados en las aguas residuales [29].

El estudio fue llevado a cabo con agua corriente, entiéndase por el agua que circula por el sistema de aguas del Distrito Federal, a la que le fue añadido Azul de Metileno, éste fue usado como indicador (contaminante), ya que se utilizo para observar la disminución de la tonalidad en la mezcla.

Se uso una proporción de 0.3 mg de azul de metileno en polvo por cada litro de agua. Se escogió esta concentración por la cantidad de coloración que proporciona a la mezcla.

El azul de metileno cuyo nombre científico es Cloruro de Metiltionina, es un colorante que se usa principalmente en la medicina como antiséptico y cicatrizador interno.

Es un compuesto químico heterocíclico (sustancia que contiene un anillo formado por más de un tipo de átomo distinto del carbono) aromático con fórmula molecular $C_{16}H_{18}ClN_3S$ (figura 55), forma de cristales de color verde oscuro. Es inodoro y estable al aire. En solución acuosa es de color azul marino. Es soluble en agua, se descompone al alcanzar los $180^{\circ}C$ y reacciona en forma violenta con: oxidantes fuertes, bases, compuestos alcalinos (Yoduros).

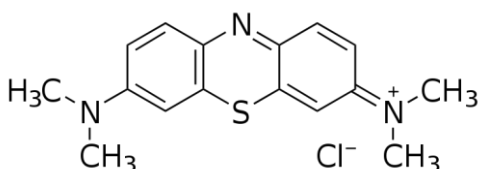
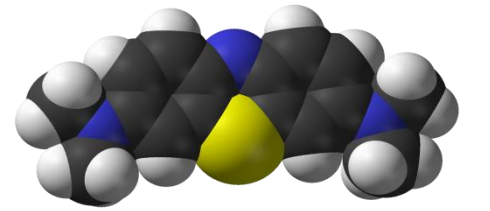
Azul de metileno	
	3,7-bis (dimetilamino)- Cloruro de fenazationio Cloruro de tetrametiltionina
	Fórmula química $C_{16}H_{18}N_3ClS$
	Masa molecular 319,85 g/mol
	Número CAS [61-73-4]
	Número EC 200-515-2
	Densidad $1.757g/cm^3$
	Punto de fusión $100^{\circ}C$
	Punto de ebullición Se descompone

Figura 55. Características del Azul de Metileno [30].

Corridas experimentales en función del tiempo

Como toda materia orgánica, la exposición del azul de metileno en solución acuosa a la radiación **ultravioleta** (200- 350 nm) produce su degradación por fotólisis. La energía absorbida se disipa en forma de reacciones químicas por radicales libres que degradan el compuesto. En nuestro caso lo utilizaremos como contaminante.

Para determinar la degradación del azul de metileno en función del tiempo, mediante cavitación hidrodinámica, emplearemos la conocida ley de Beer-Lambert, que relaciona la cantidad de absorción de la luz con las propiedades del material que atraviesa, ver figura 56.

La intensidad de la luz que entra en una muestra líquida en donde se encuentra diluido o suspendido un absorbente; se ve disminuida en función del espesor por tres fenómenos físicos:

1. La concentración del absorbedor (concentración)
2. El espesor de la muestra líquida que la luz debe atravesar (distancia de la trayectoria óptica)
3. La probabilidad de que el fotón de esa amplitud particular de onda sea absorbido por el material (absorbencia o coeficiente de extinción).

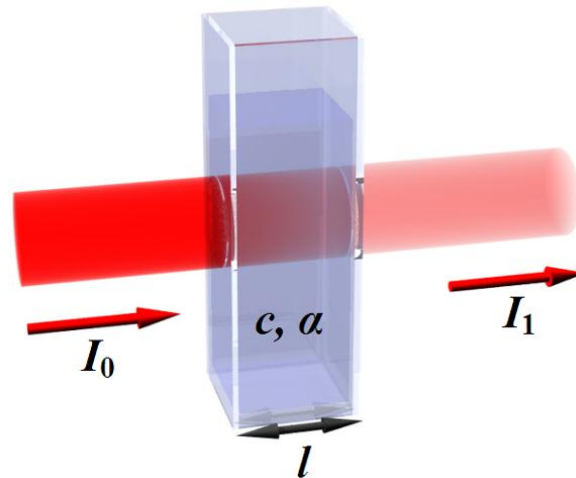


Figura 56. Diagrama de absorción de un haz de luz que atraviesa una cubeta con una profundidad l [31].

La relación entre ambas intensidades se expresa:

$$\frac{I_1}{I_0} = e^{-\alpha l c} = e^{-A}$$

Donde:

I_1, I_0 , son las intensidades salientes y entrantes respectivamente.

$A = \alpha l c$, es la absorbancia, que puede calcularse también como: $A = -\ln \frac{I_1}{I_0}$

l es la longitud atravesada por la luz en el medio, c es la concentración del absorbente en el medio.

$\alpha = \frac{4\pi k_\lambda}{\lambda}$ es el coeficiente de absorción:

λ es la longitud de onda de la luz absorbida.

k_λ es el coeficiente de extinción.

Determinación de la degradación del azul de metileno mediante espectroscopia de transmisión, en función del tiempo de cavitación.

Para cuantificar la relación de intensidades se implementa un arreglo experimental (figura 58) en donde se integra un mini-espectrómetro marca OceanOptics® HR2000+ (especificaciones ver Tabla 6), para obtener la concentración de cada muestra, se requiere del espectro de absorción del azul de metileno (figura 57), para saber en que longitud de onda se encuentra la máxima absorción y así determinar el tipo de laser que se tiene que utilizar, ya que utilizaremos el espectro de transmisión en cada muestra para determinar la degradación de la mezcla (agua + Azul de Metileno).

Especificación	Valor
Detector	Sony ILX-511B arreglo lineal CCD de silicón
Sensibilidad	75 fotones por conteo de 400 nm 41 fotones por conteo de 600 nm
Tamaño de pixel	14 μm x 200 μm
Rango de detección	200-1100 nm
Tiempo de integración	1 ms to 65 segundos

En la siguiente figura se despliega el espectro de absorción del colorante.

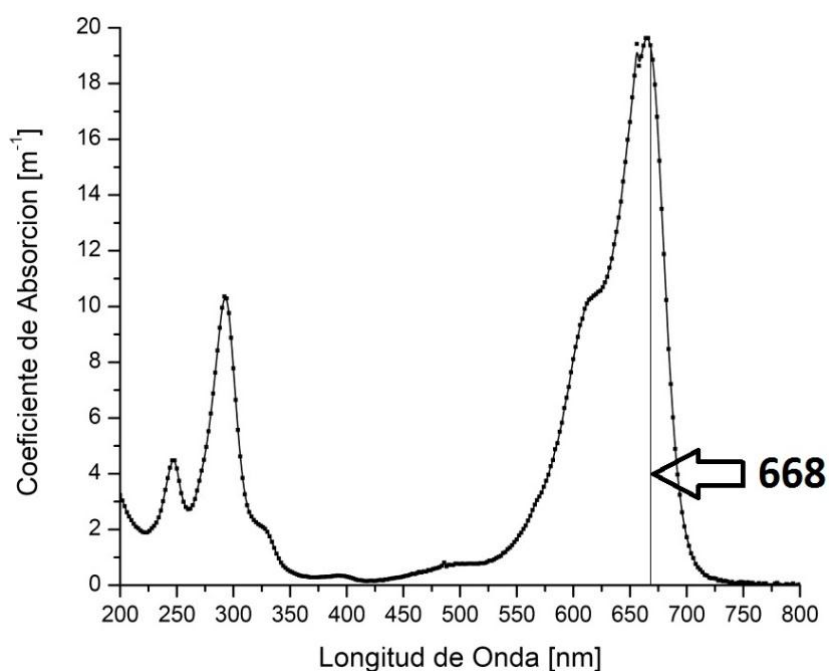


Figura 57. Espectro de absorción del Azul de Metileno

De acuerdo a la figura 57, el azul de metileno tiene una banda de absorción fuerte centrada entre los 660 – 670 nanómetros, en la región roja del espectro visible, por lo cual se utilizara un diodo laser ($\lambda = 670$ nanómetros) en la espectroscopia.

Metodología para la obtención de espectros (Arreglo experimental)

En la determinación de la pérdida de azul de metileno se implementa un arreglo experimental mostrado en la figura 58, el software utilizado para la determinación del espectro de transmisión fue Spectrasuite® y el método para la obtención del espectro de transmisión consiste en tres etapas las cuales se describen a continuación:

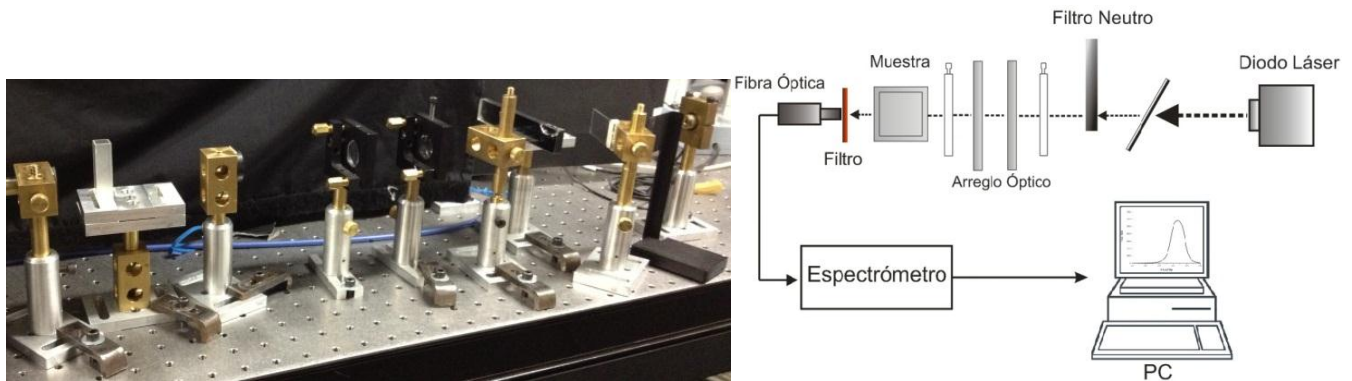


Figura 58. Esquema de la caracterización espectroscópica usando diodo láser

1.- Método para la búsqueda del intervalo de intensidad del espectro de azul de Metileno

- Se monta un arreglo experimental simple que consiste en un diodo láser, fibra óptica, espectrómetro y computadora.
- Se hace pasar el haz del láser por el arreglo y con ayuda del software se verifica que la señal del espectrómetro no está saturada, para lograr lo anterior se utilizan diversos arreglos ópticos, el espectro se toma con aire.
- Teniendo la señal no saturada se coloca una cubeta de cuarzo (10x10x25 mm) en la cual se depositan las muestras de distintos periodos de tiempo, el recipiente es acomodado lo más cerca posible de la fibra óptica, con esto el arreglo está completado (figura 58) y preparado para el inicio de las mediciones de cada muestra.
- Se establecen las características en el software, las cuales son de 300 milisegundos, average 10 y boxcar 2, ya establecidas las características, estas no se deben de cambiar en el transcurso de las pruebas a realizar.

2.- Método para la adquisición del espectro

- Se coloca agua tridestilada en la cubeta de cuarzo para comprobar la amplitud máxima que se obtendrá si se llegara a degradar por completo el azul de metileno, siendo esta nuestra referencia.
- Para la captura de cada espectro, esta se realiza a completa oscuridad, para evitar que otra longitud de onda se haga presente y así alterar los resultados.
- Se retira el agua tridestilada con ayuda de una jeringa y se limpia la cubeta.
- Se coloca la primera muestra en la cubeta.
- Se repite el inciso b).
- Se pone inicio en el programa (figura 59), se aguarda aproximadamente 10 segundos para que se estabilice el mismo.

