



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**DISMINUCIÓN DE LA VISCOSIDAD DE LÍQUIDOS  
MEDIANTE CAVITACIÓN HIDRODINÁMICA**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
INGENIERO MECÁNICO  
P R E S E N T A N:**

**Antonio de Jesús Vargas Efigenio  
Daniel Esquivel Velazquez**



**DIRECTORA DE TESIS:  
Margarita Navarrete Montesinos  
México, D. F. 2014**



*A mis padres Andrés y Verónica que me han dado todo en la vida*

*A mis hermanos que crecieron conmigo y fueron mis primeros compañeros en la vida, en especial a Vero, por ser como una segunda madre*

*A Araceli por estar conmigo en la mayor parte de la carrera*

*A mis compañeros de generación, en especial a Abraham, Javier, Tania, Vladimir, Victor, Christian, Paul, Amalinalli y Héctor por ser buenos amigos y contribuir a pasar algunas materias*

*A mis compañeros del Cubículo 311 Samuel, Yair, Lalo, Jimena, Olivia y Jesús por hacer amena la estancia en el Instituto y las contribuciones en la elaboración de esta tesis*

*A la doctora Margarita Navarrete Montesinos por darme la oportunidad de realizar este trabajo, sus consejos y su tiempo*

*Antonio de Jesús Vargas Efigenio*

*Agradezco a Dios por permitirme ser parte de este universo. A mi madre y padre por brindarme todo el apoyo y confianza a lo largo de mi vida*

*A mis hermanas Nayeli y Lupita por ser mis grandes amigas*

*A la memoria de mi hermano Juan, te llevo en mi corazón siempre*

*A mi amigo Joaquín por compartir horas y horas de pláticas sobre Ingeniería, otros temas y nuestro deporte favorito el Skate*

*A mi tía Yolanda e Irma por alentarme a seguir adelante en cada paso de la carrera*

*A Anibal y Sinka por darme la oportunidad de ser parte del Complejo Industrial Estrada durante la mayoría de mis vacaciones de verano*

*A la Dra. Margarita Navarrete Montesinos por permitirme ser parte de un proyecto del laboratorio de Pruebas no Destructivas*

*Daniel Esquivel Velazquez*

## Agradecimientos

***Investigación realizada gracias al Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT) de la UNAM***

*IN105212-3: Rompimiento de hidrocarburos de alta viscosidad  
Inducidos por cavitación hidrodinámica rotatoria*

*Al proyecto conjunto Instituto de Ingeniería y Facultad de Ingeniería  
“Estudio y seguimiento de la temporalidad de los fenómenos físicos involucrados  
en la emisión de frentes de choque” con número 3130 por la beca otorgada.*

*Al Instituto de Ingeniería por permitirnos ser parte de su grupo de becarios,  
por las instalaciones, equipo, laboratorios, talleres y el acervo bibliográfico,  
que nos permitieron realizar esta tesis*

# Índice General

<b>Índice de figuras</b>	<b>1</b>
<b>Índice de tablas</b>	<b>2</b>
<b>Símbolos</b>	<b>3</b>
<b>Prólogo</b>	<b>4</b>
<b>Resumen</b>	<b>5</b>
<b>Capítulo 1. Introducción</b>	<b>6</b>
1.1 Breve revisión de las aplicaciones actuales de la cavitación	8
1.2 Objetivos	13
<b>Capítulo 2. Principios básicos</b>	<b>14</b>
2.1 Cavitación	14
2.2 Cavitación hidrodinámica	16
2.3 Cavitación acústica	18
2.4 Viscosidad	19
2.5 Tubo Venturi y análisis dinámico	21
<b>Capítulo 3. Dispositivos experimentales para generar cavitación</b>	<b>26</b>
3.1 Circuito hidráulico.	26
3.2 Funcionamiento del circuito hidráulico	31
3.3 Arreglo experimental para cavitación acústica	32
<b>Capítulo 4. Caracterización y corridas experimentales</b>	<b>35</b>
4.1 Viscosimetría	36
4.2 Pruebas de ajuste para el uso de la cavitación acústica al 1,2-Propanodiol en función del tiempo	39
4.3 Pruebas de cavitación acústica en 1,2-Propanodiol	39
4.4 Pruebas de cavitación hidrodinámica al 1,2-Propanodiol en función del tiempo	43
<b>Capítulo 5. Resultados y análisis</b>	<b>49</b>
5.1 Cálculo del número de cavitación en el Venturi y en el sistema acústico	49
5.2 Curvas viscosidad-temperatura del líquido sin y con tratamiento	55
5.3 Espectros infrarrojos de los diferentes tratamientos y metodología para obtener la densidad	58
5.4 Cálculo de la energía suministrada a los sistemas generadores de cavitación hidrodinámica y acústica	65
<b>Conclusiones y recomendaciones</b>	<b>66</b>
<b>Referencias</b>	<b>67</b>
<b>Anexos</b>	<b>70</b>

## Índice de figuras

Figura 1. Modos de vaporizar un líquido en diagrama P-T	14
Figura 2. Modos de vaporizar un líquido en diagrama P-V	15
Figura 3. Representación esquemática de las diferentes etapas de la cavitación	17
Figura 4. Variación de la presión en tubo Venturi y situaciones en que se produce cavitación	17
Figura 5. Representación del campo acústico para generar cavitación	19
Figura 6. Fluido entre cilindros con una separación pequeña	20
Figura 7. Superficie de control (S. C.) en sección transversal del Tubo Venturi	23
Figura 8. Diagrama del circuito hidráulico para generar cavitación hidrodinámica	26
Figura 9. Imagen del impulsor de la bomba modificado	28
Figura 10. Tubo Venturi con accesorio intercambiable	28
Figura 11. Diagrama del ensamble de tubo Venturi (acotaciones mm)	28
Figura 12. Fotografía del tubo Venturi ensamblado	29
Figura 13. Vista del montaje del tubo Venturi donde se observa la estructura de sujeción	29
Figura 14. Válvula de regulación de gasto del circuito hidráulico	30
Figura 15. Intercambiador de calor. a) Tanque principal, b) serpentín de cobre, c) conexión con tubería	30
Figura 16. Imagen del sistema de enfriamiento, tanque de recirculación y condensador	31
Figura 17. Diagrama de la disposición de válvulas para circuito sin uso	31
Figura 18. Diagrama de la disposición de válvulas para comenzar a usar el circuito	32
Figura 19. Imágenes del procesador ultrasónico y matraz usados para la cavitación acústica	33
Figura 20. Vista del sonotrodo fijo en soporte universal y posición de la punta en el matraz	33
Figura 21. Arreglo experimental para generar cavitación acústica	34
Figura 22. Arreglo experimental para medir la viscosidad y vaso con muestra en el calentador eléctrico	36
Figura 23. Muestras de la primera prueba de cavitación acústica	41
Figura 24. Muestras de la segunda prueba de cavitación acústica	42
Figura 25. Disposición del multímetro digital de gancho en el control de la bomba	44
Figura 26. Muestras de la prueba de cavitación hidrodinámica	45
Figura 27. Muestras de 1,2-Propanodiol con diferentes tratamientos	48
Figura 28. Tubo Venturi con conexiones de tubo PVC C80 2 1/2" (Acotaciones en mm)	50
Figura 29. Estructura molecular del 1,2-Propanodiol	58
Figura 30. Espectros infrarrojos de las muestras analizadas	59
Figura 31. Caracterización del espectro infrarrojo	60
Figura 32. Instrumentos para la medición de la densidad	61
Figura 33. Imagen de la trampa para desgasificación	61
Figura 34. Equipo de desgasificación	62
Figura 35. Bomba de vacío	62
Figura 36. Esquema del enrazado del matraz	63
Figura 37. Matraz aforado de 25 ml con 1,2-Propanodiol	63
Figura 38. Representación esquemática del interior de la carcasa de una bomba centrífuga	71
Figura 39. Esquema del espectro electromagnético	71
Figura 40. Esquema de las principales técnicas espectrométricas	72
Figura 41. Diagrama del viscosímetro de Ostwald	73
Figura 42. Husillo y viscosímetro digital marca Brockfield	73

## Índice de tablas

Tabla 1. Aplicaciones actuales de la cavitación	8
Tabla 2. Especificaciones del Convertidor de frecuencias Yaskawa	27
Tabla 3. Especificaciones del motor de la bomba Siemens JM10	27
Tabla 4. Propiedades reológicas del 1,2-Propanodiol en función de la temperatura	35
Tabla 5. Propiedades 1,2-Propanodiol a temperatura y presión estándar	36
Tabla 6. Comportamiento de la temperatura en función del tiempo para los primeros 20 minutos de cavitación acústica	40
Tabla 7. Comportamiento de la temperatura en función del tiempo para 40 minutos de cavitación acústica	40
Tabla 8. Tiempo de adquisición de la primera prueba de cavitación acústica	41
Tabla 9. Muestras de la segunda prueba de cavitación acústica	42
Tabla 10. Temperatura del 1,2-Propanodiol y el condensador en función del tiempo para la primera prueba del sistema de enfriamiento con la bomba al 15%	43
Tabla 11. Temperatura del 1,2-Propanodiol y el condensador en función del tiempo para la segunda prueba del sistema de enfriamiento con la bomba al 15%	43
Tabla 12. Muestras de 1,2-Propanodiol tratado con cavitación hidrodinámica	45
Tabla 13. Comportamiento del sistema para la primera hora de cavitación hidrodinámica	45
Tabla 14. Comportamiento del sistema para la décima hora de cavitación hidrodinámica	46
Tabla 15. Adquisición de corriente y flujo volumétrico	49
Tabla 16. Flujo volumétrico teórico en función de la corriente	50
Tabla 17. Velocidades en la garganta del tubo Venturi y tubería	51
Tabla 18. Potencia ideal suministrada a la bomba	52
Tabla 19. Potencia real suministrada a la bomba	52
Tabla 20. Presión a la entrada del tubo Venturi	53
Tabla 21. Número de cavitación en función del porcentaje de la bomba	53
Tabla 22. Parámetros de la ecuación de Andrade para las distintas muestras	58
Tabla 23. Cálculo de la densidad 1,2-Propanodiol	64
Tabla 24. Cálculo de la densidad prueba 1 sonotrodo	64
Tabla 25. Cálculo de la densidad prueba 1 hidrodinámica	64
Tabla 26. Densidades de las muestras procesadas	64
Tabla 27. Potencia suministrada a los sistemas experimentales	65
Tabla 28. Potencia total suministrada a 500 ml	65



## Símbolos

Símbolo	Cantidad física	Unidad
$T$	Temperatura	[°C]
$P$	Presión	[Pa]
$m$	Masa	[kg]
$Q$	Calor	[J]
$L$	Calor latente por unidad de masa	[J/kg]
$v$	Volumen específico	[m <sup>3</sup> /kg]
$\rho$	Densidad	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\sigma$	Numero de cavitación	[ <i>u. a.</i> ]
$V$	Velocidad	[m/s]
$\mathbb{V}$	Vector velocidad	[m/s]
$\mu$	Viscosidad dinámica	[Pa * s]
$\eta_0$	Constante pre-exponencial	[Pa * s]
$E$	Energía de activación	[J/mol]
$R$	Constante de gas ideal	[J/(mol * K)]
$\tau$	Esfuerzo cortante	[Pa]
$T$	Torsión	[N * m]
$Q$	Flujo volumétrico	[m <sup>3</sup> /s]
$I$	Corriente eléctrica	[A]
$V$	Voltaje	[V]
$A$	Área	[m <sup>2</sup> ]
$\Psi$	Volumen	[m <sup>3</sup> ]

## Prólogo

El fenómeno de la cavitación comenzó a presentarse en elementos de máquinas que trabajan con fluidos a alta velocidad desde finales del Siglo XIX, provocando erosión y daños superficiales, llegando en ocasiones a dejar inservibles las partes expuestas a este fenómeno. La marina inglesa encontró que la cavitación era una limitante en el diseño de las hélices de proa. Lord Rayleigh, invitado por la marina inglesa, estudió el fenómeno de la cavitación y publicó un reporte en 1917, donde describe el comportamiento de una burbuja esférica en la superficie de una hélice marina y establece la principal causa de la erosión a altas velocidades [1].

Desde entonces, ingenieros y científicos han centrado sus esfuerzos en evitar la cavitación en equipos hidráulicos, como hélices, válvulas, bombas, turbinas, etc. No fue sino hasta hace algunos años que algunos grupos de investigación alrededor del mundo comenzaron a ver a la cavitación como una herramienta para la aceleración de algunos procesos químicos. En el artículo de Padalka en 1962 se describe por primera vez el uso de la cavitación para mejorar el procesamiento de petróleo crudo [2].

En el Laboratorio de Pruebas no Destructivas del Instituto de Ingeniería de la UNAM, la Dra. Margarita Navarrete ha estudiado por cerca de 10 años el fenómeno de la cavitación, se realizan estudios sobre el colapso de una burbuja cónica, colapso de una burbuja esférica y más recientemente las aplicaciones en la limpieza y desinfección del agua usando un circuito hidráulico que genera cavitación hidrodinámica. Actualmente, se trabaja en el rompimiento de hidrocarburos de alto peso molecular, con el propósito de diseñar un dispositivo e implementarlo industrialmente.

Para alcanzar el objetivo de este proyecto denominado “Rompimiento de hidrocarburos de alto peso molecular inducidos por cavitación hidrodinámica rotatoria” del programa PAPIIT-UNAM, se comienza con el estudio del circuito hidráulico utilizado para la limpieza de agua. Realizando ajustes, se determina la factibilidad de utilizar cavitación en la reducción de la viscosidad de líquidos de alto peso molecular. Este trabajo de tesis es parte del proyecto y se enfoca en determinar si la cavitación hidrodinámica es un método viable para éste propósito.

La continuación del proyecto incluye adquirir muestras de petróleo crudo de viscosidad media y someterlo a pruebas de cavitación acústica e hidrodinámica, realizar ajustes en el circuito e implementar técnicas optoacústicas para conocer e identificar las variables que intervienen en este proceso y por último diseñar un dispositivo prototipo para utilizarlo en el tratamiento de petróleo y sus derivados.

## Resumen

Se estudia el efecto de la cavitación tanto acústica como hidrodinámica para disminuir la viscosidad de líquidos con alto peso molecular. Para generar la cavitación hidrodinámica se utiliza el circuito hidráulico de 70 litros del Laboratorio de Pruebas no Destructivas del Instituto de Ingeniería. El circuito se compone principalmente de una bomba centrífuga de 5 HP con el impulsor modificado, un tubo Venturi y un tanque de almacenamiento con sistema de enfriamiento. Para la generación de cavitación acústica se emplea un generador ultrasónico de 750 W a una frecuencia de 20 kHz con un sonotrodo de 13 mm de diámetro y longitud de 136 mm de aleación de titanio (Ti-6Al-4V), que procesa hasta un total de tres litros.

Se realizan pruebas preliminares sobre ambos sistemas. En el arreglo experimental de cavitación acústica se observa sobrecalentamiento en el sonotrodo, por lo que se determina implementar un sistema de enfriamiento. Al circuito hidráulico se le acondiciona y se prueba su sistema de enfriamiento. A partir de estas pruebas preliminares se desarrolla e implementa una metodología para procesar el líquido con los sistemas cavitantes; que incluye aplicar cavitación por un total de 10 horas.

El líquido procesado es 1,2-Propanodiol. Para verificar el cambio en la viscosidad del líquido se aplica viscosimetría rotatoria y se obtienen las curvas viscosidad-temperatura. Además, se realiza espectrometría infrarroja a las muestras para determinar cambios moleculares.

En la parte teórica se realiza un ajuste a las curvas viscosidad-temperatura experimentales usando el modelo de la ecuación de *Arrhenius* y se encuentra la energía de activación para cada caso. También se determina el número de cavitación que alcanzan ambos sistemas considerando la potencia aplicada y el comportamiento del flujo. Para la cavitación hidrodinámica se calcula un valor 0.45 y para la cavitación acústica de 0.39.

Con respecto a la viscosidad, encontramos que para ambos métodos se alcanza una disminución similar en el líquido de aproximadamente 30%. Sin embargo, se obtienen 70 litros procesados con cavitación hidrodinámica, mientras que se obtienen 500 ml con cavitación acústica.

# Capítulo 1

## Introducción

El transporte de productos líquidos mediante el bombeo en ductos es una operación compleja y de alta dificultad técnica, debido principalmente a la resistencia que presentan éstos al fluir, es por ello que se requieren nuevos métodos y estrategias para transportarlos al lugar de procesamiento [3]. Existen distintas técnicas que tienen como fin reducir la viscosidad de líquidos viscosos en el interior de un ducto. Los principales que se aplican industrialmente se describen a continuación:

*Diluciones.* Este método consiste en diluir el líquido viscoso mediante la inclusión de sustancias que logren una mezcla uniforme y estable, como solventes o fracciones más ligeras. La desventaja es la necesidad de incluir otra sustancia. Además, se necesita tener un sistema de mezclado para conseguir una mezcla homogénea [4].

*Calentamiento.* Aplicando calor a los líquidos, su viscosidad se reduce haciendo fácil su bombeo. El calentamiento se realiza hasta un punto en donde se tiene un flujo continuo. La principal desventaja es el costo operacional de calentar ductos a través de largas distancias. Además, en el caso de ductos submarinos, mantenerlos calientes es difícil, así que se tienen tanto estaciones de bombeo como de calentamiento [4,5].

*Formación de emulsiones.* El líquido viscoso se emulsiona mediante el uso de tensoactivos y detergentes por lo que presenta una aparente disminución de la viscosidad y así se transporta. Su desventaja es que una vez que el líquido llega a su destino las sustancias tienen que ser removidas [6,7].

Existen otros métodos que disminuyen la viscosidad de los líquidos: el proceso ultrasónico que se aplica después de la etapa de refinación. A este proceso se le conoce como “upgrade” o mejoramiento. Las ideas patentadas y comercializadas para lograr lo anterior, se basan en el uso de reactores sonoquímicos, en donde voluminosos piezoeléctricos enfocan la energía en el seno del líquido, éste es un proceso caro e ineficiente, ya que la mayoría de la energía se transforma en calor y ruido. Otros diseños emplean cambios de fase usando calderas o energía solar para hacer vibrar estructuras que generan energía acústica.

La idea descrita anteriormente se trabaja desde los años sesenta por investigadores rusos. En un trabajo presentado en 1960 en la “Conferencia Técnica en el Uso del Ultrasonido en la Industria” (*All-Union Scientific and Technical Conference on Use of Ultrasound in Industry*) por primera vez se describe el uso de la cavitación para provocar el rompimiento de hidrocarburos. En este trabajo se encuentran los resultados de los estudios del efecto de las vibraciones ultrasónicas en la ruptura de petróleo crudo pesado a alta presión [8]. Sin embargo no se determinaron las causas de la

disminución de fracciones pesadas, sólo se indicó la hipótesis de que el efecto de las vibraciones ultrasónicas es la causante de tal disminución.

Otro método, cuyo principio es similar al de las vibraciones ultrasónicas, es el uso de un activador hidrodinámico, donde el líquido a procesar circula a alta velocidad en un circuito hidráulico y es sometido a cambios de presión en accesorios, dispositivos o modificaciones en la geometría de la tubería. La disminución en la viscosidad por el uso del activador hidrodinámico y las vibraciones ultrasónicas en líquidos viscosos, se debe a que estos producen el fenómeno de la cavitación. La cavitación es el fenómeno de generación de burbujas o cavidades en un líquido debido a la disminución de la presión por debajo de la presión de vapor saturado para el líquido [9]. El colapso de ellas se produce casi instantáneamente al subir repentinamente la presión. Así, surgen líneas de corriente, se libera energía en forma de ondas de choque, la temperatura y presión dentro de la burbuja alcanzan  $10^4$  K y 200-400 MPa respectivamente. La generación y desarrollo de la cavitación depende de las propiedades del líquido, la presencia de contaminantes en el mismo, la presión y temperatura, entre otros parámetros. Ocurre en muchas máquinas hidráulicas y sus componentes, lo que ocasiona que su intervalo de operación sea limitado [10].

En la actualidad existe una amplia variedad de dispositivos que aprovechan la energía resultado del fenómeno de la cavitación y ya se emplean en diversas áreas, entre las cuales se incluye el tratamiento a hidrocarburos y el uso de la cavitación acústica e hidrodinámica. A continuación se hace una revisión de las aplicaciones y estudios actuales de la cavitación.

## 1.1 Breve revisión de las aplicaciones actuales de la cavitación

En la **Tabla 1** se resumen los avances reportados en la literatura para alcanzar la cavitación y los procesos en los que se aplican.

Tabla 1. Aplicaciones actuales de la cavitación

Grupo	Tipo(s) de cavitación	Aplicación	Estado	Fecha de inicio
i) Parag R. Gogate Universidad de Mumbai, India	Acústica Hidrodinámica	Aguas residuales, biocombustibles, síntesis orgánica, destrucción bacteriológica	En desarrollo	1999
ii) Rashmi Chand Universidad de Albertay, Escocia	Acústica Hidrodinámica	Oxidación orgánica	En desarrollo	2007
iii) Kenneth S. Suslick Universidad de Illinois, EU	Acústica	Materiales inorgánicos, aguas residuales y bioquímica	En desarrollo	1997
iv) Mohan M. Gore BVDU College of Engineering, India	Hidrodinámica	Tratamiento de agua	En desarrollo	2013
v) Yongchun Huang, Guangxi University of Technology	Hidrodinámica	Degradación de compuestos	En desarrollo	2013
vi) Ecosphere Technologies Inc. Florida, EU	Hidrodinámica Acústica	Tratamiento de agua	Unidad comercial	1998
vii) Arisdyn Systems, Ohio, EU	Hidrodinámica	Tecnologías de combustibles	Unidad comercial	1996
viii) Cavitation Technologies, Inc. California, EU	Hidrodinámica	Tecnologías de combustibles	Unidad comercial	2007
ix) Dynaflow Inc. Maryland, EU	Hidrodinámica	Oxidación y desinfección	Unidad comercial	1988
x) Hydro Dynamics, Inc., Georgia, EU	Hidrodinámica	Tecnologías de combustibles, procesamientos	Unidad comercial	1991
xi) Eimco Water Technologies, Utah, EU	Acústica	Digestores	Unidad comercial	2002
xii) VRTX Advanced fluid technology, Texas, EU	Hidrodinámica	Tratamiento de agua industrial	Unidad comercial	1998

A continuación se describe en que consiste cada trabajo:

### i). Parag R. Gogate

Él y su equipo de la Universidad de Mumbai llevan trabajando más de 10 años en cavitación acústica e hidrodinámica, haciendo diversos trabajos como: la limpieza de aguas residuales con reactores sonoquímicos, destrucción de compuestos orgánicos en reactores sonoquímicos con la ayuda de catalizadores, estudio de la dinámica en burbujas de cavitación y diseño de un reactor hidrodinámico, intensificación en la síntesis de compuestos, uso de reactores de cavitación para la aceleración de procesos químicos, degradación de compuestos orgánicos usando cavitación acústica e irradiaciones UV, síntesis de biodiesel usando cavitación y desarrollo de un reactor

híbrido basado en cavitación y ozonación (Ozonix®) [11]. Este último combina cavitación acústica e hidrodinámica, el uso de ozono y el proceso Fenton, el cual está basado en la generación de radicales hidroxilos altamente reactivos ( $\text{OH}^\cdot$ ) generados al agregar peróxido de hidrogeno ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) y iones ferrosos ( $\text{Fe}^{2+}$ ).

#### **ii). Rashmi Chand**

Él y su equipo de la Universidad de Albertay han trabajado en conjunto con Parag R. Gogate en trabajos para limpiar el agua usando ozono y un reactor de cavitación hidrodinámica. También trabaja en la intensificación de la capacidad de oxidación utilizando aditivos en los reactores de cavitación hidrodinámico y acústico y degradación de fenol de aguas residuales. Para esto utiliza reactores ultrasónicos de 20, 300 y 520 kHz combinados con peróxido de hidrógeno, ozono y hierro y cobre de valencia cero (ZVI y ZVC) [12].

#### **iii). Kenneth S. Suslick**

Kenneth Suslick y su equipo de la Universidad de Illinois investigan la síntesis de nanomateriales con ayuda de ultrasonido y los efectos químicos de la sonoluminiscencia y la sonoquímica de líquidos sometidos a ultrasonido, usando termometría espectroscópica para sondear las condiciones durante la cavitación. Esto lo realiza en aceites de silicona, alcanos o ácidos concentrados con gases nobles o átomos de diversos metales. Suslick y su equipo fueron los primeros en medir la temperatura y presión durante la cavitación acústica realizando análisis espectroscópico en hidrocarburos y carbonilos metálicos [13].

#### **iv). Mohan M. Gore**

Utiliza un reactor de cavitación hidrodinámica para degradar el reactivo naranja 4. El reactor consiste principalmente de un tanque de 15 litros, una bomba de desplazamiento positivo, una válvula para regular el flujo y un tubo Venturi al cual se le inyecta ozono para acelerar el proceso, además de usar peróxido de hidrogeno. El reactor alcanza flujos volumétricos de 6 a 9 L/min y números de cavitación ( $\sigma$ ) de 0.2 a 0.095 [14].

#### **v). Yongchun Huang**

Utiliza un reactor de cavitación hidrodinámica para reducir el tamaño molecular del quitosano (un copolímero con una gran cantidad de aplicaciones comerciales y biomédicas). El reactor es similar al de Gore, pero usa una bomba centrifuga y placas perforadas intercambiables. Estudian la degradación del quitosano variando el pH de la solución de 3.6 a 5.2 y cambiando la geometría de las placas perforadas [15].

#### **vi). Ecosphere Technologies Inc.**

Esta empresa cuenta con dos tecnologías; Ozonix® y Ecos PowerCube®. Ozonix® es un sistema patentado de tratamiento de agua, el cual satura el agua contaminada con ozono mediante cavitación hidrodinámica, cavitación acústica y oxidación electroquímica para oxidar y destruir

microorganismos, generando subproductos de la desinfección no perjudiciales. Tiene aplicaciones en la industria, agricultura, minería, procesamiento de alimentos, bebidas y el agua potable. [16]

#### **vii). Arisdyne Systems, Inc.**

Se especializa en el diseño de pequeños dispositivos que utiliza cavitación hidrodinámica. Controlan localización, tamaño, densidad e intensidad de la implosión, y a esto lo denominan flujo cavitante controlado (CFC™ por sus siglas en inglés). Los dispositivos y procesos que utilizan están patentados desde 1996. La relación de la velocidad del flujo en cada una de las secciones a la velocidad en la salida del canal es de 2.1 con un número de cavitación máximo de 0.5 [17]. Aunque principalmente funciona como intensificador de reacciones químicas y mezclador, sus aplicaciones son:

1. Biodiesel. Al tratar la materia prima con CFC aumenta la velocidad de la reacción y la eficiencia del catalizador, reduciendo la cantidad de catalizador requerido hasta en un 25%. Además, reduce la cantidad de monoglicéridos al final del proceso.
2. Digestión Anaerobia/Biogás. Se usa en un digestor anaeróbico de una planta de tratamiento de aguas residuales para obtener biogás. El CFC rompe los lodos destruyendo aglomerados, estructuras celulares e incluso las paredes de las células y por lo tanto aumenta la digestibilidad de la biomasa en la fermentación anaeróbica. Incrementa la producción de gas metano hasta en un 30%, reduce los lodos residuales hasta en un 25% y la cantidad de agua en estos hasta en un 10%.
3. Etanol. La materia prima en la producción de etanol se reduce a partículas de manera mecánica, y después se mezcla con agua. Esta mezcla se hace pasar por CFC lo que descompone las partículas de maíz liberando moléculas de almidón atrapadas en la estructura celular. Esto incrementa la producción de etanol del 3 al 5% [18].