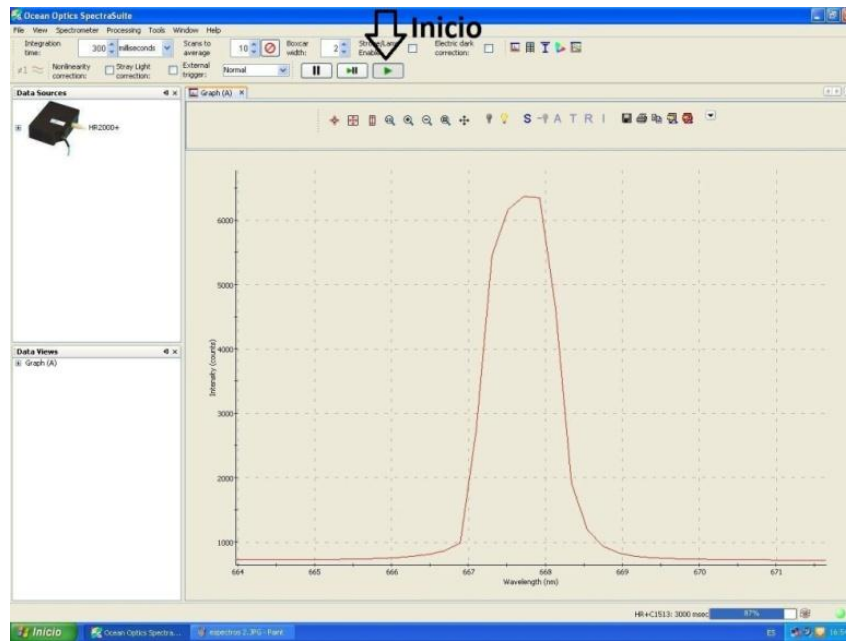


Figura 59. Ventana inicial del software Spectrasuite®

g) Pasando ese tiempo se pausa y se guarda el espectro de la muestra (figura 60).

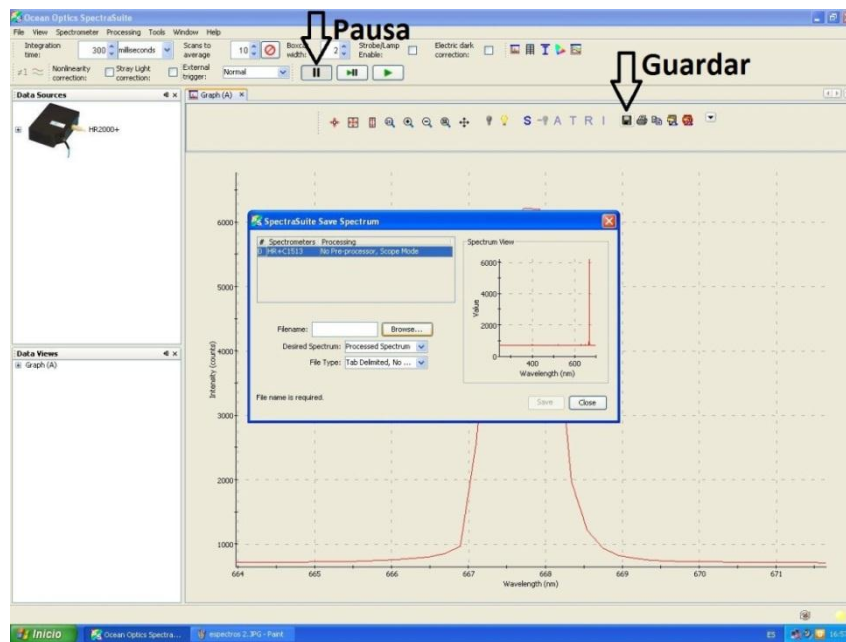


Figura 60. Ventana en la cual se muestran el botón de pausa y el de guardar

- h) Se retira la muestra del recipiente con ayuda de una jeringa.
- i) Se agrega agua tridestilada al recipiente y se retira, esto se hace al menos dos veces antes de seguir con el siguiente paso.
- j) Se coloca la siguiente muestra, y se repite el proceso a partir del inciso e), hasta concluir con todas las muestras.

3.- Obtención de las graficas comparativas

- a) Teniendo los archivos guardados (en extensión .txt), se importan a cualquier software que grafique, en este caso se uso Origin®, con el cual se obtiene la grafica del espectro de transmisión de cada muestra.
- b) Obtenidas las graficas de cada muestra se construye una nueva la cual contenga todas las anteriores, esto para determinar el nivel de degradación del azul de metileno en la mezcla.

Por ultimo se realiza una grafica comparativa tomando un punto en común de cada grafica en la cual se compara el tiempo de trabajo con la amplitud de cada muestra, esto se realiza para obtener el comportamiento del experimento.

Resultados (Circuito Hidráulico 2)

5.1 Cálculo del número de cavitación para el impulsor y tubo Venturi.

Cálculos para determinar el caudal del circuito hidráulico

Para determinar el número de cavitación, se considera que el flujo en el circuito hidráulico 2 es homogéneo (se desprecia la presencia de aire y/o vapor presentes en el líquido; por lo que sus propiedades no son consideradas), incompresible, se mueve en régimen estacionario (la velocidad del flujo en un punto no varía con el tiempo), se desprecia la viscosidad del fluido (pérdidas de fricción despreciables), y no existe transferencia de calor hacia el fluido o fuera de éste.

En los cálculos del número de cavitación y las presiones, se necesita conocer el caudal que tiene el sistema; el cual se obtiene a través de la diferencia de presiones de un tubo Venturi, que son medidas por un manómetro (punto 1) y vacuómetro (punto 2) instalados en la entrada y cuello respectivamente.

Con las consideraciones ya descritas, se procede al cálculo de caudal utilizando el principio de Bernoulli.

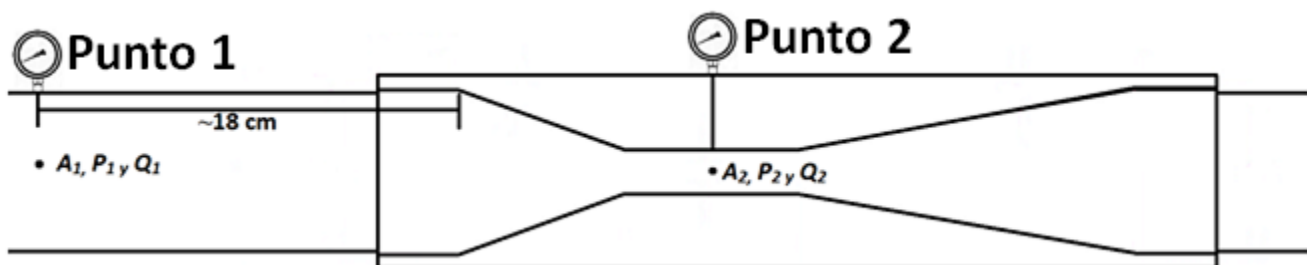


Figura 61. Tubo venturi donde se localizan los puntos 1 y 2 en el tubo Venturi

En la figura 61 se ilustra la sección en la cual se localizan los puntos 1 y 2, los cuales se muestran en la tabla 7.

Tabla 7. Propiedades geométricas y condiciones del fluido para el tubo Venturi

Propiedades del flujo	Punto 1	Punto 2
$\rho_{20^{\circ}\text{C}} = 998.29 \text{ kg/m}^3$	$D_1 = 0.638 \text{ m}$	$D_2 = 0.0165 \text{ m}$
$P_{\text{atm}_{D.F.}} = 585 \text{ mmHg}$ $= 77993.6 \text{ Pa}$	$A_1 = 3.1969 \times 10^{-3} \text{ m}^2$	$A_2 = 2.1382 \times 10^{-4} \text{ m}^2$
$\mu_{20^{\circ}\text{C}} = 0.001003 \text{ kg/m} \cdot \text{s}$	$P_{1_{\text{man}}} = 1.5 \text{ kg/cm}^2 = 147099.75 \text{ Pa}$	$P_{2_{\text{vac}}} = 55 \text{ cmHg} = 73327.09 \text{ Pa}$
$g_{D.F.} = 9.78 \text{ m/s}^2$		

donde:

$\rho_{20^{\circ}C}$: densidad del agua a 20 °C

$P_{atm_{D.F.}}$: presión atmosférica de la Ciudad de México

$\mu_{20^{\circ}C}$: viscosidad dinámica de agua a 20°C

$g_{D.F.}$: aceleración gravitatoria de la Ciudad de México

D : diámetro

A : área

P_{man} : presión manométrica

P_{vac} : presión vacuométrica

Las presiones empleadas en los cálculos son presiones absolutas.

Cálculo de presión en el punto 1

$$P_{1abs} = P_{1man} + P_{atm_{D.F.}} = 225093.35 Pa$$

Cálculo de presión en el punto 2

$$P_{2abs} = P_{atm_{D.F.}} - P_{2vac} = 4666.51 Pa$$

Utilizando el principio de Bernoulli

$$\frac{v_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\rho} = \frac{v_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\rho} \quad (5.1)$$

donde:

v_1 y v_2 son las velocidades del flujo en los puntos 1 y 2

P_1 y P_2 son las presiones del flujo en los puntos 1 y 2

g : aceleración gravitatoria

ρ : densidad del fluido

Y empleando la ecuación de continuidad

$$Q = v_1 A_1 = v_2 A_2 \quad (5.2)$$

donde:

v_1 y v_2 son las velocidades del flujo en los puntos 1 y 2

A_1 y A_2 son las secciones de la tubería en los puntos 1 y 2

De la ecuación de continuidad (5.2) se tiene:

$$v_1 = \left(\frac{A_1}{A_2}\right) v_2 \quad (5.3)$$

Remplazando v_1 en la ecuación (5.1)

$$\left(\frac{A_1}{A_2}\right)^2 \frac{v_2^2}{2g} + \frac{P_1}{\rho} = \frac{v_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\rho} \quad (5.4)$$

Despejando v_2 de la ecuación (5.4) se obtiene:

$$v_2 = \sqrt{\frac{2g \left(\frac{P_1 - P_2}{\rho}\right)}{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2}} \quad (5.5)$$

Sustituyendo los datos en la ecuación (5.5) se obtiene la velocidad que se genera en el cuello del tubo Venturi.

$$v_2 = \sqrt{\frac{2(9.78 \text{ m/s}^2) \left(\frac{225.09 \text{ kPa} - 4.66 \text{ kPa}}{998.29 \text{ kg/m}^3}\right)}{1 - \left(\frac{2.1382 \times 10^{-4} \text{ m}^2}{3.1969 \times 10^{-3} \text{ m}^2}\right)^2}} = 65.57 \text{ m/s}$$

Con el valor calculado de la velocidad en el cuello del tubo Venturi se sustituye en la ecuación de continuidad (5.2) para determinar el caudal ideal del sistema.

$$Q_{ideal} = v_2 A_2 = 0.014083 \text{ m}^3/\text{s} = 14.083 \text{ l/s}$$

En el caudal ideal no se tienen consideradas las pérdidas, por lo que es necesario obtener el caudal real, para esto se necesita conocer el coeficiente de descarga (C_d), el cual depende del número de Reynolds del flujo y de la geometría real del medidor, por lo cual se calcula el número de Reynolds.

Calculo del número de Reynolds

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} \quad (5.6)$$

donde:

- ρ : densidad del fluido
- v : velocidad del fluido
- D : diámetro de la tubería
- μ : viscosidad dinámica del fluido

Sustituyendo los datos en la ecuación (5.6) se obtiene el número de Reynolds del sistema.

$$Re = \frac{998.29 \text{ kg/m}^3 (65.57 \text{ m/s})(0.016 \text{ m})}{0.001003 \text{ kg/m} \cdot \text{s}} = 1.044 \times 10^6$$

Debido a que se tiene un tubo Venturi maquinado y por las condiciones del mismo, así como por el número de Reynolds se tiene el siguiente coeficiente de descarga:

$$C_d = 0.995$$

Con el coeficiente de descarga se calcula el gasto real, el cual es el que se utiliza para el cálculo del número de cavitación y presiones del impulsor como del tubo Venturi.

$$Q_{real} = C_d Q_{ideal} = 0.014012 \text{ m}^3/\text{s} = 14.012 \text{ l/s}$$

Por lo tanto el caudal real calculado es el máximo entregado por la bomba, cuando esta trabaja a su máxima potencia.

Cálculos para determinar el número de cavitación y presión en la obstrucción del impulsor.

Para calcular tanto el número de cavitación como la presión que se genera a la salida del impulsor, se consideran dos puntos, el primero se tiene en el centro del impulsor y el segundo a la salida del mismo como se muestra en la figura 62c.

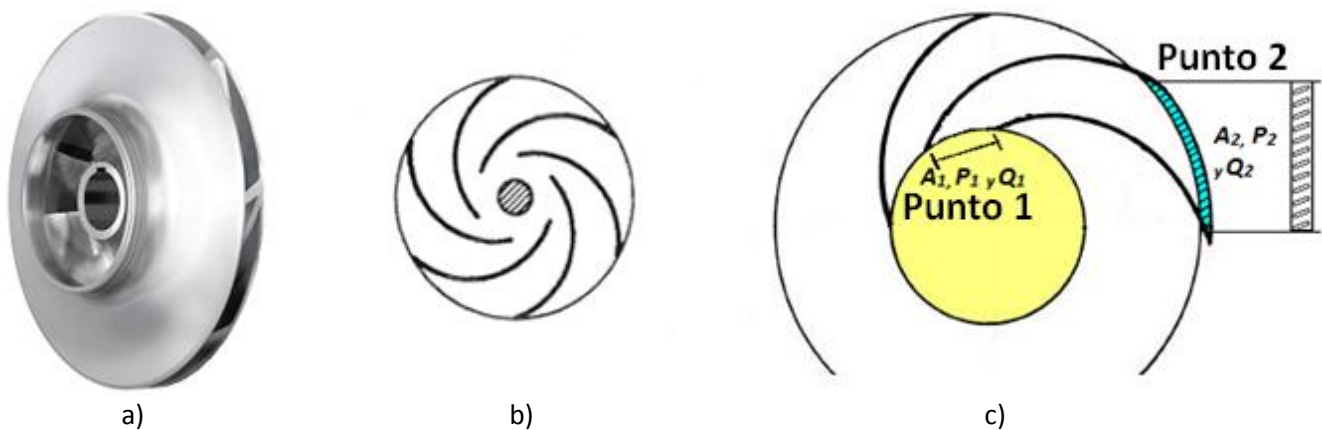


Figura 62. Detalle de la ubicación de los puntos 1 y 2 en el impulsor

La medición de las áreas para el impulsor son aproximadas a la real, debido a que se calcularon en base a una proyección rectangular del área circular.

Tabla 8. Propiedades geométricas y condiciones del fluido para el impulsor

Propiedades del flujo	Punto 1	Punto 2
$\rho_{20^\circ\text{C}} = 998.29 \text{ kg/m}^3$	$A_1 = 2.64 \times 10^{-4} \text{ m}^2$	$A_2 = 1.6928 \times 10^{-4} \text{ m}^2$
$P_{atm_{D.F.}} = 585 \text{ mmHg} = 77993.6 \text{ Pa}$	$P_1 = 53.47 \text{ kPa}$	$Q_2 = 0.002335 \text{ m}^3/\text{s}$
$\mu_{20^\circ\text{C}} = 0.001003 \text{ kg/m} \cdot \text{s}$	$Q_1 = 0.002335 \text{ m}^3/\text{s}$	
$g_{D.F.} = 9.78 \text{ m/s}^2$		
$Q_{real} = 0.014012 \text{ m}^3/\text{s}$ $= 14.012 \text{ L/s}$		

Especificaciones del impulsor

$n = 6 \rightarrow$ *num de alabes en el impulsor*

$Q_1 = Q_2 = \frac{Q_T}{n} = 0.002335 \text{ m}^3/\text{s} \rightarrow$ Gasto para cada alabe del impulsor

Calculo de presiones empleadas (absolutas).

$$P_{T_{man \text{ int imp}}} = 24.766 \text{ mH}_2\text{O nivel del mar} = 1821.68 \text{ mmHg} = 242.87 \text{ kPa}$$

donde: $P_{T_{man \text{ int imp}}}$ es la presión manométrica en el centro del impulsor.

$$P_{T_{abs \text{ int imp}}} = P_{T_{man \text{ int imp}}} + P_{atm_{D.F.}} = 320.86 \text{ kPa}$$

$$P_1 = \frac{P_{T_{abs \text{ int imp}}}}{n} = 53.47 \text{ kPa}$$

Para obtener la presión en la obstrucción del impulsor se utiliza el principio de Bernoulli, ecuación (5.1), en el cual se sustituye la ecuación de continuidad (5.2), ya que no se conocen las velocidades pero si el caudal y sus respectivas areas, por lo tanto despejando P_2 del principio de Bernoulli queda:

$$P_2 = P_1 - \frac{1}{2} \rho \left[\left(\frac{Q_2}{A_2} \right)^2 - \left(\frac{Q_1}{A_1} \right)^2 \right]$$

Sustituyendo los datos para el cálculo de la presión en la obstrucción del impulsor nos queda:

$$P_2 = 53.47 \text{ kPa} - \frac{998.29}{2} \text{ kg/m}^3 \left[\left(\frac{0.002335 \text{ m}^3/\text{s}}{1.6928 \times 10^{-4} \text{ m}^2} \right)^2 - \left(\frac{0.002335 \text{ m}^3/\text{s}}{2.64 \times 10^{-4} \text{ m}^2} \right)^2 \right]$$

$$P_2 = -2.453 \text{ kPa}$$

$$P_{T_{ext \text{ imp}}} = -14.71 \text{ kPa}$$

Por lo cual la presión negativa indica que en este punto del impulsor se tiene una presión de vacío cercana a cero.

Índice de cavitación para el impulsor

Para obtener el índice de cavitación que se genera en el impulsor se utiliza la ecuación (2.3) vista en el capítulo 2.1.

$$C_v = \frac{P_0 - P_v}{\frac{1}{2} \rho v^2} = \frac{2(P_0 - P_v)A^2}{\rho Q^2}$$

donde:

P_0 : presión a la entrada del impulsor

P_v : presión de vaporización del fluido

ρ : densidad del fluido

v : velocidad del fluido en la obstrucción del impulsor

A : área en la obstrucción del impulsor

Q : caudal

Sustituyendo valores para 20°C

$$C_v = \frac{2(53.47 \text{ kPa} - 2.33 \text{ kPa})(2.64 \times 10^{-4} \text{ m}^2)^2}{998.29 \text{ kg/m}^3 (0.002335 \text{ m}^3/\text{s})^2}$$

$$C_v \approx 1.309$$

Cálculos para determinar el número de cavitación y presión en el cuello del tubo Venturi.

En la obtención del número de cavitación presente en el cuello del tubo Venturi, así como para el cálculo de la presión que se genera en el mismo, se consideran dos puntos de interés los cuales se representan en la figura 61, así como las especificaciones se consideran para la realización de los cálculos (ver tabla 7).

$$A = \frac{\pi D^2}{4}$$

Para ambos puntos se calculan las presiones empleadas (absolutas).

Cálculo de presión en el punto 1

$$P_{1abs} = P_{1man} + P_{atmD.F.} = 225093.35 \text{ Pa}$$

Cálculo de presión en el punto 2

$$P_{2abs} = P_{atmD.F.} - P_{2vac} = 4666.51 \text{ Pa}$$

Para obtener la presión en el cuello del tubo Venturi se utiliza el principio de Bernoulli, ecuación (5.1), en el cual se sustituye la ecuación de continuidad (5.2), por lo tanto despejando P_2 del principio de Bernoulli queda:

$$P_2 = P_1 - \frac{1}{2} \rho \left[\left(\frac{Q_2}{A_2} \right)^2 - \left(\frac{Q_1}{A_1} \right)^2 \right]$$

Sustituyendo los datos para el cálculo de la presión en el cuello del tubo Venturi nos queda:

$$P_2 = 225.09 \text{ kPa} - \frac{998.29}{2} \text{ kg/m}^3 \left[\left(\frac{0.014012 \text{ m}^3/\text{s}}{2.1382 \times 10^{-4} \text{ m}^2} \right)^2 - \left(\frac{0.014012 \text{ m}^3/\text{s}}{3.1969 \times 10^{-3} \text{ m}^2} \right)^2 \right]$$

$$P_2 = -1908.85 \text{ kPa}$$

De la misma forma que para el impulsor en este caso la presencia en los cálculos de las presiones negativas implica que en el cuello del tubo Venturi se genera vacío y por lo tanto es considerada una aproximación a cero.

Índice de cavitación para el tubo Venturi

Utilizando la ecuación (2.3) se tiene:

$$C_v = \frac{P_0 - P_v}{\frac{1}{2} \rho v^2} = \frac{2(P_0 - P_v)A^2}{\rho Q^2}$$

Sustituyendo valores para 20°C

$$C_v = \frac{2(225.09 \text{ kPa} - 2.33 \text{ kPa})(2.1382 \times 10^{-4} \text{ m}^2)^2}{998.29 \text{ kg/m}^3 (0.014012 \text{ m}^3/\text{s})^2}$$

$$C_v \approx 0.1039$$

En la siguiente tabla se muestra los índices de cavitación calculados para el impulsor y tubo Venturi a diferentes temperaturas de trabajo.

Tabla 9. Índices de cavitación a diferentes temperaturas de trabajo

Temp [°C]	ρ_{H_2O} [kg/m ³]	$P_{v_{H_2O}}$ [Pa]	Impulsor σ	Venturi σ
20	998.29	2339.3	1.3094	0.1039
30	995.71	4247	1.2638	0.1032
40	992.25	7384.9	1.1874	0.1021
50	988.02	12352	1.0639	0.1002
60	983.13	19946	0.8717	0.0971
70	977.63	31201	0.5823	0.0923
80	971.60	47414	0.1593	0.0851

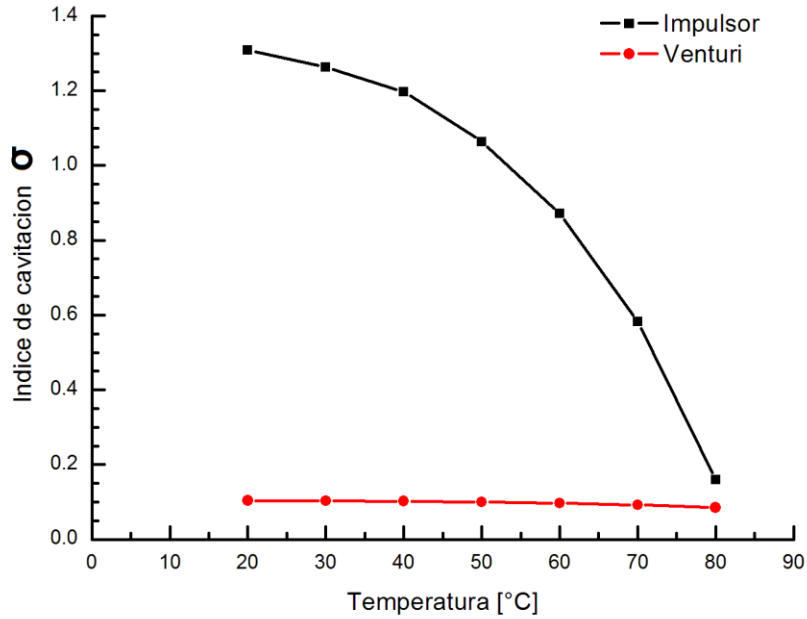


Figura 63. Comportamiento del índice de cavitación respecto a la temperatura de trabajo

El comportamiento del índice de cavitación del impulsor ilustrado en la grafica de la figura 63 muestra que la temperatura máxima recomendable para trabajar son 70 °C, ya que a una mayor temperatura se tendrá una cavitación destructiva; para el caso del tubo Venturi el índice de cavitación que se presenta es aproximado a 0.1 lo que implica que la cavitación que se genera es destructiva. De acuerdo a la referencia [32], en el circuito hidráulico se tiene cavitación en tránsito y cavitación activa, esto para el tubo Venturi, en el impulsor solo se tiene cavitación estable.