#### **viii). Cavitation Technologies, Inc.**

Se dedican al procesamiento de líquidos, mezclas de fluidos, emulsiones y sólidos en suspensión. CTi diseña y fabrica dispositivos y sistemas hidrodinámicos de flujo continuo basados en la cavitación. La compañía desarrolla tecnologías de procesamiento de alto rendimiento para uso en la refinación de aceite comestible, la extracción de aceite de algas para la producción de combustible renovable, mejoras en bebidas alcohólicas, tratamiento de agua y “mejoramiento” del petróleo para su transporte [19]. En la mayoría de estas aplicaciones la cavitación sirve para acelerar reacciones químicas. En el caso de la limpieza de agua utilizan simultáneamente cavitación hidrodinámica, electrocoagulación y químicos activos para mejorar el proceso. Para los procesos en derivados del petróleo combinan su dispositivo patentado con solventes o tensoactivos, pulsos eléctricos, campos magnéticos y a irradiación sónica o UV [20]. Actualmente sus productos son utilizados en industrias de aceites vegetales y para purificación de suspensiones.

#### **ix). Dynaflo, Inc.**

Dynaflo Inc.® ofrece servicios y productos de investigación y desarrollo en la dinámica de fluidos y ciencias de los materiales. Se especializan en el campo de la dinámica de la interfaz gas-líquido, la dinámica de burbujas, la cavitación, la dinámica de la interacción fluidos-estructuras y dinámica de



la erosión. Ofrecen servicios y productos para las industrias automotrices, energía, química, medio ambiente, agricultura, la alimentación, navales y marinas. Tiene equipos para medir el tamaño de las burbujas y equipos para generar diversos tipos de burbujas. Además de diversos software para simular estos fluidos [21]. Utilizan la cavitación hidrodinámica para desinfección de agua, generada mediante sus boquillas patentadas DynaJets®, combinadas con resonadores acústicos StratoJet®. Para una presión de 2.1 bar alcanzan un número de cavitación de aproximadamente 0.5, y para una presión de 3.45 bar aproximadamente 0.33 [22].

#### **x). Hydro Dynamics, Inc.**

Se dedican a la manufactura del reactor hidrodinámico “ShockWave Power™ Reactor” (SPR) que ellos diseñaron y patentaron. Es una cámara con un rotor especial que al girar produce cavitación hidrodinámica en las cavidades del rotor, lo que mantiene el proceso controlado y evita la erosión. Debido a la configuración del SPR, no determinan el número de cavitación. Producen tres tipos de SPR; industrial, sanitario y para biodiesel, los que abarcan mercados de tecnologías alternas, procesamiento químico, alimentos y bebidas e industria del petróleo. Las aplicaciones para la industria del petróleo son [23]:

- Disminución de la concentración de sal orgánica de lodo de perforación.
- La producción de vapor de aguas residuales.
- Mezcla dinámica de productos petrolíferos.

#### **xi). Eimco Water Technologies**

Esta empresa fundada en el 2004 que se dedica a la separación de líquidos y sólidos y al tratamiento de aguas residuales, especializada en la sedimentación, tratamiento biológico, digestión y filtración final. Para la desintegración y reducción de lodos en aguas residuales usan un tratamiento con cavitación ultrasónica, lo cual ayuda al posterior tratamiento anaeróbico de las aguas residuales, lo que incrementa la velocidad de digestión, incrementa la producción de gas, disminuye el volumen de lodos que se manejan y se desechan [24].

#### **xii). VRTX Advanced fluid technology**

El sistema VRTX es una unidad de limpieza de agua para torres de enfriamiento. Consta de una bomba, una cámara VTRX patentada y un sistema de filtración automático y autolimpiante con capacidad para recircular grandes caudales de agua a bajos tamaños de poro. La cámara patentada del VTRX tiene un arreglo de reducciones del diámetro de tubería, que es donde se forman y crecen las burbujas para posteriormente hacerlas colisionar, lo que causa la implosión de estas. El sistema VRTX sistema lleva 15 años en el mercado y han elaborado estudios con los que comprueban su efectividad [25]. Sus principales ventajas son las siguientes:

- ✓ Erradica el crecimiento bacteriano y de algas (eliminado las biopelículas)
- ✓ Reduce la oxidación al mantener el pH cercano a la neutralidad, reducir la concentración de gases oxidantes disueltos, controlando y erradicando la actividad microbiana en continuo
- ✓ Reduce el contenido de sólidos en suspensión al formar compuestos oxidantes como el H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y al subir el pH.

- ✓ Elimina la formación de incrustaciones al elevar la energía lo que hace que la calcita cambie su estructura y se forme aragonito que puede ser evacuado por el agua corriente [26].

De los dispositivos anteriores, los más comunes se usan para limpieza de agua como en caso de *ii)*, *iii)*, *iv)*, *v)*, *vi)*, *viii)*, *ix)*, *xi)* y *xii)*. Sin embargo, además de cavitación utilizan sistemas auxiliares o sustancias que aceleran el proceso. Otros dispositivos comunes son para mejorar el proceso de generación de biodiesel como en los incisos *vii)*, *viii)* y *x)*, pero en este caso la cavitación sirve como aceleradora de las reacciones para ahorrar catalizador. Los demás dispositivos sirven para degradar sustancias, para lo cual combinan el uso de la cavitación con sustancias químicas que aceleran la degradación.

En el caso de los dispositivos para el mejoramiento de hidrocarburos, el dispositivo del inciso *x)* no tiene como propósito principal el disminuir la viscosidad del líquido; y en el caso del inciso *viii)*, se tiene el diseño propuesto, pero este aún no ha sido utilizado industrialmente.

Para diseñar un dispositivo que ayude a disminuir la viscosidad, aprovechando el fenómeno de la cavitación, es necesario determinar lo que ocurre con la viscosidad por efecto de dicho fenómeno. Para lograr esto, se utiliza el circuito hidráulico generador de cavitación del Laboratorio de Pruebas no Destructivas del Instituto de Ingeniería. Además de implementar otro método para generar cavitación, que será con un generador ultrasónico. Ambos dispositivos se describirán en el **Capítulo 3**.

## 1.2 Objetivos

### Objetivo general

- Estudiar el efecto de la cavitación tanto acústica como hidrodinámica sobre la viscosidad que presenta el 1,2-Propanodiol.

### Objetivos particulares

- Revisar la literatura publicada del tema abarcando tanto artículos como patentes.
- Conocer el circuito hidráulico y el equipo de laboratorio disponible que se requiera para realizar las pruebas apropiadas.
- Hacer las adecuaciones necesarias al circuito que nos ayuden a alcanzar el objetivo.
- Caracterizar las propiedades reológicas del líquido viscoso antes de las pruebas, mediante espectroscopia infrarroja y viscosimetría
- Implementar los sistemas y desarrollar las pruebas experimentales para comprobar la disminución de la viscosidad en el líquido viscoso.
- Determinar la curva viscosidad-temperatura ajustada con la ecuación de Arrhenius y el espectro infrarrojo del líquido antes y después del tratamiento para visualizar y verificar el cambio en la viscosidad.
- Corroborar con los espectros infrarrojos si hay cambio molecular del líquido antes y después del tratamiento
- Determinar la viabilidad del circuito hidráulico para disminuir la viscosidad en líquidos con alto peso molecular

## Capítulo 2

### Principios básicos

#### 2.1 Cavitación

Es un fenómeno dinámico de formación (homogénea o no homogénea), crecimiento y colapso de cavidades o burbujas en un líquido como resultado de una alta concentración de energía dentro de un fluido. La generación y desarrollo de la cavitación son funciones de las propiedades del líquido, la presencia de contaminantes en el mismo, la presión y temperatura ambiente, entre otras. Para comprender mejor el fenómeno, a continuación se describen algunos conceptos:

#### Vaporización

La vaporización de un líquido es el cambio de fase que lo convierte en vapor. Esta transformación ocurre agregando calor (ebullición), o disminuyendo la presión, como es el caso de la cavitación. Esto se aprecia en el diagrama de fase P-T de la **Figura 1**.

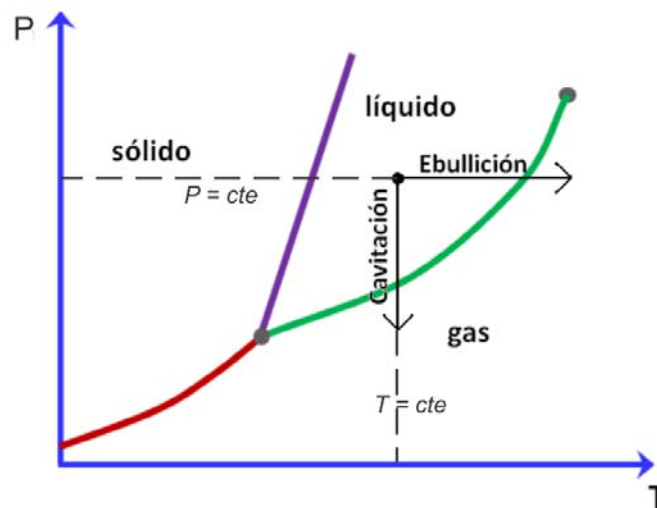


Figura 1. Modos de vaporizar un líquido en diagrama P-T

Ambas transformaciones requieren el calor latente para el cambio de fase. Para el caso de la ebullición el calor es dado por los alrededores, y la masa de vapor se calcula por la ecuación  $m=Q/L$ , donde  $m$  es la masa,  $Q$  el calor suministrado y  $L$  el calor latente de evaporización del líquido. Para el caso de la cavitación la transformación es globalmente adiabática, para que se produzca vapor el líquido se debe suministrar el calor de vaporización, por lo tanto se debe enfriar. Esto se ve esquemáticamente en el diagrama  $P$ - $V$  de la **Figura 2**, donde el proceso de cavitación pasa de una isoterma a otra [10].

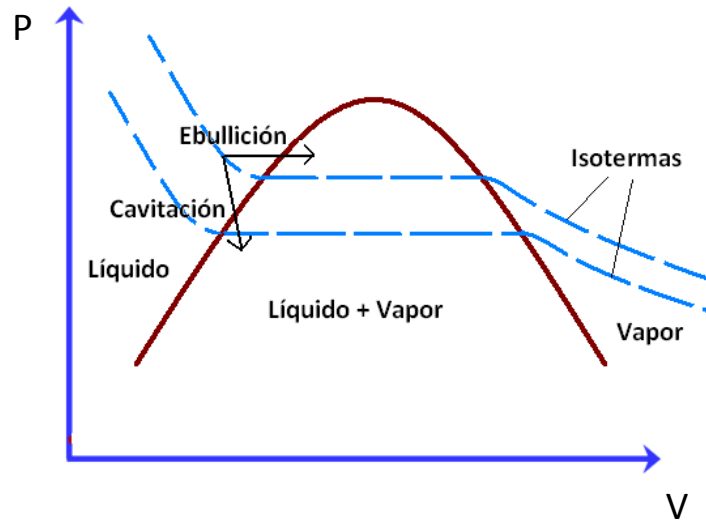


Figura 2. Modos de vaporizar un líquido en diagrama P-V

### Contaminantes

Para que la cavitación ocurra, además de la vaporización se requiere la presencia de una superficie o contaminante que propicie la formación de burbujas. La formación inicial de vapor (generación de cavitación) es complicada porque un líquido puro soporta presiones mucho menores que la presión de saturación sin evaporarse. Esto se debe a la fuerza de cohesión de las moléculas del líquido. Las fuerzas de cohesión entre moléculas del líquido son más grandes que las fuerzas de adhesión entre dichas moléculas y otros materiales. Esto implica que en circunstancias normales un líquido puro no cavita. Pero hay que tener en mente que es difícil tener un líquido puro, los contaminantes son inevitables. En la práctica, el principal mecanismo para la generación de la cavitación son microburbujas que contienen aire u otro gas y vapor, y se encuentran disueltas en el líquido o atrapadas en fisuras de partículas sólidas suspendidas [27].

La cavitación se genera de diferentes formas:

#### ► Por tensión del líquido:

Esta se produce cuando se reduce la presión en el líquido lo que produce la difusión de los gases disueltos y si esta presión disminuye por debajo de la presión de vapor saturado provoca que el líquido se evapore. Esto se logra de varias maneras a saber:

- Aplicando ondas acústicas. El medio líquido se somete a ondas ultrasónicas para producir un comportamiento no lineal. A alta magnitud [W] y frecuencia de la onda [Hz] se produce la formación, crecimiento e implosión de cavidades.
- Aplicando cambios geométricos. Se produce cuando un líquido fluye a alta velocidad y por cambio de geometría provoca que aumente la velocidad y por lo tanto disminuya la presión.

► *Por depósito local de energía:*

- Cavitación óptica. Ruptura del líquido por alta densidad de fotones (láser enfocado en el interior del líquido) [28].
- Cavitación por partículas. Bombardeo de partículas elementales enfocadas en el interior del líquido.
- Cavitación inducida por chispa. Una descarga eléctrica en el interior del fluido ocasiona que el dieléctrico entre los electrodos se rompa y genere la burbuja [29].

Existen cuatro formas de inducir el crecimiento de las burbujas [30].

1. Desgasificación. Es causada por difusión de gases disueltos o expansión del gas contenido en la burbuja por un aumento de temperatura o disminución de la presión.
2. Cavitación gaseosa. Es causada por difusión de gases disueltos o expansión del gas contenido en el fluido por la disminución dinámica de la presión.
3. Ebullición. Es resultado de la vaporización por incremento de la temperatura en burbujas llenas de vapor.
4. Cavitación vaporosa. Se presenta por la disminución dinámica de la presión en burbujas llenas de vapor.

En este trabajo nos enfocaremos tanto en la cavitación hidrodinámica como en la cavitación acústica, las cuales se describen a detalle en la siguiente sección.

## 2.2 Cavitación hidrodinámica

La cavitación hidrodinámica es un proceso de generación, crecimiento e implosión de burbujas en un líquido que fluye debido a la disminución y posterior aumento de la presión. Esto ocurre cuando en un líquido que fluye se disminuye el área transversal del flujo, lo que provoca que la velocidad aumente. Este incremento de la velocidad a su vez produce una disminución en la presión. Si esta presión llega a estar por debajo de la presión de saturación, el líquido comenzará a evaporarse y se formarán burbujas. El colapso se genera con el subsecuente incremento de la presión. 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 emisión de chorros de líquido ("jets") ~400 km/h [31].