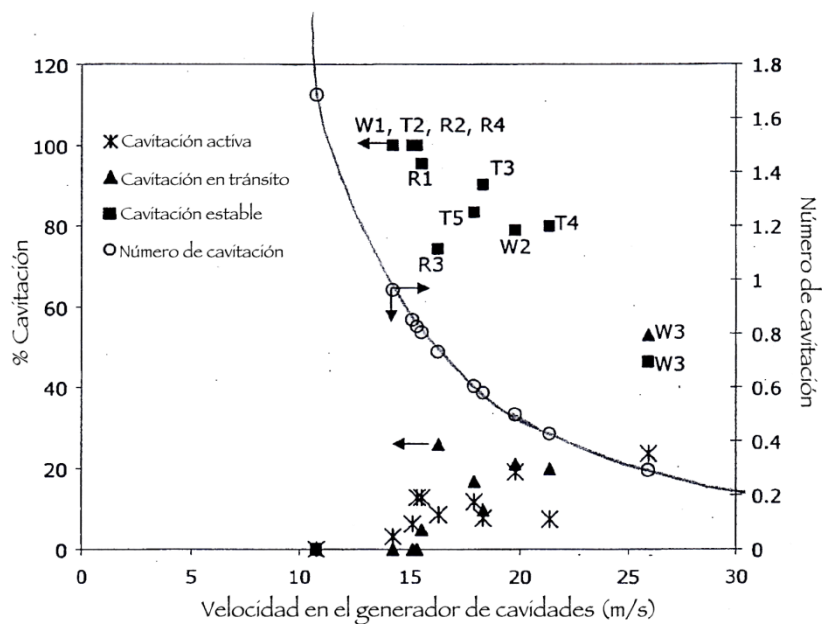


Figura 64. Condiciones de cavitación evaluadas numéricamente [32].

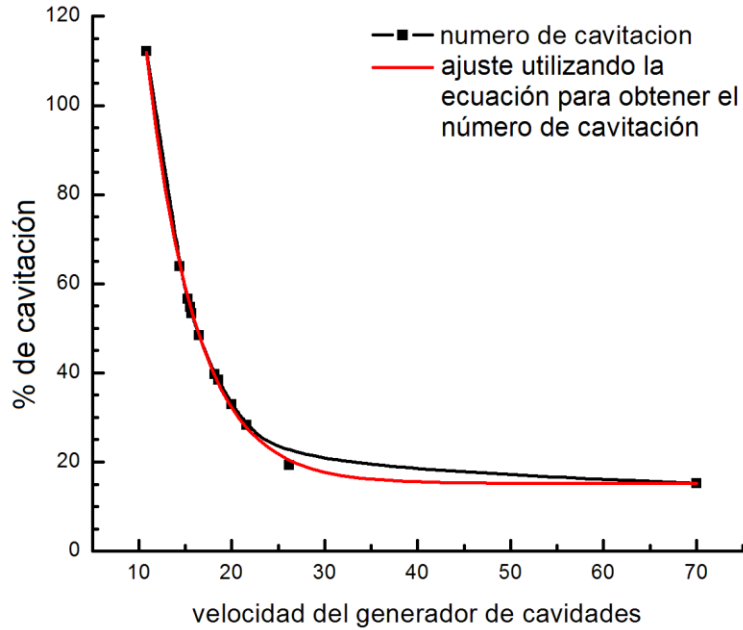


Figura 65. Ajuste exponencial de la grafica de condiciones de cavitación evaluadas numéricamente [32], para velocidades de hasta 70 m/s.

5.2 Detección de pulsos de luz en la cavitación

Debido a la rapidez con que ocurre el pulso (~16 nanosegundos), fue complicado almacenar la información por lo cual se tuvo que realizar una discriminación de datos al guardar información, ésta se obtuvo al observar un pulso a la salida del foto-multiplicador en el osciloscopio, como se ilustra en la figura 66.



Figura 66. Captura de pantalla de la información mostrada en el osciloscopio LeCroy, durante la obtención de datos. Con una resolución horizontal de 5 ms a 100 MS/s (100 millones de muestra por segundo).

Con los datos adquiridos del fotomultiplicador, sensor de fuerza y sensor de película, se realizaron sus respectivas graficas y al final se construye una nueva sobreponiendo las tres, para observar su comportamiento a lo largo de los eventos, a continuación se muestra el resultado en la que se sobrepone la grafica del fotomultiplicador con la del sensor de fuerza (figura 67).

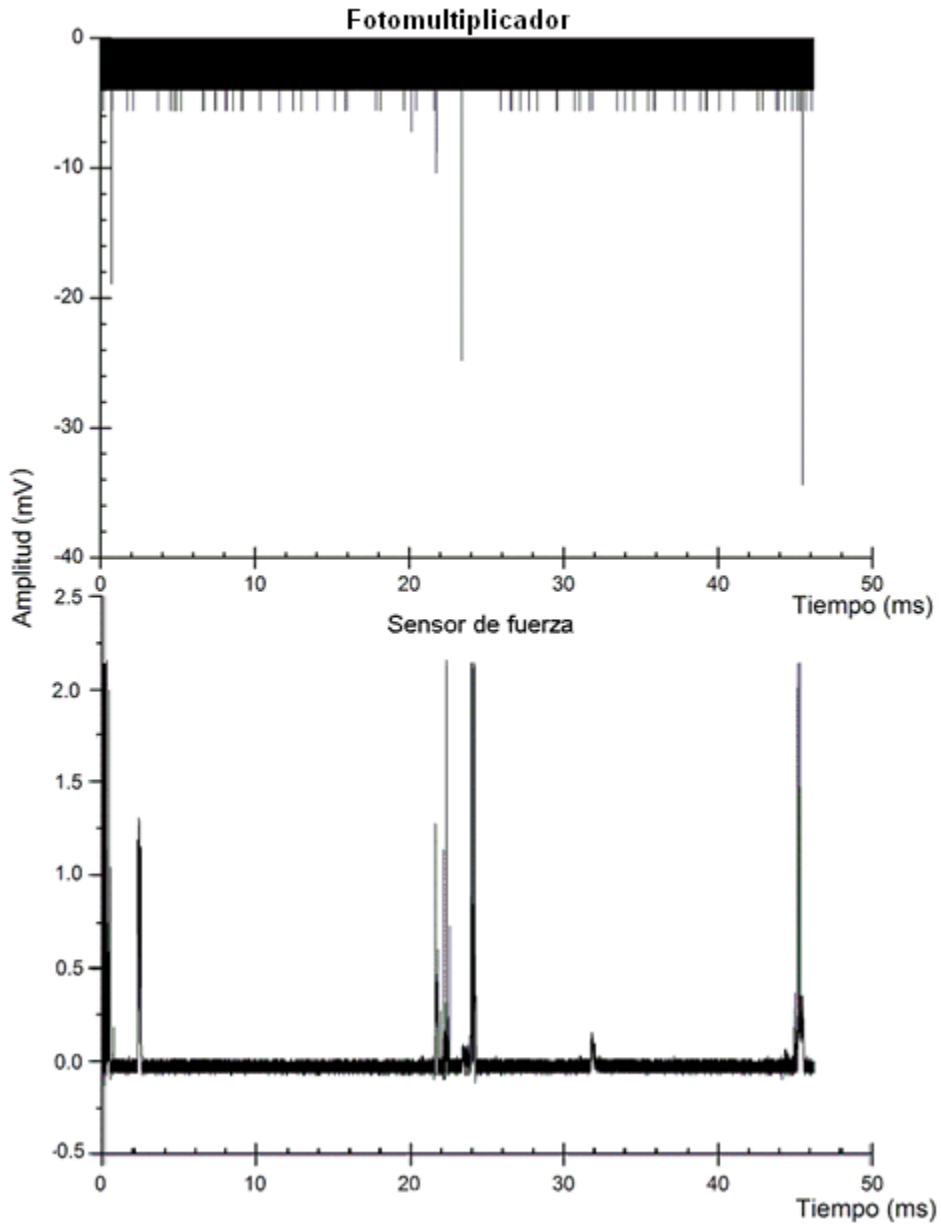


Figura 67. Gráfica comparativa del sensor de fuerza (abajo) y fotomultiplicador (arriba).

Para ahorrar tiempo de cómputo, se utilizó la parte de los datos donde la información parece relevante. Se procedió a graficar simultáneamente los datos de cada sensor, teniendo como resultado que alrededor del tiempo en el que se detecta un pulso con el fotomultiplicador, los sensores de fuerza y película detectan un incremento en la actividad de vibraciones mecánicas (ver figura 68).

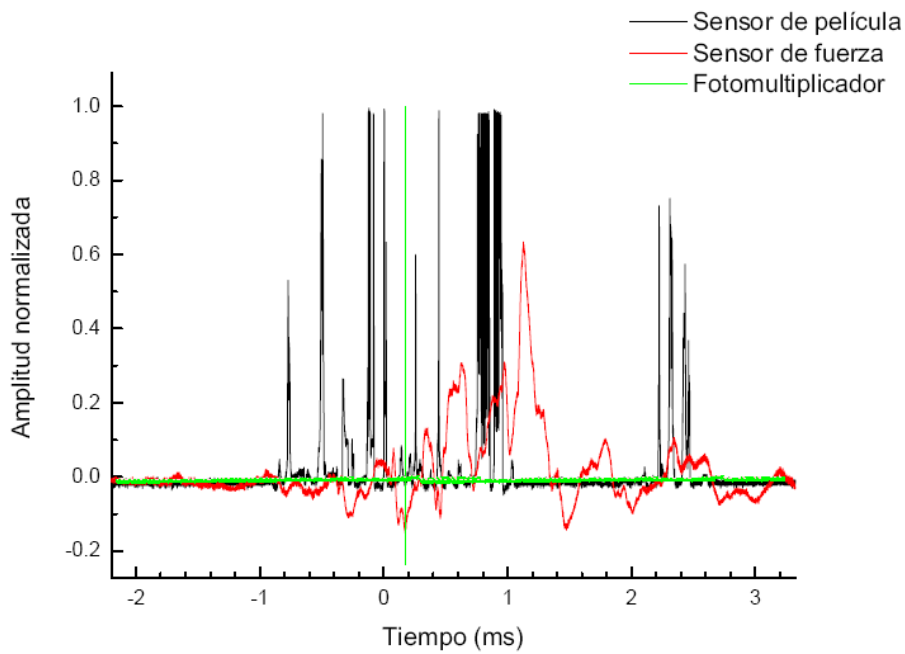
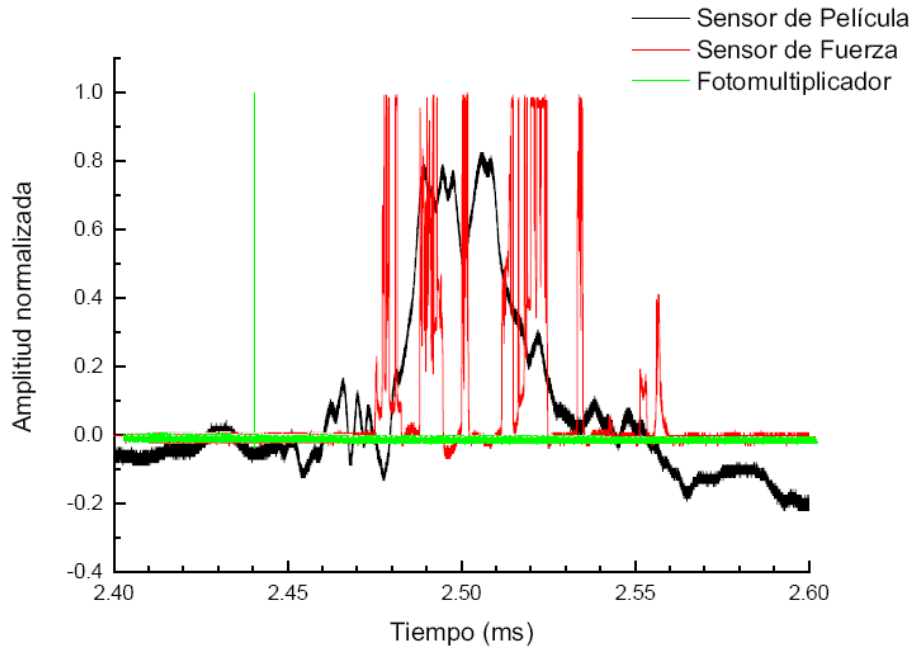


Figura 68. Muestra los dos tipos de comportamientos que hay en los datos, en los que el pulso se detecta primero y los sensores de película y de fuerza detectan actividad en el mismo tiempo (izquierda) o en tiempos diferentes (derecha), siempre después del pulso.

Para los diferentes pulsos cuyos datos fueron capturados, se hizo un análisis a la duración aproximada de cada uno, esto midiendo el ancho de cada pulso en la gráfica, obteniendo así un aproximado en picosegundos.

En la siguiente gráfica (figura 69), se muestra un pulso de luz normalizado, con un ancho pulso de 16 picosegundos

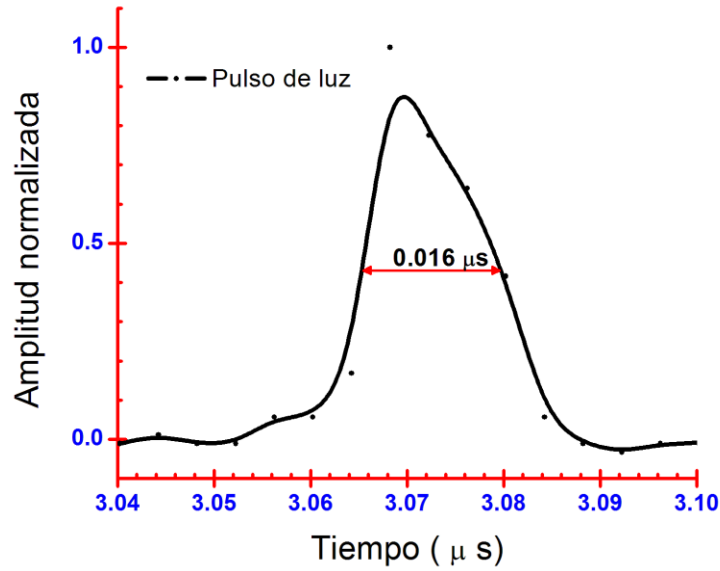


Figura 69. Gráfica de un pulso detectado por el fotomultiplicador, con un ancho de pulso de 16 picosegundos.

Con la información recabada se obtiene la certeza de que la cavitación luminiscente ocurre.

5.3 Adquisición del ruido del sistema cavitante

Se utilizó el micrófono de una cámara Fujifilm® modelo FinePix S1600, con la cual se grabó todo el proceso experimental. La grabación se seccionó en 14 archivos de una duración de un minuto cada uno. Mediante software (Matlab®), cada audio se convirtió a datos numéricos, y se realizaron transformadas de Fourier para observar el comportamiento de las frecuencias en el audio, como se muestra en la figura 70.

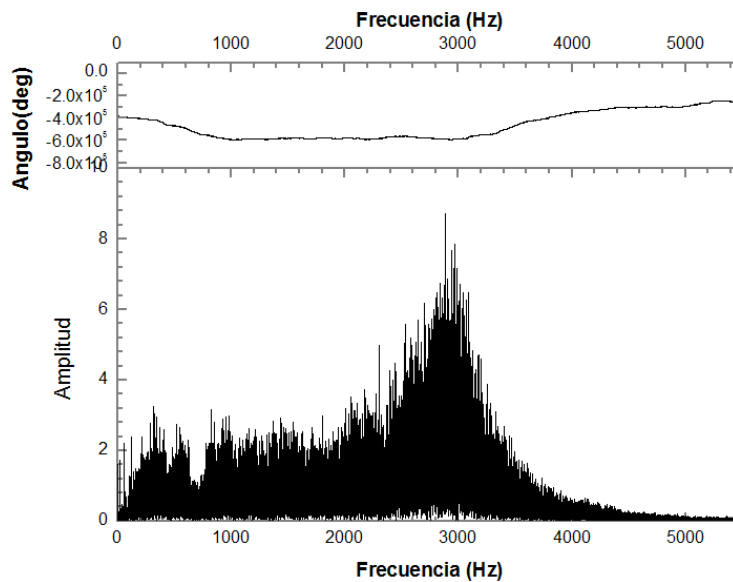


Figura 70. Transformada de Fourier al audio en el minuto 2.

Como se observa, la mayor concentración de datos se encuentra alrededor de los 3 kHz, además de una caída de frecuencias a los 800 Hz.

Posteriormente se utilizó un software (Spectrogram®) para realizar un espectrograma en el cual se observan las frecuencias a lo largo del tiempo que duró la grabación (ver figura 71).

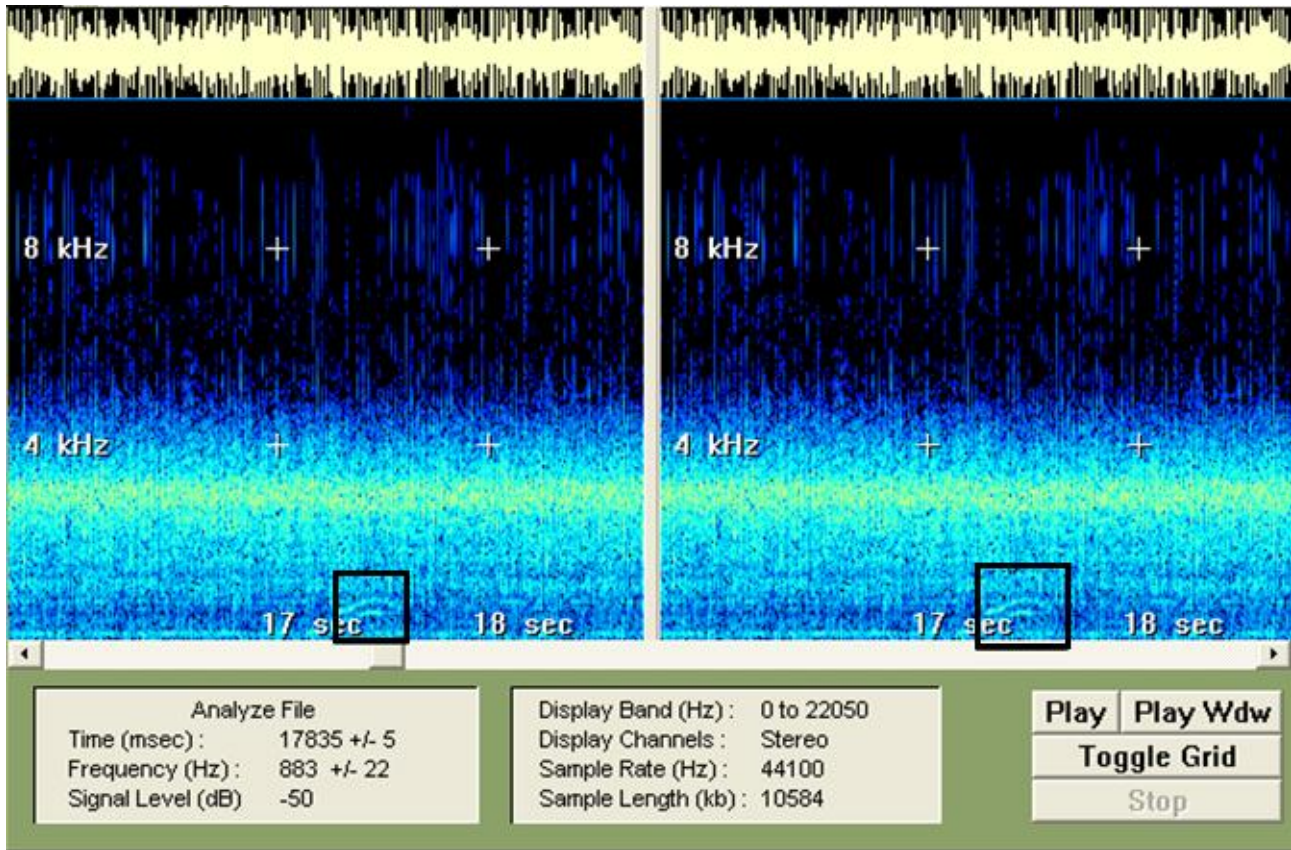


Figura 71. Espectrograma del audio para el minuto 2

Al realizar el espectrograma se observa el comportamiento en los 3 kHz y los cambios que ocurren a los 800 Hz.

5.4 Graficas de degradación en función del tiempo y temperatura

En las siguientes figuras (72 a 75) se muestran las graficas de los espectros de transmisión de cada una de las muestras a diferentes lapsos de tiempo, así como una grafica comparativa del tiempo de trabajo con la amplitud de cada muestra, para esta última gráfica se toma un punto en común el cual es de una misma longitud de onda, esto para ambos casos del sistema (cavitación rotativa y cavitación rotativa + tubo Venturi), en las graficas se ilustra la degradación del colorante orgánico, al paso del tiempo que es sometido a la cavitación, tanto simple como con tubo Venturi.

Cavitación rotativa:

Tabla 10. Cavitación rotativa

Gasto [l/s]	Muestra #	Tiempo (min)	Intensidad (u.a.)	T _i [°C]	T _f [°C]
12.25					
Cavitación					
	aire		3313.7		
	M1	0	1366.5	16	16
	M2	7	1325.5	16	27
	M3	80	3313.7	20	71
Cavitación + peróxido					
	M4	0	6184.7	19	19
	M5	30	8225.8	19	45
	M6	1 día de reposo	8219.9	22	22
	M7	60	9580	22	63

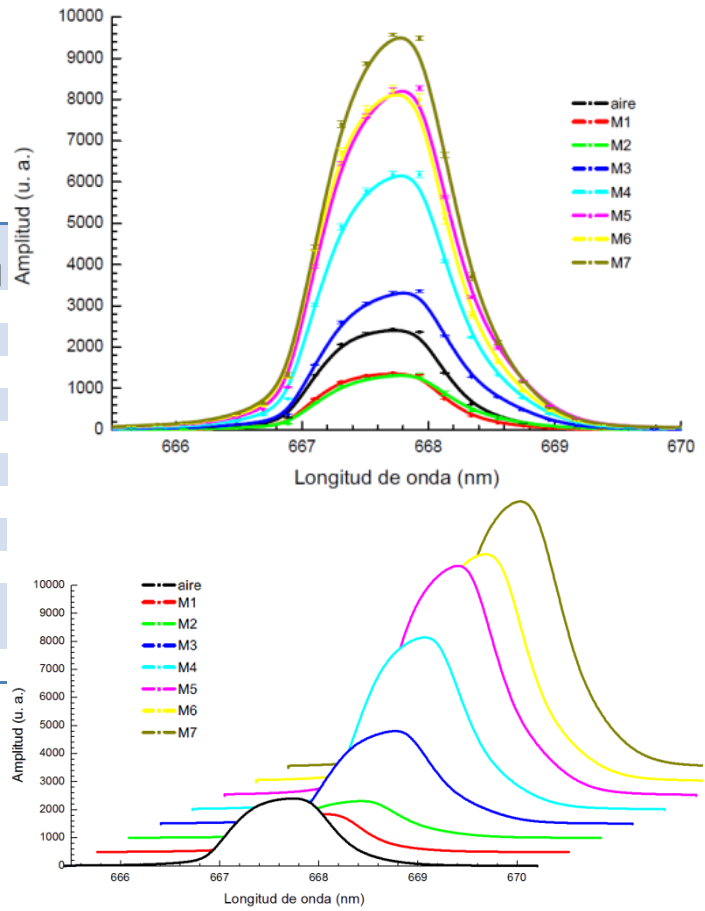


Figura 72. Espectros de transmisión del arreglo hidráulico para la producción de cavitación rotativa, donde se observa el periodo de tiempo de cada muestra, así como su temperatura inicial y final de las mismas.