Bajo este contexto, la cavitación hidrodinámica ocurre en perfiles hidrodinámicos, hélices, rodillos giratorios, bombas, accesorios de tuberías (válvulas, codos, uniones, instrumentos de medición, sellos) y reducciones de diámetro como placas perforadas o tubos Venturi. El proceso general se visualiza en la **Figura 3** [32].

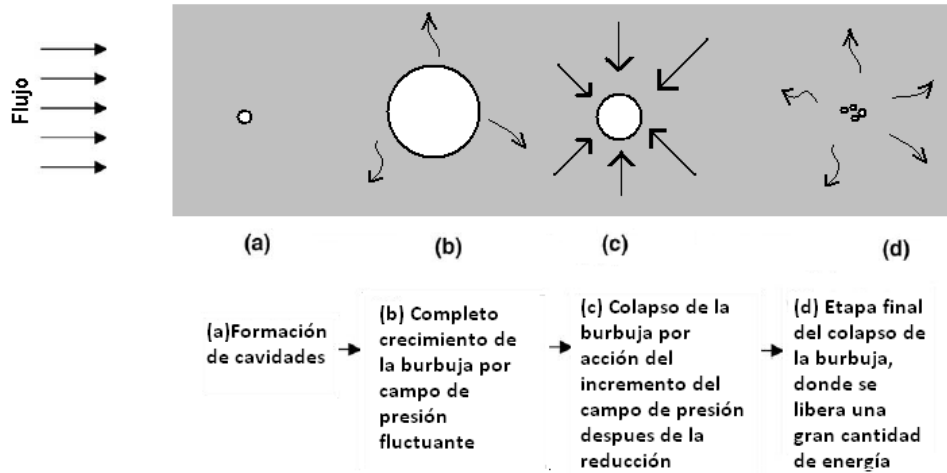


Figura 3. Representación esquemática de las diferentes etapas de la cavitación

Los dispositivos geométricos que se emplean comúnmente para obtener cavitación por cambios geométricos son placas de orificio, tubos Venturi, toberas, etc. El tubo Venturi se considera por tener más ventajas sobre otros sistemas [33].

En la **Figura 4** se muestra la variación de la presión a lo largo de un tubo Venturi y las situaciones en donde la variación de esta presión produce cavitación.

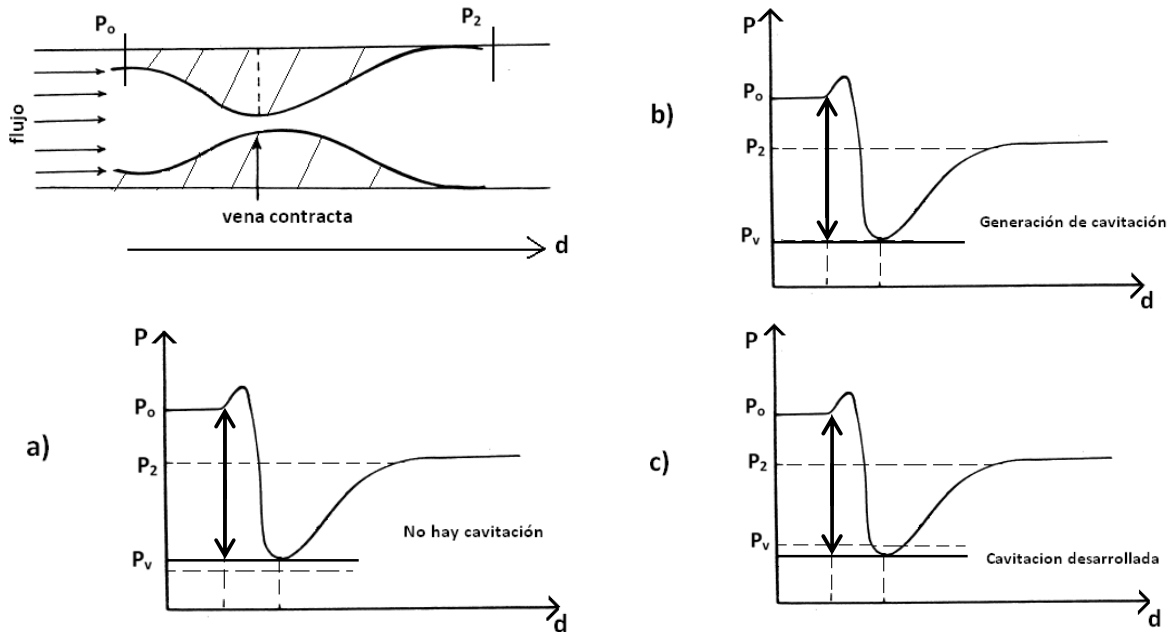


Figura 4. Variación de la presión en tubo Venturi y situaciones en que se produce cavitación

El flujo en el Venturi viene con una presión inicial  $P_0$ , cuando llega al punto de mínimo diámetro, llamado vena contracta o garganta, en donde se alcanza la presión mínima. En el caso de **a)** esta

presión no disminuye por debajo de la presión de vapor saturado  $P_v$  y no se produce la cavitación. En el caso de **b)** se llega a  $P_v$  y comienza la generación de burbujas. Y cuando la presión llega a ser menor que  $P_v$  como se aprecia en **c)**, se dice que se logra una cavitación desarrollada [10].

Considerando a  $P_o$  y  $V_o$  como la presión y velocidad del líquido en el punto antes de la garganta y  $P_g$  y  $V_g$  como la presión y velocidad en la garganta y  $\rho$  como la densidad del líquido; aplicando la ecuación de Bernoulli antes de la reducción y en la garganta tenemos:

$$P_o + \frac{1}{2} \rho V_o^2 = P_g + \frac{1}{2} \rho V_g^2 \quad (2.1)$$

Reacomodando términos:

$$P_g = P_o + \frac{1}{2} \rho (V_o^2 - V_g^2) \quad (2.2)$$

Como la velocidad  $V_g$  es mayor que  $V_o$  debido a la disminución del diámetro, entonces la presión  $P_g$  es menor que  $P_o$ . Como habíamos mencionado, cuando  $P_g$  es menor que la presión de vapor saturado  $P_v$  se produce la cavitación. Existe un parámetro adimensional llamado número de cavitación  $\sigma$  que nos mide la resistencia del flujo a cavitarse en forma vaporosa. El número de cavitación está definido como [32]:

$$\sigma = \frac{P_o - P_v}{\frac{1}{2} \rho V_g^2} \quad (2.3)$$

Dónde:

$P_o$  = Presión antes de la reducción

$P_v$  = Presión de vaporización del fluido

$\frac{1}{2} \rho V_g^2$  = Presión dinámica en la garganta

Cuanto mayor sea el número de cavitación menos probable es que ocurra y viceversa.

## 2.3 Cavitación acústica

En este tipo de cavitación, la formación y el colapso de cavidades o burbujas es causada por una onda de presión de alta amplitud y alta frecuencia (ultrasónicas) que son transmitidos al interior de un líquido. Esta onda de presión son generadas por actuadores inmersos o no en el líquido que vibra normal a su cara y generan ondas de presión en el líquido. En la **Figura 5** se muestra una representación del proceso de cavitación acústica [33]. Cuando se generan las ondas de presión,



aparecen zonas de compresión donde se produce un efecto de incremento en la presión, y zonas de expansión; donde se produce el descenso de la presión.

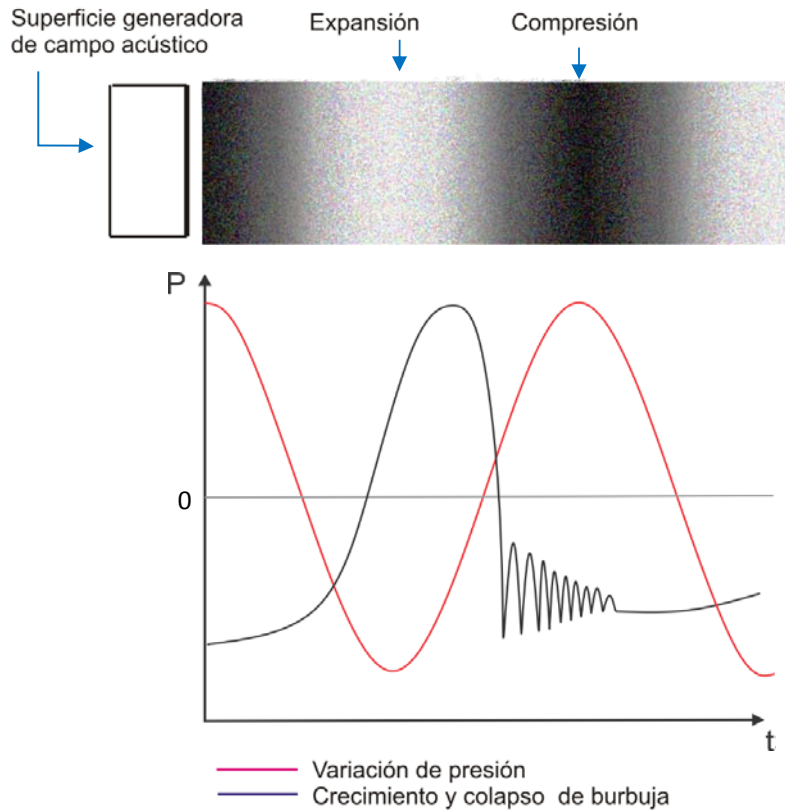


Figura 5. Representación del campo acústico para generar cavitación

La cavitación acústica ocurre en líquidos en reposo, aunque a veces ocurre acompañada de un flujo continuo, pero tan lento que un mismo elemento del líquido es expuesto a varios ciclos de cavitación (en un periodo de tiempo del orden de milisegundos) [30].

## 2.4 Viscosidad

Es la resistencia que ejercen los fluidos al ser deformados cuando se les aplica un mínimo de esfuerzo. Existen diferentes formas de expresar la viscosidad de un fluido pero la más importante es la viscosidad absoluta o dinámica. Para un flujo simple, la viscosidad  $\mu$  del fluido se relaciona de la siguiente manera:

$$\tau = \mu \frac{dv}{dy} \quad (2.4)$$

Donde  $\tau$  es el esfuerzo cortante y  $v$  es la velocidad en dirección  $x$  y  $dv/dy$  la velocidad de deformación. Esto se ilustra considerando un fluido dentro del pequeño espacio entre dos cilindros concéntricos (**Figura 6**).

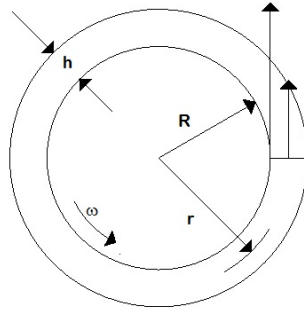


Figura 6. Fluido entre cilindros con una separación pequeña

Se requiere un momento de torsión para girar el cilindro interior con velocidad constante mientras el cilindro exterior permanece estacionario. Esta resistencia a la rotación del cilindro se debe a la viscosidad. El único esfuerzo que resiste el momento de torsión aplicado en el caso de flujo simple es un esfuerzo cortante, que depende directamente de  $dv/dr$ ; es decir,

$$\tau = \mu \left| \frac{dv}{dr} \right| \quad (2.5)$$

donde  $dv/dr$  es el gradiente de velocidad y  $v$  es la componente tangencial de la velocidad que solo depende de  $r$ . Si el espacio entre los cilindros es pequeño, este gradiente se aproxima suponiendo una distribución de velocidad lineal en el espacio. Así,

$$\left| \frac{dv}{dr} \right| = \frac{\omega R}{h} \quad (2.6)$$

Donde  $h$  es el ancho del espacio entre cilindros. De este modo se relaciona el momento de torsión  $T$  con la viscosidad y otros parámetros empleando la ecuación

$$T = \tau \cdot 2\pi RL \cdot R \quad (2.7)$$

$$T = \mu \frac{\omega R}{h} \cdot 2\pi RL \cdot R = \frac{2\pi R^3 \omega L \mu}{h} \quad (2.8)$$

$T = \text{esfuerzo} \cdot \text{área} \cdot \text{brazo de momento}$

Donde se desprecia el esfuerzo cortante que actúa sobre los extremos del cilindro y  $L$  representa la longitud del cilindro giratorio. Como el momento de torsión depende directamente de la viscosidad, estos cilindros se usan como viscosímetro.

La viscosidad depende mucho de la temperatura en los líquidos en los que las fuerzas de cohesión desempeñan un papel dominante. En muchos casos, esta relación se aproxima a con la siguiente ecuación conocida como **ecuación de Arrhenius** [34]:

$$\mu = \eta_0 e^{-E/RT} \quad (2.9)$$

Donde  $T$  es la temperatura [K],  $\eta_0$  es la constante pre-exponencial [mPa·s],  $R$  es la constante ideal de los gases [J/(mol·K)] y  $E$  es la energía de activación [J/mol].  $\eta_0$  y  $E$  se determinan a partir de mediciones.

## 2.5 Tubo Venturi y análisis dinámico

### Tubo Venturi

Giovanni Battista Venturi nació en Bibiano, Italia en 1746. Fue ordenado como sacerdote en 1769 y pasó a ser profesor de lógica en el Seminario de Reggio Emilia. Cinco años después, fue profesor de geometría y filosofía y posteriormente de física experimental en la Universidad de Módena. Después se convirtió en Secretario de la Legación y fue enviado a Paris donde mejoró sus conocimientos de física y química. Observando el flujo de agua en un sistema de riego, comenzó a visualizar un modelo para calcular el flujo volumétrico de agua a través de un tubo [35]. Venturi publicó varios tratados, como "Las investigaciones experimentales sobre el principio de la comunicación lateral del movimiento en fluidos aplicado a los diferentes fenómenos hidráulicos", en donde propone lo que ahora conocemos como *efecto Venturi* y en donde describe los experimentos realizados paso a paso, sus proposiciones y teorías en relación al flujo del agua. A través de su investigación, Venturi señaló que si el diámetro del tubo se reduce, los líquidos tienden a acelerar a medida que avanzan hacia la reducción y desacelerar una vez que pasan al otro lado. Este principio es consistente con el de Bernoulli, que establece que la energía total dentro de un sistema permanece constante y como la energía cinética (velocidad de flujo) aumenta, la energía potencial (presión) disminuye. El tubo de Venturi consiste de tres secciones: la sección de entrada, la garganta y la sección de salida. La entrada tiene un diámetro inicial igual al de la tubería y un cono convergente que termina con un diámetro igual al de la garganta que lo une con la salida; que consta de un cono divergente que concluye con el diámetro de la tubería. Sin embargo fue hasta 1886 cuando Clemens Herschel, un ingeniero hidráulico, llevó a cabo pruebas experimentales para usar el tubo Venturi como medidor de flujo, para evitar una pérdida excesiva de carga en las mediciones [36].

Los medidores volumétricos determinan el caudal en volumen de fluido, bien sea directamente (desplazamiento) o indirectamente (presión diferencial, área variable, velocidad, fuerza, tensión inducida, torbellino).

La medición del caudal con estos instrumentos se basa en la aplicación de la conservación de la energía a un flujo, tomando la diferencia de presión existente entre dos puntos, en donde el flujo posee diferentes velocidades. Este cambio de velocidad se produce por una reducción de área (placa orificio, tobera de flujo, tubo de Venturi, Tubo de Dall, Cuña de flujo) o por una disminución de la velocidad hasta cero (tubo de Pitot, el tubo Annubar). La ecuación que gobierna el uso de estos aparatos será la ecuación de Bernoulli en caso de flujos incompresibles (líquidos) o la primera ley de la termodinámica en flujos compresibles (gases) [37].

Cualquier sistema de medición de presión diferencial está constituido por dos partes: la primera es la parte del sistema que está en contacto directo con el líquido y tiene algún tipo de interacción con el flujo; la segunda parte son los dispositivos para medir la presión y se localizan fuera de la tubería. En el caso del tubo Venturi, al comienzo del cono de entrada se conecta la toma de alta presión y la toma de baja presión se coloca en la garganta del tubo. Esta medición se realiza por medio de tubos U, manómetros o de forma piezométrica [38].

El uso de tubos Venturi, y los demás medidores por presión diferencial se encuentran normalizados por la norma ISO 5167-1:2003. Esta define los términos y símbolos y establece los principios generales para los métodos de medición y cálculo del flujo de un fluido a través de un conducto. También especifica los requisitos generales para los métodos de medición, la instalación y la determinación del error en la medición de caudal. Define los límites generales de tamaño de la tubería y el número de Reynolds en que estos dispositivos de presión diferencial serán utilizados. Sólo es aplicable a flujo subsónico y donde el fluido se considera como una sola fase. No es aplicable a la medición de flujo pulsante [39].

El uso del tubo Venturi para generar cavitación se debe a que se alcanza velocidades más altas que otros dispositivos, sufren menor desgaste en comparación de otros dispositivos, causa una baja pérdida de carga y maneja flujos que traen consigo gran cantidad de sólidos en suspensión que no sean abrasivos.

En esta sección se realiza el análisis dinámico del tubo Venturi. Para esto se toma una sección del tubo Venturi como superficie de control y se usan las ecuaciones de conservación de la masa y de conservación de la energía en forma diferencial para determinar las propiedades del flujo.

### **Volumen de control**

En la **Figura 7** se observa la sección transversal del tubo Venturi que se utiliza como superficie de control (S.C.).

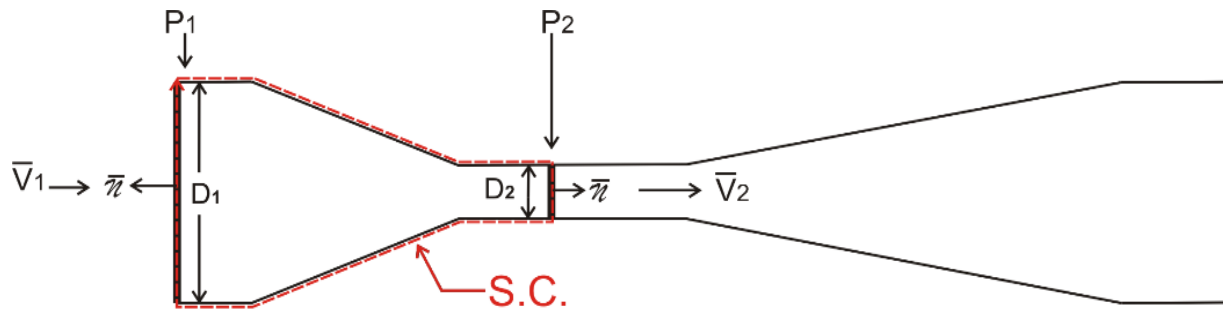


Figura 7. Superficie de control (S. C.) en sección transversal del Tubo Venturi

Se tiene una entrada de diámetro del área transversal conocido  $D_1$  con una velocidad promedio  $\bar{V}_1$  que tiene un vector normal a la superficie en dirección contraria a  $\bar{V}_1$  y una presión  $P_1$ ; una salida con diámetro del área transversal conocido  $D_2$  con una velocidad promedio  $\bar{V}_2$  que tiene un vector normal a la superficie en la dirección de  $\bar{V}_2$  y una presión  $P_2$ . A continuación se presentan las ecuaciones de conservación de masa y energía para el volumen de control.

### Ecuaciones fundamentales

*Ecuación de conservación de la masa*

Para un sistema donde la masa permanece fija se tiene en forma diferencial:

$$\frac{dm_{sist}}{dt} = \frac{D}{Dt} \int_{sist} \rho dV \quad (2.10)$$

Aplicada a nuestro volumen de control

$$0 = \frac{d}{dt} \int_{vc} \rho dV + \int_{sc} \rho \hat{n} \cdot \nabla dA \quad (2.11)$$

Suponiendo un flujo uniforme, como tenemos una entrada y una salida de flujo normal a la superficie de control entonces:  $\hat{n} \cdot \nabla_1 = -V_1$  y  $\hat{n} \cdot \nabla_2 = V_2$

$$0 = \int_{vc} \frac{d\rho}{dt} dV - \rho \int_{A_1} V_1 dA_1 + \rho \int_{A_2} V_2 dA_2 \quad (2.12)$$

Considerando un flujo incompresible, el volumen permanece constante y la densidad no cambia con el tiempo  $\frac{d\rho}{dt} = 0$

$$\rho \int_{A_1} V_1 dA = \rho \int_{A_2} V_2 dA \quad (2.13)$$

Como el perfil de velocidades no es uniforme, se usan las velocidades promedio  $\bar{V}_1$  y  $\bar{V}_2$ , resolviendo la integral tenemos

$$\bar{V}_1 A_1 = \bar{V}_2 A_2 \quad (2.14)$$

El flujo volumétrico se define como:

$$Q = \int_A V_n dA \quad (2.15)$$

Resolviendo la integral en término de la velocidad promedio tenemos

$$Q = \bar{V} A \quad (2.16)$$

Donde:

$v_c$  = Volumen de control

$s_c$  = Superficie de control

$\mathcal{V}$  = Volumen

$\mathbb{V}$  = Vector velocidad

$\hat{n}$  = Vector normal a la superficie

$V_n$  = Componente normal de la velocidad

#### *Ecuación de conservación de la energía*

La ecuación de conservación de la energía se define como:

$$\dot{Q} - \dot{W} = \frac{D}{Dt} \int_{sist} e \rho d\mathcal{V} \quad (2.17)$$

Donde:

$\dot{Q}$  = Transferencia de energía a través de la superficie

$e$  = Energía específica total del volumen de control

$\dot{W}$  = Trabajo total del sistema

Y como

$$e = \frac{1}{2} v^2 + gz + \hat{u} \quad (2.18)$$

Se tiene para nuestro volumen de control:

$$\dot{Q} - \dot{W}_s - \dot{W}_{corte} = \frac{d}{dt} \int_{vc} e \rho dV + \int_{sc} \left( e + \frac{p}{\rho} \right) \rho \hat{n} \cdot \nabla dA \quad (2.19)$$

Considerando un régimen permanente en el volumen de control ( $\frac{\delta}{\delta t} = 0$ ) y considerando que no hay intercambio de calor por el área de la superficie de control y despreciando  $\dot{W}_{corte}$  se tiene:

$$-\dot{W}_s = \int_{sc} \left( e + \frac{p}{\rho} \right) \rho \hat{n} \cdot \nabla dA \quad (2.20)$$

Suponiendo un flujo uniforme y como tenemos una entrada y una salida, en término de la velocidad promedio:

$$-\dot{W}_s = \rho_2 \bar{V}_2 A_2 \left( \frac{V_2^2}{2} + \frac{p_2}{\rho_2} + g z_2 + \hat{u}_2 \right) - \rho_1 \bar{V}_1 A_1 \left( \frac{V_1^2}{2} + \frac{p_1}{\rho_1} + g z_1 + \hat{u}_1 \right) \quad (2.21)$$

Y como  $\rho_1 = \rho_2$  y  $\dot{m} = \rho \bar{V} A$ , dividiendo toda la ecuación entre  $\dot{m}g$  se tiene:

$$-\frac{\dot{W}_s}{\dot{m}g} = \frac{V_2^2}{2} + \frac{p_2}{\rho g} + z_2 + \frac{\hat{u}_2}{g} - \left( \frac{V_1^2}{2} + \frac{p_1}{\rho g} + z_1 + \frac{\hat{u}_1}{g} \right) \quad (2.22)$$

Reacomodando términos y despreciando la diferencia de alturas, las pérdidas y al no haber trabajo de flecha la ecuación queda:

$$p_1 - p_2 = \frac{1}{2} \rho V_2^2 - \frac{1}{2} \rho V_1^2 \quad (2.23)$$

Las ecuaciones 2.14, 2.16 y 2.23 son tomadas para calcular el número de cavitación  $\sigma$ .

$$\sigma = \frac{P_o - P_v}{\frac{1}{2} \rho V_v^2} \quad (2.3)$$

$P_o$  = Presión antes de la reducción

$P_v$  = Presión de vaporización del fluido

$\frac{1}{2} \rho v_v^2$  = Presión dinámica en la vena contracta

## Capítulo 3

### Dispositivos experimentales para generar cavitación

Se realiza una descripción de los sistemas implementados para generar cavitación en los líquidos viscosos y someter a estos a ciclos de trabajo experimental. Primero se describe el circuito hidráulico del Laboratorio de Pruebas no Destructivas del Instituto de Ingeniería que fue diseñado para generar cavitación hidrodinámica. Se describen los dispositivos, equipo y los sistemas que lo componen. Se explica de forma general su funcionamiento, ajustes y se anexan planos del sistema. Posteriormente, se describe el sistema para generar cavitación acústica, los dispositivos, materiales y equipo que componen este arreglo experimental y se anexa un esquema del sistema.

#### 3.1 Circuito hidráulico

Este sistema fue diseñado para la reproducción de la cavitación hidrodinámica en el Laboratorio de Pruebas no Destructivas del Instituto de Ingeniería y ha sido usado en trabajos previos [31]. Se realizaron adecuaciones al sistema para alcanzar los objetivos. El sistema consta principalmente de: a) bomba centrífuga con el impulsor modificado, b) tubo Venturi, c) válvula de regulación de gasto, d) tinaco de almacenamiento, e) sistema de enfriamiento y f) tinaco de almacenamiento auxiliar. El circuito se interconecta con tubos de PVC de 2" (cédula 40 y 80), accesorios para conectar la tubería y válvulas el control en la dirección del flujo del líquido. El sistema completo se esquematiza en la **Figura 8**.

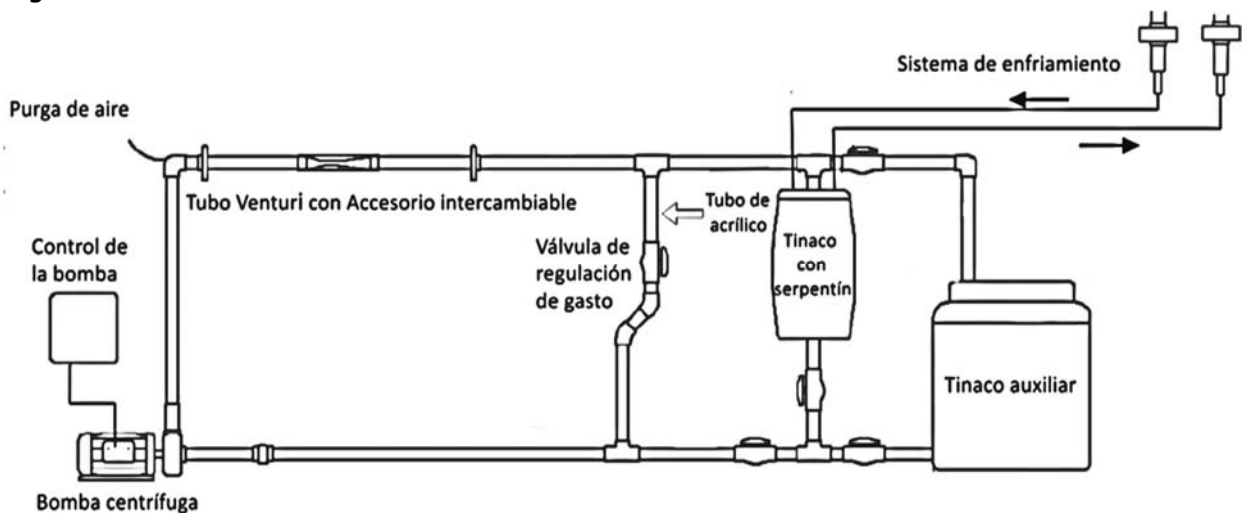


Figura 8. Diagrama del circuito hidráulico para generar cavitación hidrodinámica

Una descripción de cada componente se incluye a continuación.



## Componentes del circuito hidráulico:

### a) Bomba centrífuga

Consta de un motor trifásico de 5 HP (3.73 kW) controlado por un convertidor de frecuencias marca Yaskawa. El controlador tiene una perilla que fija manualmente el porcentaje de velocidad de la bomba. Las especificaciones del convertidor de frecuencia y del motor se despliegan en la **Tabla 2** y **3** respectivamente.