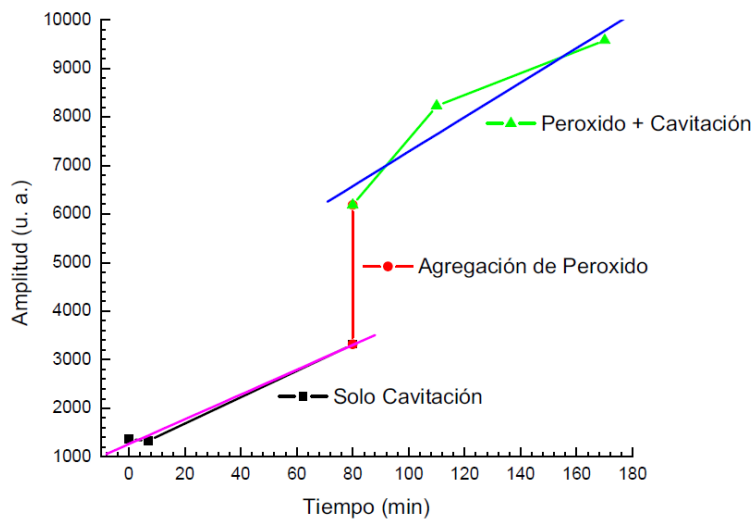


Figura 73. Grafica donde se ilustra la línea de tendencia para cada caso, y el incremento de amplitud que se obtuvo en el sistema a la hora de agregar el peróxido de hidrógeno.

Cavitación rotativa + tubo Venturi:

Tabla 11. Cavitación + tubo Venturi

Gasto [l/s]	Muestra #	Tiempo (min)	Intensidad (u. a.)	T _i [°C]	T _f [°C]
12.25	aire		2429.5		
	M1	0	5215.2	19	19
	M2	60	5562.1	15	29
	M3	120	5754.6	23	34
	M4	180	5758.5	21	42
	M5	210	5966.2	29	44
	agua tridestilada		6085.5		

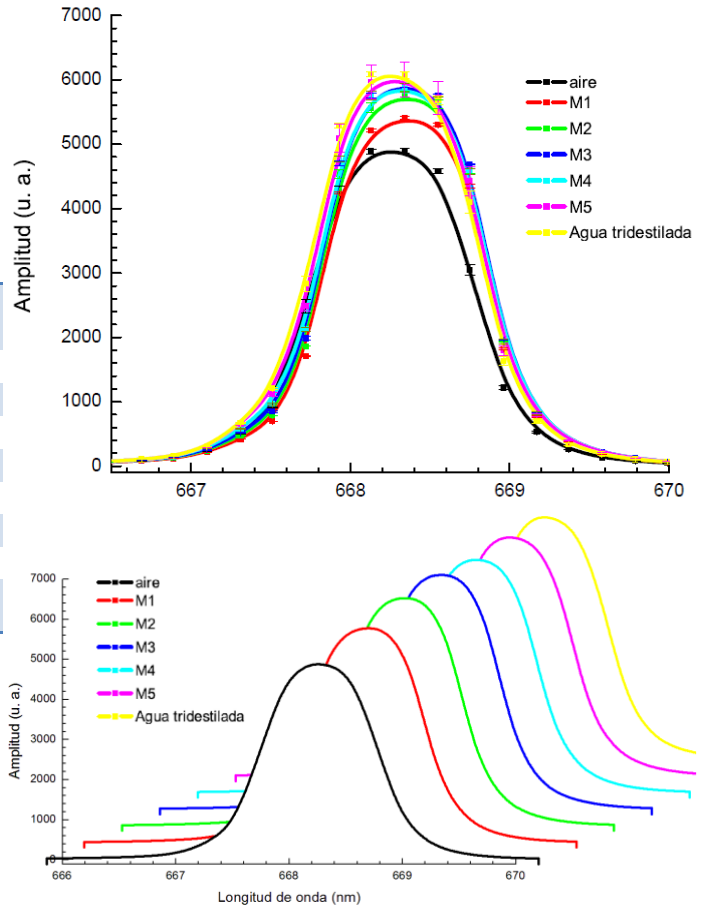


Figura 74. Espectros de transmisión del arreglo hidráulico para la producción de cavitación rotativa + tubo Venturi, donde se observa el periodo de tiempo de cada muestra, así como su temperatura inicial y final de las mismas.

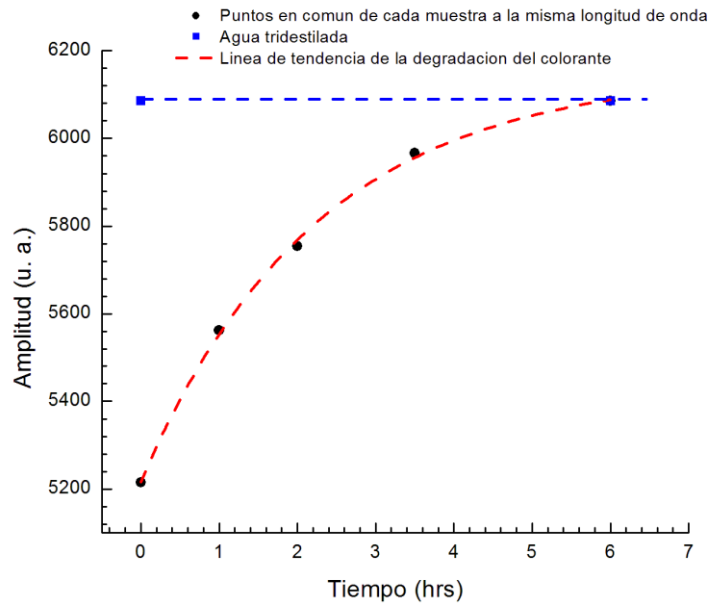


Figura 75. Línea de tendencia de la degradación del azul de metileno, para el caso donde se implementa el tubo Venturi.

Conclusiones y Recomendaciones

Se implemento un circuito hidráulico cerrado de 70 litros para la producción de la cavitación hidrodinámica luminiscente usando una bomba centrífuga rotatoria de 5 HP con su impulsor modificado y la incorporación en serie de un tubo Venturi. Con este acoplamiento se alcanza un índice de cavitación de ~ 0.1 .

El sistema se probó para degradar un colorante orgánico, alcanzando el 85% de limpieza en tres horas y media. Los resultados en la degradación del colorante y la utilización de diversos métodos de medición, durante nuestro trabajo; demuestran que la limpieza de agua es viable utilizando el dispositivo diseñado.

Las recomendaciones para trabajos en el futuro en esta línea de investigación son:

- a) modificar la estructura que soporta el circuito hidráulico para brindarle una mayor estabilidad,
- b) modificar el sistema de almacenamiento para facilitar su limpieza y traslado, además
- c) cambiar las dimensiones del tubo Venturi para aumentar el coeficiente de cavitación,
- d) realizar pruebas de desinfección realizando pruebas con análisis químicos que indiquen el grado de eliminación de microorganismos, además de indicar cuales logran resistir el proceso,
- e) desarrollar un sistema de enfriamiento debido al incremento de temperatura que se obtiene en el sistema,
- f) diseñar y manufacturar una bomba centrífuga (carcasa e impulsor) con materiales anticorrosivos como acero inoxidable.

Por otro lado es necesario realizar un análisis energético para determinar la eficiencia del sistema, ya que la mayoría de la energía se pierde en calor.

Referencias

1. Organización Meteorológica Mundial, ¿Hay suficiente agua en el mundo?, Publicado por: Ginebra: OMM, <http://www.fotosintese.net/pdf/Hay%20suficiente%20Agua.pdf>, 1997.
2. Marsilli, Alejandro. Tratamiento de aguas residuales, <http://www.tierramor.org/Articulos/tratagua.htm>, Dic. 2005
3. M. Sivakumar, A. B. Pandit, Wastewater treatment: a novel energy efficient hydrodynamic cavitacional technique. *Ultrasonic Sonochemistry* 9 (2002) 123-131.
4. P. R. Gogate, R. K. Tayal, and A. B. Pandit. *Current Science*, 91 (1), 35 (2006).
5. P. R. Gogate, A. B. Pandit, A review and assessment of hydrodynamic cavitation as a technology for the future. *Ultrasonic Sonochemistry* 12 (2005) 21-27.
6. S. Arrojo, Y. Benito, A. Martinez, A parametric study of disinfection with hydrodynamic cavitation. *Ultrasonic Sonochemistry*, 15 (2008) 903- 908.
7. Dhiman Chatterjee and Vijay H. Arakeri, Towards the concept of hydrodynamic cavitation control. *J. Fluid Mech.* (1997) 332, 377-394.
8. Xikui Wang , Jingang Wang, Peiquan Guo, Weilin Guo, Guoliang Li. Chemical effect of swirling jet-induced cavitation: Degradation of rhodamine B in aqueous solution. *Ultrasonic Sonochemistry* 15 (2008) 357–363.
9. Pradhan Amey A., Gogate Parag R. / Departamento de Ingeniería Química, Instituto de tecnología Química, Matunga, Mumbai, India.
10. Chand Rashmi, Ince Nilgun H., Gogate Parag R. / Departamento de Ingeniería Química, Instituto de tecnología Química, Matunga, Mumbai, India.
11. <http://arisdyne.com/vp/biodiesel.htm>; <http://www.arisdyne.com/vp/ethanol.htm>
12. <http://www.ctinanotech.com/technology/current-applications>
13. <http://www.dynaflow-inc.com/Products/Bubbly/bgen.htm>
14. <http://www.hydrodynamics.com/technology>
15. Schmidt T. Marvin Profesor de Química/ Instituto de Ciencias avanzadas y tecnología Beckman
16. http://www.oceansaver.no/how_it_works.html
17. <http://vrtxtech.com>

18. P.R. Gogate, R.K. Tayal, A. B. Pandit, Cavitation: a technology on the horizon, Current Science 91 (2006) 35-46.
19. Youg, R., Cavitation, London, p. 4, 1989
20. Lee, Stuart. Cavitación hidrodinamica, <http://cavitationtechnology.com/es/cavitation-tech/hydrodynamic-cavitation-tech>, 2011.
21. Youg, R., Cavitation, London, p. 190, 1989
22. T.B. Benjamin, A.T. Ellis, The collapse of cavitation bubbles and the pressures thereby produced against solid bodies, Phil. Trans. R. Soc. Lond. A 260 (1966) 221-240.
23. M. A. Promptov, Pulsation apparatus of rotor type: theory and Practice, Moscow, Mashinostroyeniye , 2001.
24. Youg, R., Cavitation, London, p. 223, 1989
25. The EnginneringToolBox, NPSH – Net Positive Suction Head, http://www.engineeringtoolbox.com/npsh-net-positive-suction-head-d_634.html
26. Youg, R., Cavitation, London, p. 248, 1989
27. Marco V. Tovar P, J. Juvenal Ramírez M, Tubo de Venturi, Diciembre 2007, <http://cubilfis.cucei.udg.mx/archivos/materias/labmedios/venturi.pdf>
28. J. P. Holman, Métodos Experimentales para Ingenieros, 4ª. Edición; Mc Graw Hill; México, 1994.
29. Bautista Suárez Luciano, Tesis: *Degradación de colorantes (azul de metileno) por métodos electroquímicos*, Universidad Veracruzana, México, 2011.
30. http://es.wikipedia.org/wiki/Azul_de_metileno
31. http://es.wikipedia.org/wiki/Ley_de_Beer-Lambert
32. A. Bhalchandra, A. Charan, Method of Designing Hydrodynamic Cavitation Reactors for Process Intensification, HYCA Technologies Pvt. Ltd., Mumbai, 2011.