Tabla 2. Especificaciones del Convertidor de frecuencias Yaskawa

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



Tabla 3. Especificaciones del motor de la bomba Siemens JM10

Especificación	Valor
Potencia	5 HP (3.73 kW)
Frecuencia	60 Hz
Voltaje	208-230/460 V
Corriente	13.5-12.5 A/6.2 A
Número de polos	3 polos

El impulsor de la bomba se ha modificado para producir burbujas. La modificación consistió en disminuir el área de salida del mismo, usando una abrazadera de acero inoxidable con las aperturas u orificios a todo lo largo de ésta. Para fijar la abrazadera al impulsor se utilizó pegamento époxico de alta resistencia, ver **Figura 9**.



Figura 9. Imagen del impulsor de la bomba modificado

**b) Tubo Venturi con accesorio intercambiable**

El accesorio se diseñó para montar e intercambiar fácilmente el tubo Venturi; es un arreglo que consta de un tubo Venturi que se une a dos tubos de PVC cedula 80 de 2 1/2" de diámetro en cada extremo y estos a su vez a dos tuercas unión, ver **Figura 10**.

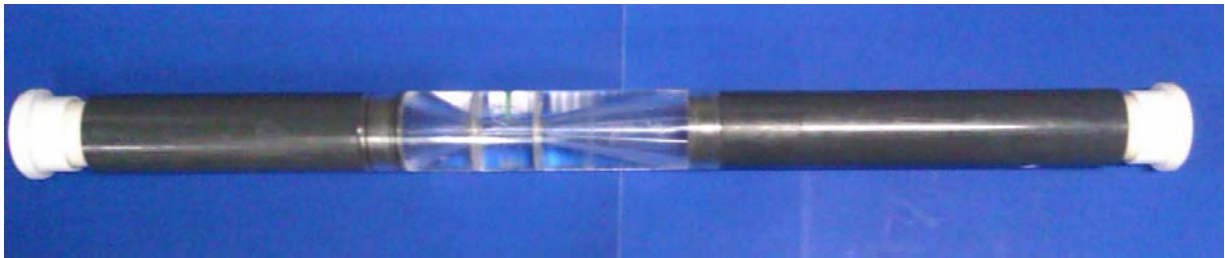


Figura 10. Tubo Venturi con accesorio intercambiable

El tubo Venturi consiste de tres piezas acopladas que se representaban en el siguiente plano (**Figura 11**).

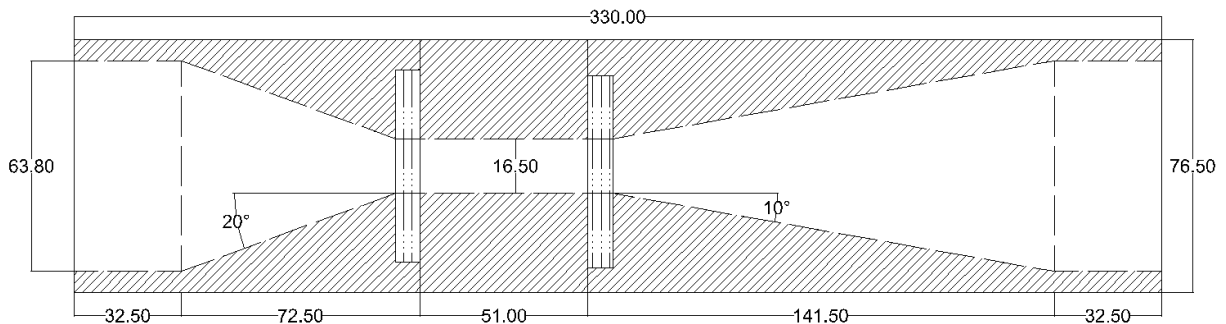


Figura 11. Diagrama del ensamble de tubo Venturi (acotaciones mm)

Para su manufactura se usaron placas de acrílico de 1/2" de espesor de 80x8 cm, material elegido por su propiedad de ser translúcido, permitiendo observar lo que ocurre en el líquido. Se maquinaron cilindros de la placa, posteriormente se unieron con un adhesivo. Después se vuelven a maquinar para formar las tres piezas que posteriormente forman al tubo Venturi. Estas tres piezas son ensambladas mediante aros sellos "o-rings" a la tubería de PVC como se aprecia en la **Figura 12**.

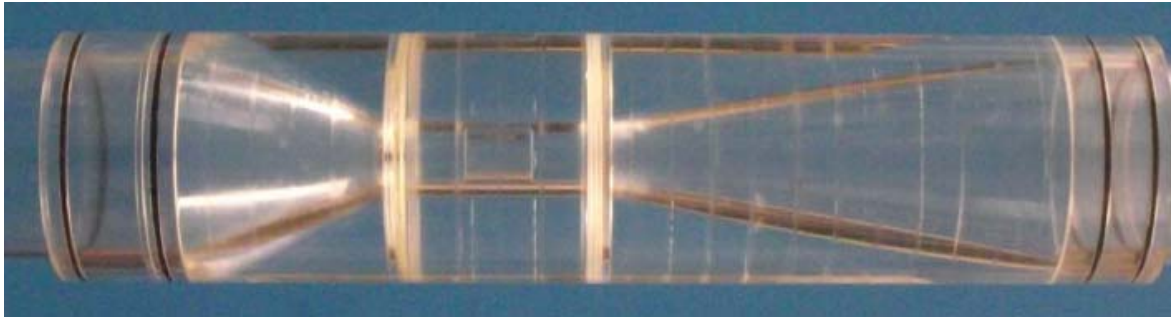


Figura 12. Fotografía del tubo Venturi ensamblado

Además, tiene adaptado un sistema que garantiza la inmovilidad del tubo Venturi con los tubos de PVC. El sistema consta de dos bridas de PVC cédula 80 de dos pulgadas, colocadas a los extremos del accesorio del tubo Venturi, cuatro espárragos de 3/8" por 120 cm de longitud, tuercas y rondanas de 3/8", como se ilustra en la **Figura 13**.

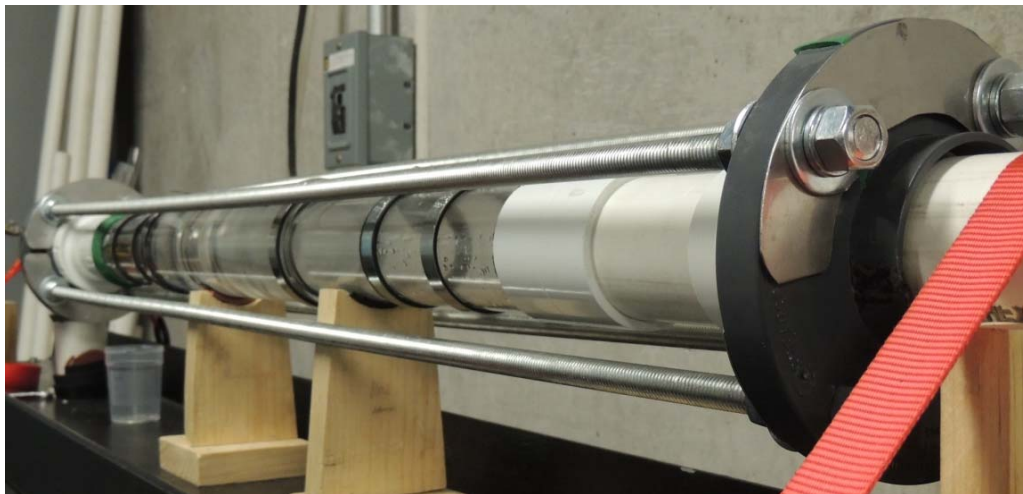


Figura 13. Vista del montaje del tubo Venturi donde se observa la estructura de sujeción

### c) Válvula de regulación de gasto

El sistema "by-pass" consta de un circuito de recirculación en paralelo que dirige el líquido de impulsión de la bomba a su aspiración. Mediante la apertura y cierre de la válvula se regula la proporción de caudal recirculado e impulsado al sistema como resultado la bomba aumenta su caudal y reduce la altura de operación. Esta parte se unió al circuito con uniones T, consta de un tubo de acrílico, una válvula de bola de PVC, dos uniones a 45° y tubos de PVC célula 40, como se ve en la **Figura 14**.



Figura 14. Válvula de regulación de gasto del circuito hidráulico

#### d) Tinaco con intercambiador de calor

Consta de un tinaco de 70 L (**Figura 15a**), al cual en la parte inferior tiene un tubo de salida de 2" de diámetro y se encuentra a un altura mayor que la bomba, para garantizar el cebado de la misma. Se le coloca en su interior un intercambiador de calor de serpentín de cobre de 1/2" de diámetro, cuyas dimensiones son de 400 mm de alto por 350 mm de diámetro (**Figura 15b**). El serpentín se conecta con mangueras de 1/2" de diámetro con una tubería que lleva a un sistema de enfriamiento externo (**Figura 15c**).

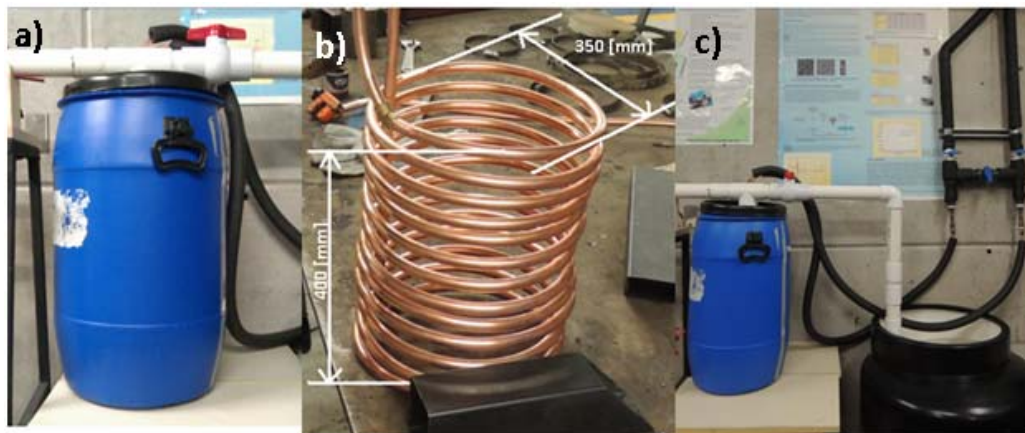


Figura 15. Intercambiador de calor. a) Tanque principal, b) serpentín de cobre, c) conexión con tubería

El sistema de enfriamiento externo es un evaporador de placas modelo ECCLP018A06-E Eco-Chiller, que consta de un tanque recirculador de 50 litros de capacidad con anticongelante, dos bombas recirculadoras de 1/4 HP y un condensador enfriado por aire que usa refrigerante ecológico R410a (**Figura 16**). Su función es enfriar el anticongelante del tanque en el condensador y luego recircularlo hacia el serpentín. Debido al tamaño y que el condensador necesita espacio abierto, este sistema se encuentra en el exterior del laboratorio a una altura dos metros mayor a la del circuito. Las válvulas en la tubería que conecta con las mangueras tienen la función de evitar

presión en las mangueras y el serpentín, causada por la diferencia de alturas cuando el sistema no está en uso.

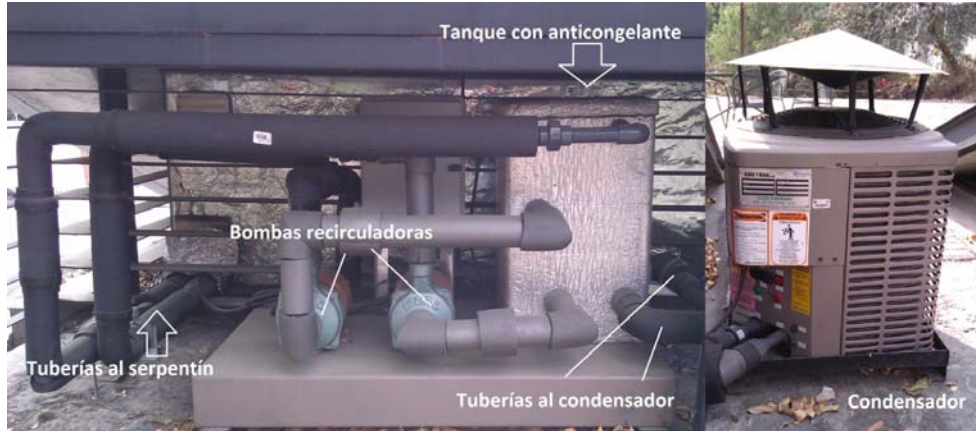


Figura 16. Imagen del sistema de enfriamiento, tanque de recirculación y condensador

La temperatura del anticongelante se controla automáticamente por el termostato incluido en el condensador.

### 3.2 Funcionamiento del circuito hidráulico

El funcionamiento del circuito hidráulico no es complejo, pero hay que conocerlo bien, cualquier error durante su funcionamiento causará daños desde leves a severos al circuito, como contaminación del líquido. También, se debe tener cuidado cuando no está en funcionamiento, ya que dejar los componentes del circuito presurizados causará daños a las uniones o empaques.

#### a) Circuito sin carga y sin sistema de enfriamiento

Cuando el circuito no esté en funcionamiento o después de usarlo, la posición de las válvulas debe estar de la siguiente manera para evitar daños al sistema (**Figura 17**).