Manuales de bombas y equipo electrónico

1.1 Bomba Centrífuga generalidades

Introducción y funcionamiento

Las bombas centrífugas mueven volumen de líquido, generalmente la presión proporcionada por una bomba se da en metros de columna de agua, denominándose como “altura”; son máquinas hidráulicas que transforman trabajo mecánico en otro de tipo hidráulico.

Los elementos constructivos de que constan estas bombas, ver Figura 76,77, son:

- a) **Una tubería de aspiración**, que concluye prácticamente en la brida de aspiración.
- b) **El impulsor o rodete**, formado por una serie de álabes de diversas formas que giran dentro de una carcasa circular. El rodete se acopla al eje y es la parte móvil de la bomba.

El líquido es succionado axialmente por la tubería de aspiración hasta el centro del rodete, que es impulsado por un motor, el líquido experimenta un cambio de dirección, pasando a radial, (en las centrífugas), o permaneciendo axial, (en las axiales), adquiriendo una aceleración y absorbiendo energía cinética.

Los álabes del rodete someten a las partículas de líquido a un movimiento de rotación rápida, siendo proyectadas hacia el exterior por la fuerza centrífuga, de forma que al salir del rodete hacia la voluta adquieren gran velocidad, en la voluta se transforma parte de la energía dinámica adquirida en el rodete, en energía de presión, siendo lanzado el flujo contra las paredes del cuerpo de la bomba (carcasa) y evacuado por la tubería de impulsión.

La carcasa, (voluta), está dispuesta en forma de caracol, de tal manera, que la separación entre ella y el rodete es mínima en la parte superior; la separación va aumentando hasta que las partículas líquidas se encuentran frente a la abertura de impulsión; en algunas bombas existe, a la salida del rodete, una corona directriz de álabes que guía el líquido a la salida del impulsor antes de introducirlo en la voluta.

- c) **Una tubería de impulsión**.- la finalidad de la voluta es la de recoger el líquido que viene a alta velocidad, cambiar la dirección de su movimiento y encamilarlo hacia la brida de impulsión de la bomba. La voluta es también un transformador de energía, ya que disminuye la velocidad del flujo (transforma parte de la energía dinámica en energía de presión), aumentando la presión del líquido a medida que el espacio entre el rodete y la carcasa aumenta.

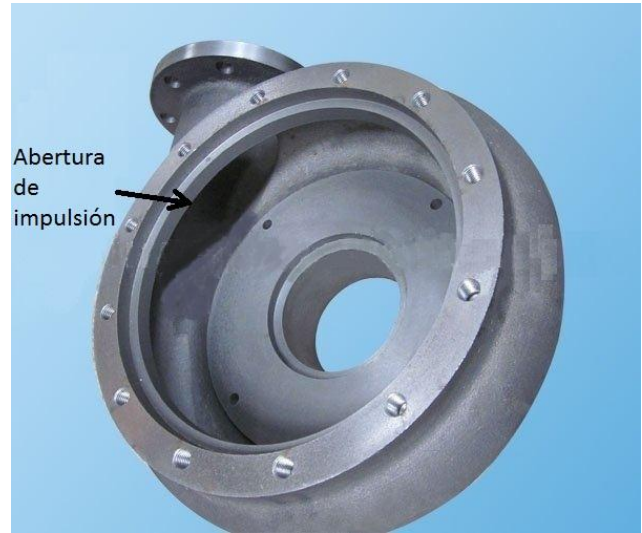
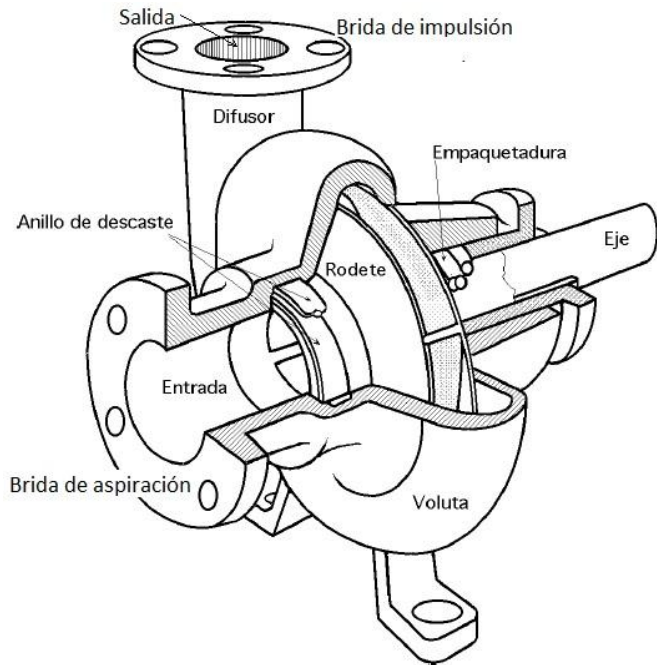
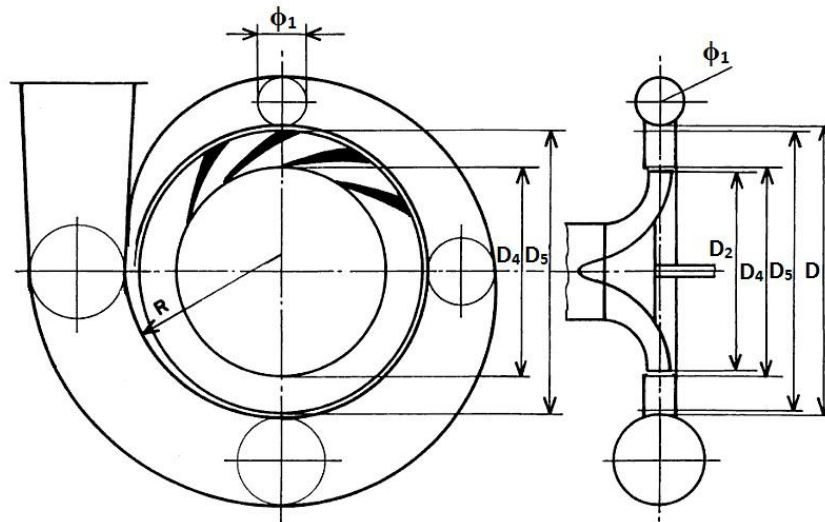


Figura 76. Bomba centrífuga.



D_2 = Diámetro exterior del impulsor
 D_4 = Diámetro interior de la corona directriz de álabes
 D_5 = Diámetro exterior de la corona directriz de álabes

Figura 77. Trazado de una carcasa con una corona directriz de álabes.

Clasificación de las bombas centrífugas

En las bombas centrífugas la energía se transfiere al líquido por medio de alabes en movimiento de rotación, a diferencia de las de desplazamiento volumétrico o positivo, rotativas (de engranes, tornillos, lóbulos, levas, etc.) y alternativas de pistón, de vapor de acción directa o mecánicas.

Las **ventajas** principales de las bombas centrífugas son:

Caudal constante, presión uniforme, sencillez de construcción, tamaño reducido, bajo mantenimiento y flexibilidad de regulación.

Uno de sus pocos inconvenientes es la necesidad de cebado previo al funcionamiento, ya que las bombas centrífugas, al contrario que las de desplazamiento positivo, no son autoaspirantes.

Los tipos de bombas centrífugas más comunes son:

- Radiales, axiales y diagonales.
- De impulsor abierto, semiabierto y cerrado.
- Horizontales y verticales.

a) Bombas radiales, axiales y diagonales

En las bombas centrífugas radiales la línea de flujo (desplazamiento en una ruta determinada de una masa o cuerpo líquido) se verifica en planos radiales, en las axiales en superficies cilíndricas alrededor del eje de rotación y en las diagonales se verifica radial y axialmente, denominándose también de flujo mixto, ver campos de aplicación en figura 78.

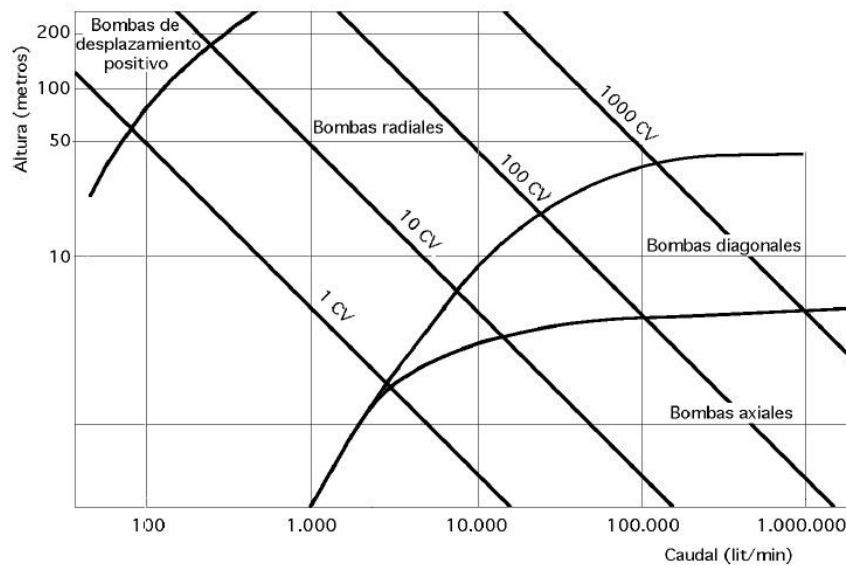


Figura 78. Campos de aplicación de los tres tipos de bombas centrífugas.

La **forma de los álabes**; en los impulsores de flujo radial es, en general, curvada hacia atrás con respecto al sentido de giro, y con superficies de simple curvatura, siendo la generatriz paralela al eje de rotación; en los impulsores helicoidales, los álabes son de doble curvatura y en los axiales tienen, además, un determinado perfil aerodinámico.

b) Bombas con impulsor abierto, semiabierto y cerrado

Teniendo en cuenta su diseño mecánico o estructural, se distinguen tres tipos de impulsores:

- a) De álabes aislados (abiertos)
- b) Con pared o disco lateral de apoyo (semiabiertos)
- c) Con ambas paredes laterales (cerrados)

Esta clasificación es independiente de la más general, que se refiere al tipo de diseño hidráulico, por lo que en esta nueva clasificación puede haber impulsores centrífugos y de flujo mixto, abiertos, semiabiertos o cerrados (figura 79).

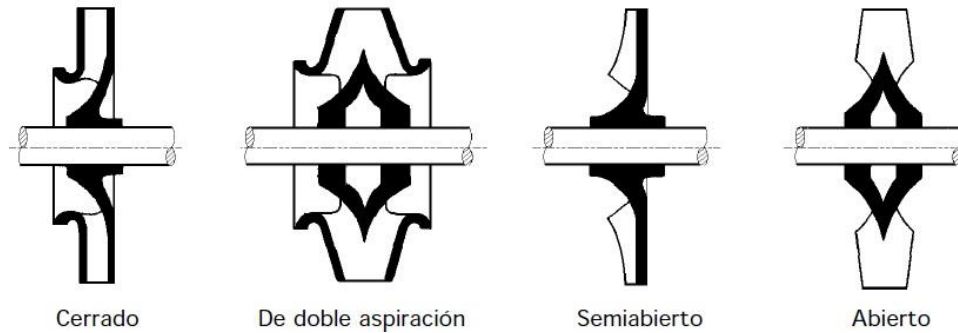


Figura 79. Tipos de impulsores.

Impulsores abiertos.- En un impulsor abierto, los álabes van unidos únicamente al eje de giro y se mueven entre dos paredes laterales fijas pertenecientes a la carcasa de la bomba, con tolerancias laterales lo más estrechas posibles para evitar fugas.

Esta construcción es mecánicamente débil, por el largo voladizo en que trabajan los álabes, por lo que estos impulsores disponen siempre de una fracción de pared posterior para dar a los álabes la rigidez necesaria, ver Figura 80.

Los impulsores abiertos se utilizan en algunas bombas radiales pequeñas y para el bombeo de líquidos abrasivos.

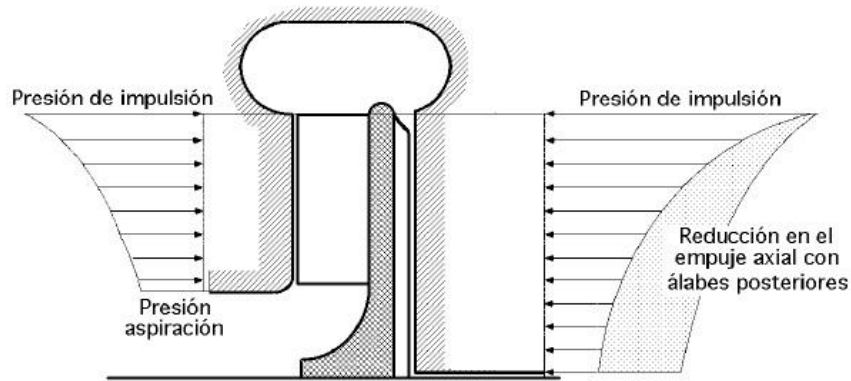


Figura 80. Empuje axial en impulsor abierto con álabes posteriores.

Impulsores semiabiertos.- Los impulsores con una sola pared lateral, que siempre es la posterior, se emplean con cierta frecuencia, destacando las bombas de flujo mixto y todas las axiales. Al igual que en los abiertos, su rendimiento está basado en una tolerancia lateral estrecha, del orden de 0.3 mm, que evita fugas de la periferia al centro y en los canales del impulsor entre sí. Estas fugas son mayores cuanto menos viscoso es el líquido por lo que con líquidos viscosos el caudal y la altura aumentan.

El empuje axial en los impulsores abiertos es mayor que en los cerrados, pues la parte anterior está sometida a una presión media menor; para reducir este defecto se les provee de álabes posteriores Figura 81, que disminuyen en gran manera la presión media en la cara posterior.

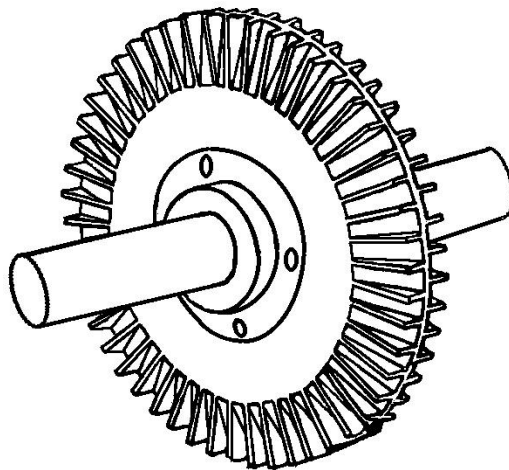


Figura 81. Impulsor de una bomba de torbellino con álabes radiales a ambos lados del disco.

Lo anterior, también sirve para evitar que el líquido quede estancado cerca del eje y empaquetaduras, ya que si aquel fuese abrasivo resulta perjudicial.

Las ventajas del impulsor abierto sobre el cerrado son:

- Menor tendencia a obstruirse, adecuado para líquidos sucios.
- El menor roce hidráulico del disco, al tener sólo una pared girando, de lo que se deduce un buen rendimiento.

- Una mayor accesibilidad de los álabes para el mecanizado, lo que permite conseguir mejores acabados
- Mayor facilidad de construcción, con modelos más sencillos, por lo que se utiliza una mayor variedad de materiales constructivos con un coste menor de fabricación.

Aunque al principio los impulsores se hacían abiertos, de doble aspiración, hoy en día han caído en desuso por dificultades de ajuste y sólo se fabrican los de aspiración simple.

Impulsores cerrados.- Los impulsores cerrados tienen los álabes colocados entre dos paredes laterales, anterior o de aspiración y posterior. Hay un margen estrecho de tolerancias para evitar fugas de retroceso entre la impulsión y la aspiración, los sellos suelen ser axiales y están constituidos por superficies anulares muy próximas, situadas alrededor del orificio de aspiración (centro del impulsor) y formadas por los aros de cierre, uno estacionario montado en el cuerpo y el otro que gira montado en el impulsor, Figura 82.

La principal ventaja de esta solución es que los aros de cierre se cambian fácilmente cuando se desgastan, recuperando la tolerancia original, evitándose así las fugas.

Respecto al desgaste (de los aros de cierre), se pueden hacer de materiales especiales para condiciones de funcionamiento y servicio particularmente severas.

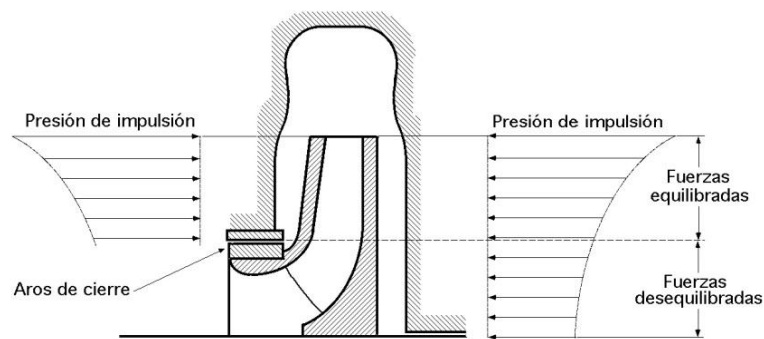


Figura 82. Empuje axial en impulsor cerrado.

Los impulsores cerrados resisten mejor la flexión del eje, o contracciones y dilataciones mayores de las previstas, por lo que son más adecuados para servicios de altas temperaturas. Tienen la desventaja de que sus canales son normalmente inaccesibles para cualquier tipo de maquinado, lo que exige métodos constructivos especiales, difíciles, con modelos más complicados que en los abiertos. Hidráulicamente, el rozamiento de disco al tener el impulsor dos paredes, es el doble que en los abiertos, pero las pérdidas por fugas son menores.

La posibilidad de obstrucción con líquidos sucios es mayor y para ello se diseñan impulsores especiales con centro de gran área, canales lo más amplios posibles, pequeño número de álabes, 2 ó 3, y éstos con los bordes de entrada redondeados.

c) Bombas horizontales y verticales

El eje de rotación de una bomba es: horizontal o vertical, (rara vez inclinado). De esta disposición se derivan diferentes estructuras en la construcción de las bombas.

Bombas horizontales.- La disposición del eje de giro horizontal presupone que la bomba y el motor se hallan a la misma altura; éste tipo de bombas se utiliza para funcionamiento en “seco”, exterior al líquido bombeado que llega a la bomba por medio de una tubería de aspiración.

Las bombas centrífugas, sin embargo, no deben girar en seco, ya que necesitan del líquido bombeado como lubricante entre aros de cierre e impulsor, y entre empaquetadura y eje.

Como no son autoaspirantes requieren, antes de su puesta en marcha, el estar cebadas; esto no es fácil de conseguir si la bomba no trabaja con carga, estando por encima del nivel del líquido, que es el caso mas normal con bombas horizontales, siendo a menudo necesarias las válvulas de pie, (aspiración), y los distintos sistemas de cebado.

Como ventajas específicas las bombas horizontales, (excepto para grandes tamaños), son de construcción más barata que las verticales y, especialmente, su mantenimiento y conservación es más sencillo y económico; el desmontaje de la bomba se suele hacer sin necesidad de mover el motor y sin tocar siquiera las conexiones de aspiración e impulsión.

Bombas verticales.- Las bombas con eje de giro en posición vertical tienen, casi siempre, el motor a un nivel superior al de la bomba.

La ventaja de las bombas verticales, es que requieren poco espacio horizontal que las hace insustituibles en barcos, pozos, etc. sin embargo se necesita un espacio vertical superior suficiente para permitir su cómodo montaje y desmontaje.

Para bombas de gran caudal, la construcción vertical resulta en general mas barata que la horizontal. Las bombas verticales se emplean normalmente en aplicaciones marinas, para aguas sucias, drenajes, irrigación, circulación de condensadores, etc.

1.2 Equipo: Osciloscopio, Fotomultiplicador, Sensor de Fuerza y sensor piezoeléctrico de película

A continuación se presentan algunas características del equipo usado en el arreglo experimental.

- **Osciloscopio**



Figura 83. Osciloscopio LeCroy WaveRunner® Xi-A.

Tabla 12. Especificaciones del Osciloscopio LeCroy WaveRunner® Xi-A.

Parametro		Unidad
Ancho de Banda nominal	1	GHz
Tiempo de subida	350	ps
Canales de entrada	4	
Impedancia de entrada	1	MΩ
Acoplamiento de entrada	50: DC; 1: AC, DC, GND	MΩ
Voltaje de entrada máximo	50 Ω: 5V _{rms} , 1MΩ: 250 V máx.	V
Conector de entrada	ProBus/BNC	

- **Fotomultiplicador**



Figura 84. Fotomultiplicador. Hamamatsu™ serie H5784.

Tabla 13. Especificaciones del Fotomultiplicador. Hamamatsu™ serie H5784

Parámetro		Unidad	
Espectro	185 a 850	nm	
Voltaje de entrada	+11.5 a +15.5	V	
Voltaje máximo de entrada	+18	V	
Corriente máxima de entrada	9	mA	
Corriente máxima de salida	100	μA	
Voltaje de control Máximo	+1.0 (impedancia de entrada 100 kΩ)	V	
Área efectiva	Φ8	Mm	
Longitud de onda del pico de sensibilidad	400	Nm	
Cátodo	Sensibilidad luminosa	Min 80 Tip 150	μA/lm
	Proporción Rojo/Blanco	0.2	
Ánodo	Sensibilidad radiante luminosa	Tip. 15 Max. 75	mA/W A/lm
	Sensibilidad radiante	3.0x10 ⁴	A/W
	Corriente Obscura	Tip. 0.4 Max. 4	nA
	Tiempo de subida	0.78	ns
Onda de Ruido	1.2	mV	
Tiempo de alistamiento	2	S	
Temperatura de funcionamiento	+5 a +50	°C	
Temperatura de almacenamiento	-20 a +50	°C	

- **Sensor de fuerza**



Figura 85. Sensor de fuerza PCB Piezotronics™ 200B04.

Tabla 14. Especificaciones del Sensor de fuerza PCB Piezotronics™ 200B04

Parámetro		Unidad
Sensibilidad	1124	mV/kN
Rango de medición	4.448	kN
Fuerza estática máxima	22.24	kN
Resolución de ancho de banda	0.089	N-rms
Respuesta a baja frecuencia	0.0003	Hz
Límite de alta frecuencia	75	kHz
Rango de temperatura	-54 a +121	°C
Voltaje de excitación	20 a 30	VDC

- **Sensor piezoeléctrico de película**



Figura 86. Sensor piezoeléctrico de película. LDT1-028K.

Tabla 15. Especificaciones del Sensor piezoeléctrico de película. LDT1-028K

Parametro		
Impedancia mínima	1	MΩ
Impedancia principal	10	MΩ
Voltaje de salida	10 a 100	mV a V
Temperatura de almacenamiento	-40 a +70	°C
Temperatura de Operación	0 a +70	°C