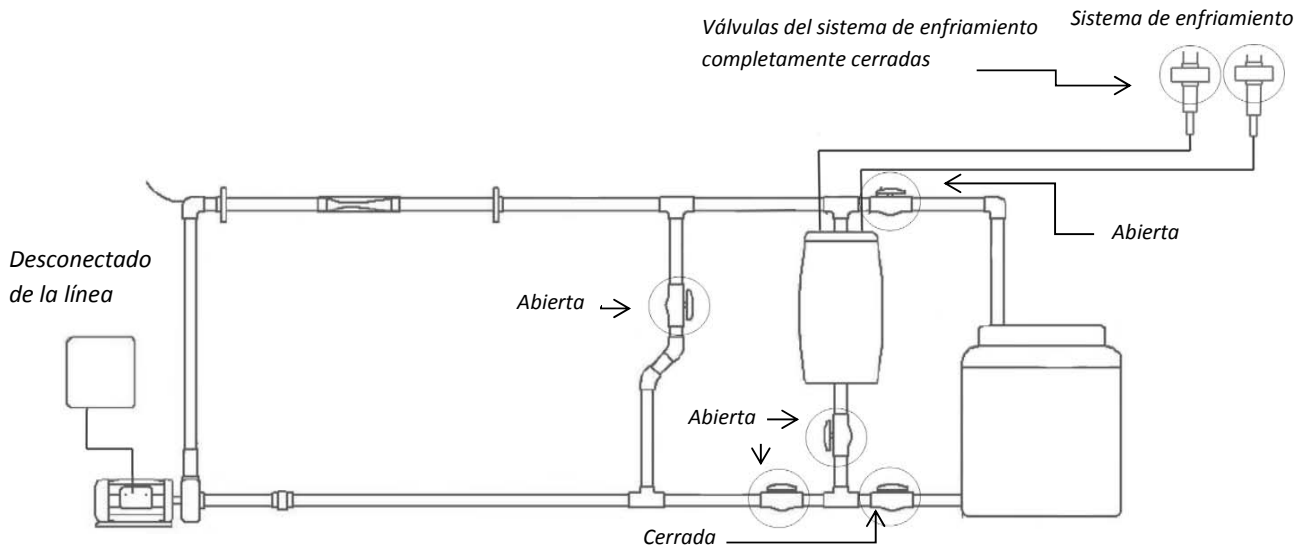
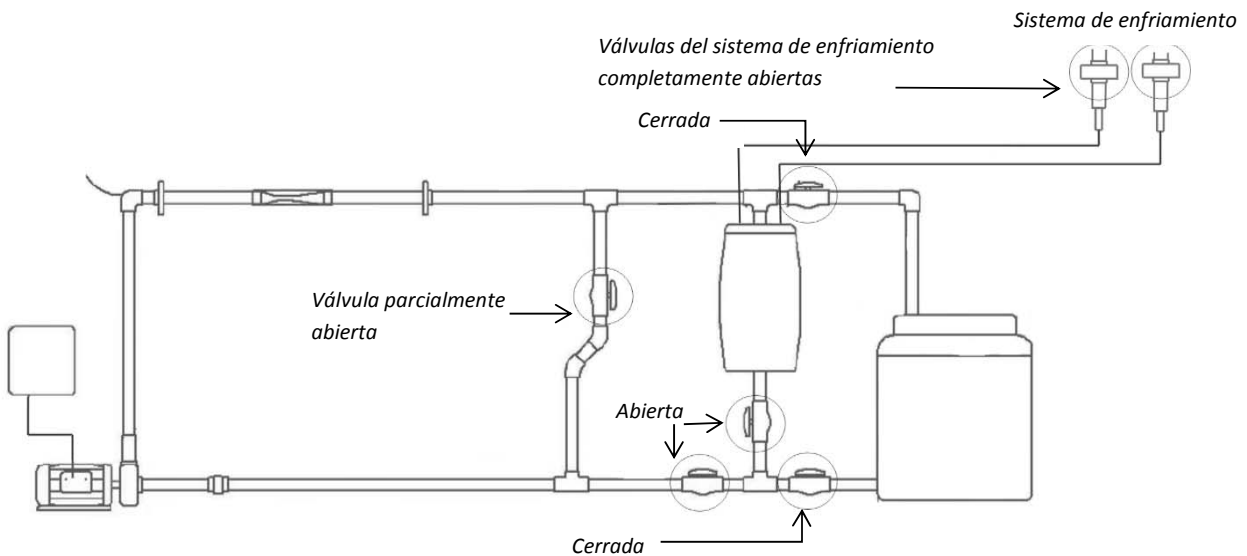


Figura 17. Diagrama de la disposición de válvulas para circuito sin uso

b) Circuito con sistema de enfriamiento

En la **Figura 18** se despliega el diagrama que indica la posición de las válvulas cuando el sistema hidráulico se encuentre trabajando con enfriamiento.



**Figura 18.** Diagrama de la disposición de válvulas para comenzar a usar el circuito

Para utilizar el sistema de enfriamiento se deben seguir los siguientes pasos:

1. Revisar que el tanque con anticongelante esté lleno.
2. Encender el condensador y fijar la temperatura de su termostato (la temperatura mínima que alcanza el termostato es de 7°C).
3. Encender las bombas recirculadoras. El anticongelante llega a su menor temperatura entre 20 y 30 minutos a una temperatura ambiente entre 19 y 23°C (**Figura 16**).
4. Encender la bomba de 5HP para bajar la temperatura del líquido.

Se incrementa el porcentaje de velocidad de la bomba para aumentar la velocidad del líquido. La modificación en el impulsor disminuye el área y en consecuencia disminuye la presión, lo que produce diminutas burbujas. Así la disminución de la presión causada por la reducción de área en el tubo Venturi hace crecer las burbujas generadas en la bomba y el posterior aumento de la presión por el subsecuente aumento del área produce el colapso de la burbuja.

### 3.3 Arreglo experimental para cavitación acústica

La cavitación acústica se genera por dispositivos que son diseñados con el propósito específico de generar ondas estacionarias de presión en líquidos. En nuestro caso generamos estas ondas con un sonotrodo. El sonotrodo es un emisor ultrasónico el cual genera las ondas con un piezocerámico tipo PZT 8 con un generador de 750 W a 20 kHz. Con el generador se varía el porcentaje de potencia de salida y el tiempo de suministro de energía.

El arreglo experimental para la cavitación acústica consta de un generador (marca Sonics), un procesador ultrasónico (sonotrodo), matraz de cuatro gargantas de 500 ml, termómetro de mercurio y un sistema de refrigeración, ver **Figura 19**.



Figura 19. Imágenes del procesador ultrasónico y matraz usados para la cavitación acústica

El sonotrodo se coloca dentro del matraz lleno del líquido a tratar, sujeto a un soporte universal como se aprecia a detalle en la siguiente imagen ver, **Figura 20**.



Figura 20. Vista del sonotrodo fijo en soporte universal y posición de la punta en el matraz

Como la temperatura del líquido se incrementa al aplicar ultrasonido por el sonotrodo, se tiene que usar un sistema de enfriamiento. En este caso, es un sistema manual que consiste de un recipiente de plástico con agua y hielo, en donde se introduce el matraz. Un termómetro monitorea la temperatura del líquido. El arreglo experimental se aprecia en la **Figura 21**.

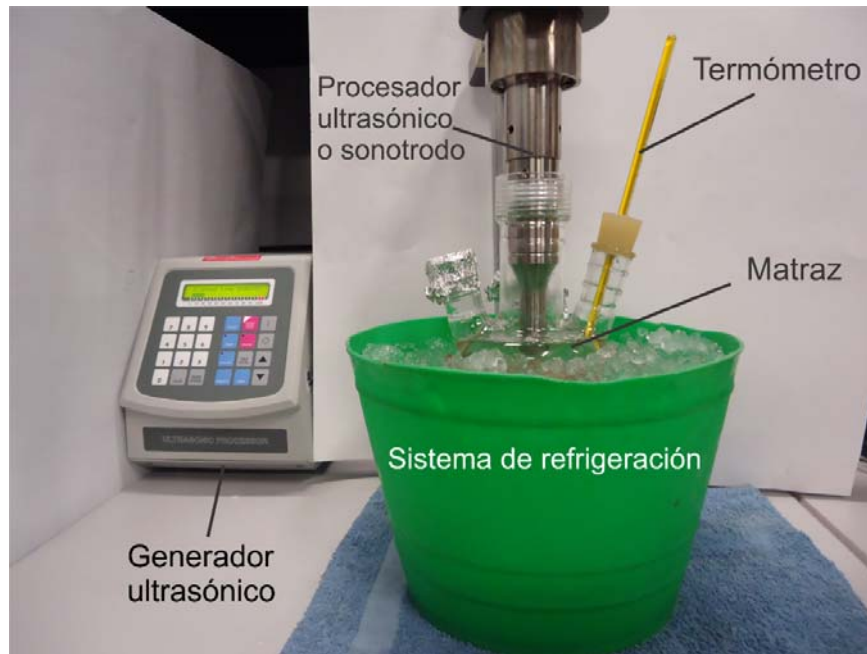


Figura 21. Arreglo experimental para generar cavitación acústica

Con este sistema se tratan volúmenes de líquido de hasta tres litros, lo que permite realizar experimentos con muestras pequeñas, pero con la desventaja que gran parte de la energía suministrada se pierde en calor.



## Capítulo 4

### Caracterización y corridas experimentales

En este capítulo se desarrollan las pruebas experimentales de cavitación acústica e hidrodinámica al 1,2-Propanodiol. Primeramente, se realiza la caracterización de propiedades del líquido polimérico que se usa como parámetro de comparación. Se describen las corridas experimentales aplicando cavitación acústica e hidrodinámica, se describe la metodología para cada caso y se muestran los datos adquiridos en tablas y gráficas.

#### Caracterización del líquido

Las técnicas de caracterización de las propiedades de viscosimetría y espectrometría son comparadas antes y después de las corridas experimentales.

- Viscosimetría. Debido a que la viscosidad varía con la temperatura como se vio en la **sección 2.4**, se determina la curva viscosidad-temperatura del líquido polimérico. Para esto usaremos un viscosímetro rotatorio (**tipos de viscosímetros en anexo D**) digital marca Brookfield y un calentador eléctrico marca Molda Agitherm. El tamaño de la muestra es de 600 ml.
- Espectrometría. El espectro infrarrojo (**ver anexo C**) permite una interpretación de los enlaces presentes en el polímero líquido. Los espectros infrarrojos se obtienen con ayuda de La Unidad de Servicios de Apoyo a la Investigación (USAI) de la Facultad de Química de la UNAM.

#### Características del líquido

El 1,2-Propanodiol o Propilenglicol ( $C_3H_8O_2$ ) es un líquido incoloro e inodoro, con una densidad similar a la del agua pero con mayor viscosidad. Presenta una buena estabilidad, incompatible con ácidos clorhídricos y anhídridos, agentes oxidantes, agentes reductores o cloroformatos, además de ser higroscópico (capacidad de las sustancias de absorber la humedad del ambiente). Se utiliza este líquido, debido a que ha sido estudiado en trabajos previos [40,41] y se cuenta suficiente cantidad para el circuito hidráulico. Algunas propiedades físicas del 1,2-Propanodiol [42,43] se destacan en las siguientes tablas:

Tabla 4. Propiedades reológicas del 1,2-Propanodiol en función de la temperatura

Temperatura [°C]	Viscosidad [mPa·s]	Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]
20	56	1036.2
25	43.428	1032.5
30	33.9	1028.8

Tabla 5. Propiedades 1,2-Propanodiol a temperatura y presión estándar

Propiedad	Valor
Peso molecular	76.1 g/mol
Presión de vapor	0.110 kPa @20°C 0.133 kPa @25°C
Punto de ebullición	187.6°C @ 1 atm
Temperatura de autoignición	371 °C
Calor específico	2.51 kJ/kg°C @25°C

#### 4.1 Viscosimetría

Para determinar la curva Viscosidad-Temperatura de las muestras se emplea el siguiente equipo:

1. Viscosímetro rotatorio marca Brookfield modelo DV-II+ Pro con un juego de cuatro husillos. Estos husillos tienen diferentes geometrías, dependiendo de su intervalo de medición y tienen sobre su eje una señal que indica su nivel de inmersión. Este viscosímetro incluye un sensor de temperatura RTD (detector de temperatura resistivo). Debido al tamaño del marco protector y los husillos, se usa un vaso de precipitados de 600 mL y se requiere la misma cantidad de muestra de líquido para medir la viscosidad. El esquema se muestra en la **Figura 22**.
2. Calentador eléctrico calentador eléctrico marca Molda Agitherm

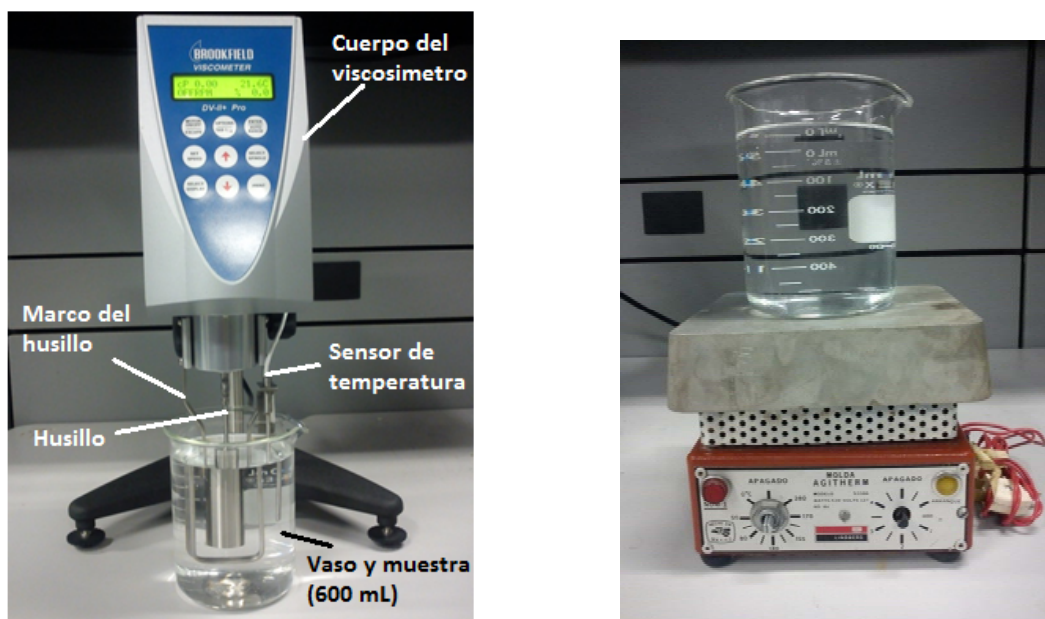


Figura 22. Arreglo experimental para medir la viscosidad y vaso con muestra en el calentador eléctrico

## **Metodología**

La metodología para determinar la curva Viscosidad-Temperatura del 1,2 propanodiol, a las condiciones de la Ciudad de México, presión 78 kPa, y una temperatura ambiente promedio de 20°C, tiene las siguientes etapas:

### **1. Preparación de la muestra y del equipo:**

Esta etapa consiste en ajustar el arreglo experimental y preparar la muestra para comenzar las mediciones. Primero se enfría la muestra, la cual se vierte en un vaso de precipitados, teniendo cuidado de no generar burbujas, se disminuye la temperatura a -10°C, con ayuda de un congelador. Luego se enciende y prepara el viscosímetro de acuerdo al **anexo D**. Se selecciona el husillo adecuado para el intervalo de viscosidad aproximado (**ver selección de husillo en anexo E**).

### **2. Medición de la viscosidad:**

Se coloca el husillo, se ajusta y se selecciona la velocidad de acuerdo al **anexo E**. Se enciende el motor y se espera a que se establezca el sistema aproximadamente 1 minuto. Una vez estable se realiza la lectura de viscosidad y temperatura.

### **3. Lecturas a diferentes temperaturas:**

La adquisición de datos de la viscosidad se registra cada 2 o 3°C, a partir de los 0°C. Los datos se acumulan hasta los 15°C sin utilizar el calentador eléctrico, a partir de esta temperatura se enciende el calentador eléctrico para proseguir con el proceso de adquisición de datos.

### **4. Uso del calentador eléctrico:**

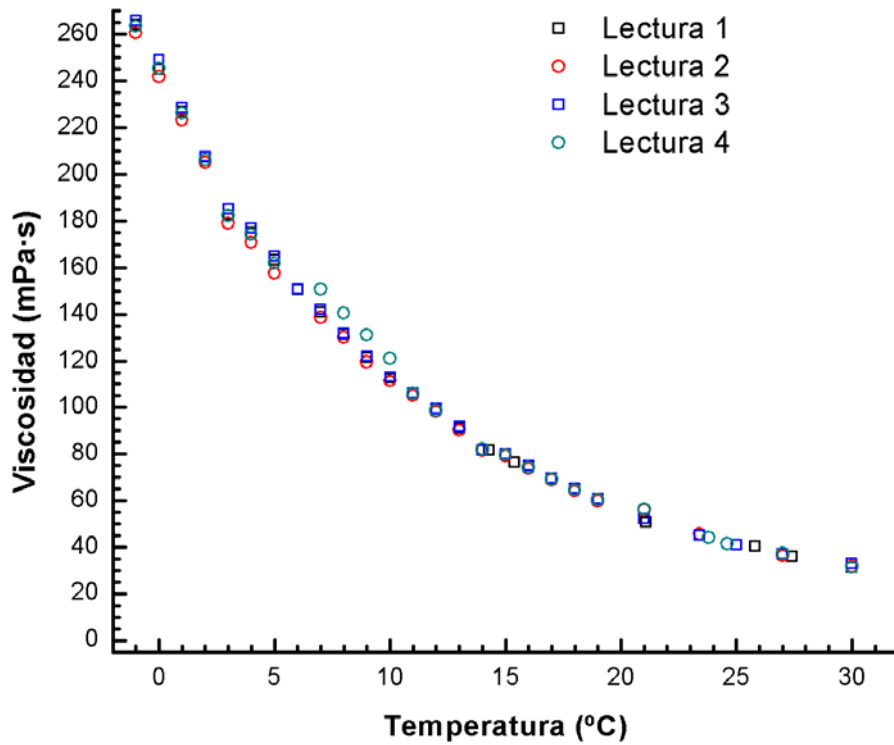
Se sube el viscosímetro sobre su soporte y se retira el husillo. Se retira el vaso del viscosímetro y se coloca en la base del calentador eléctrico y se eleva la temperatura de la muestra, posteriormente se repite el paso 2. Esto se realiza hasta llegar aproximadamente a 80°C.

### **5. Repetición de las mediciones:**

El procedimiento anterior se realiza cuatro veces en distintos días a la misma hora, para evitar variaciones en las condiciones ambientales.

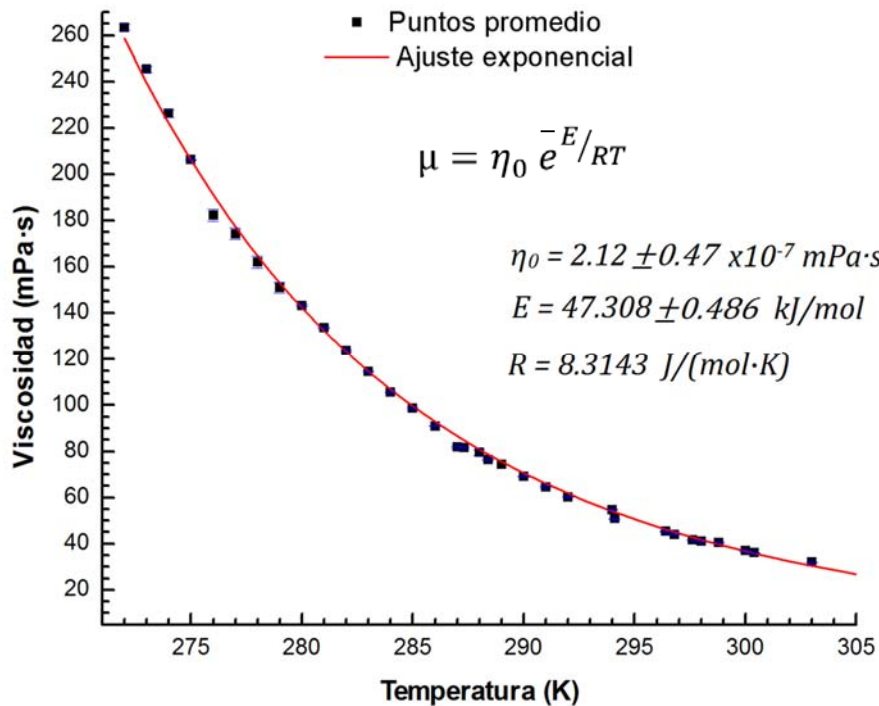
### **6. Procesamiento de datos:**

Se tabulan y grafican las lecturas, usando el programa **Origin 8® (Grafica 1)**.



Grafica 1. Puntos de las lecturas de viscosidad para el 1,2-Propanodiol sin tratar

Con la herramienta de análisis matemático *Average multiple curves* de este programa, se obtienen los puntos promedio de las lecturas y se grafican. La desviación estándar para el promedio va desde  $\pm 0.05$  a  $\pm 2.64$ . Posteriormente, con la herramienta de análisis *Fitting*, se aproximan a la ecuación de Arrhenius (**sección 2.4**). Ver **Grafica 2**.



Grafica 2. Curva exponencial ajustada a la ecuación de Arrhenius para el 1,2 propanodiol sin tratar

La herramienta del programa nos arroja directamente los valores  $\eta_0$  y E. El ajuste exponencial tiene un coeficiente de determinación  $R^2=0.996$ , lo que indica un ajuste confiable en el modelo.

Primeramente, este proceso se realiza en el 1,2-Propanodiol sin tratamiento (**PST**) y se toma una muestra en un vial de 5 ml. Este proceso se realiza posteriormente para el 1,2-Propanodiol después del tratamiento con cavitación acústica (**PCA**) y con cavitación hidrodinámica (**PCH**). Estas pruebas se describen a continuación.

## 4.2 Pruebas de ajuste para el uso de la cavitación acústica al 1,2-Propanodiol en función del tiempo

En esta sección se describe la implementación del arreglo experimental para generar cavitación acústica. Se realizan dos pruebas para disminuir la viscosidad del 1,2-Propanodiol, que se describen a continuación:

### **Pruebas de 1,2-Propanodiol con cavitación acústica (PCA1) y (PCA2):**

Primeramente se prueba el arreglo experimental y se ven los efectos de generar cavitación acústica. Se observa que al aplicar cavitación acústica por periodos prolongados de tiempo (aproximadamente 20 minutos) se presentan diversos problemas en el líquido y en el equipo, como el sobrecalentamiento del sonotrodo o la degradación por alta temperatura del líquido. Aunque se conocen estos efectos, no se sabe cuándo comenzarán a ocurrir ni cómo evitar algunos. Se analiza las variables que intervienen, los tiempos en que se manifiestan y se desarrolla una metodología.

## 4.3 Pruebas de cavitación acústica en 1,2-Propanodiol

Se implementa el arreglo experimental para generar cavitación acústica en el líquido 1,2-Propanodiol con una temperatura ambiente entre 19 y 21°C. Se trabaja con 500 ml del líquido por un total de 10 horas. El generador ultrasónico se fija al 100% de potencia (750 W) y se establecen diferentes periodos de tiempo.

Se comienza con el líquido a 2°C, se fija el temporizador del generador en 20 minutos y con el recipiente de plástico lleno de hielos. Se toman lecturas de la temperatura en función del tiempo. Se registran los datos, la temperatura comienza a estabilizarse aproximadamente a los 20 minutos a 29°C (**Tabla 6**).

**Tabla 6. Comportamiento de la temperatura en función del tiempo para los primeros 20 minutos de cavitación acústica**

Tiempo [minutos]	Temperatura [°C]
0	2
3	19
5	24
10	26
15	28
20	29

Para conocer el comportamiento después de estos 20 minutos, se fija el temporizador en 40 minutos. La temperatura inicial de la muestra es de 5°C y la temperatura ambiente de 20°C. El comportamiento fue el siguiente, **Tabla 7**.

**Tabla 7. Comportamiento de la temperatura en función del tiempo para 40 minutos de cavitación acústica**

Tiempo [minutos]	Temperatura [°C]
0	5
5	26
10	28
20	32
25	29 *(Agitando)
30	28 *(Agitando)
40	28 *(Agitando)

La temperatura se estabiliza a los 20 minutos aproximadamente a 32°C. A los 25 minutos de la prueba se comienza a agitar el agua del sistema de enfriamiento, lo que hace que la temperatura disminuya y se estabilice a los 30 minutos a una temperatura de 28°C. El sonotrodo presenta un incremento en su temperatura 30 minutos después de iniciada esta prueba a ~ 80°C.

Considerando lo ocurrido durante la primera hora, el procedimiento se establece de la siguiente forma:

1. Temporizador en una hora.
2. Durante el proceso se agita el sistema de enfriamiento.
3. Transcurrida media hora se pausa el generador para enfriar el sonotrodo

Durante el proceso la temperatura del líquido se mantiene en  $28 \pm 1^\circ\text{C}$  y el sonotrodo no se sobrecalienta. También se solucionan problemas adicionales con el sistema de enfriamiento (se le

agrega agua al inicio de la prueba para mejorar la transferencia de calor por convección debido al movimiento del sistema que se tiene constantemente, a medida que el calor transmitido del fluido de trabajo al sistema de enfriamiento los hielos tienden a derretirse por lo que se extrae el exceso de agua y se agrega hielo nuevamente para mantener el sistema de enfriamiento a una temperatura constante).

Este proceso se repite hasta tener una muestra con un total de 10 horas para evaluar el proceso de cavitación acústica. Se tomaron muestras entre 1 ml a 5 ml a distintos tiempos de proceso y se etiquetaron en viales de 5ml para su análisis espectroscópico como se observa en la **Figura 23**.



Figura 23. Muestras de la primera prueba de cavitación acústica

En la **Tabla 8** se despliega el tiempo de adquisición de cada muestra.

Tabla 8. Tiempo de adquisición de la primera prueba de cavitación acústica

Muestra	Tiempo de proceso	Etiqueta
1	Sin proceso	PCA101
2	1 hora	PCA102
3	2 horas	PCA103
4	3 horas	PCA104
5	6 horas	PCA105
6	10 horas	PCA106

Terminado el proceso de cavitación acústica, 500 ml de 1,2-Propanodiol tratado con cavitación acústica se caracterizan por viscosimetría.

## Segunda prueba de 1,2-Propanodiol con cavitación acústica

Considerando los problemas que se presentaron en la primera prueba, la metodología para la aplicación con cavitación acústica se mejora y se describe a continuación. Las condiciones de la Ciudad de México, presión 78 kPa, y una temperatura ambiente promedio de 20°C.

- i. Se implementa el arreglo experimental para generar cavitación acústica. La temperatura del 1,2-Propanodiol en el matraz es de 5°C y al contenedor de enfriamiento se colocan hielo en el recipiente plástico con un porcentaje de 20% de agua. Se toma una muestra inicial de 5 ml.
- ii. Se ajusta el temporizador del generador ultrasónico en una hora y la potencia al 100%.
- iii. Se inicia la prueba y se agita el agua con hielos. A medida que los hielos se van derritiendo, se extrae agua y se coloca mas hielo, procurando mantener la proporción de agua-hielos como al inicio de la prueba.
- iv. Transcurrida media hora de proceso, se pausa el generador ultrasónico y se deja enfriar el sonotrodo.
- v. Este proceso se repite hasta completar un total de 10 horas de tratamiento, tomado muestras de 1 a 5 ml transcurridas 2, 8 y 10 horas para su análisis espectroscópico.

En la **Figura 24** se muestran los viales donde fueron introducidas las muestras líquidas.



Figura 24. Muestras de la segunda prueba de cavitación acústica

Realizado este proceso se etiquetan las muestras de la siguiente forma (**Tabla 9**):

Tabla 9. Muestras de la segunda prueba de cavitación acústica

Muestra	Tiempo de proceso	Etiqueta
1	Sin proceso	PCA201
2	2 hora	PCA202
3	8 horas	PCA203
4	10 horas	PCA204

Al final se tiene una muestra de 500 ml de 1,2-Propanodiol tratado con cavitación acústica.



#### 4.4 Pruebas de cavitación hidrodinámica al 1,2-Propanodiol en función del tiempo

En esta sección se describe la caracterización del circuito hidráulico para alcanzar la cavitación hidrodinámica.

##### Prueba al sistema hidráulico con enfriamiento

Se realiza una prueba preliminar para determinar el comportamiento del circuito hidráulico con el sistema de enfriamiento. Se fija el termostato del condensador del sistema de enfriamiento a 7°C, la temperatura inicial en el condensador es de 19°C y la del 1,2-Propanodiol es de 23°C. Se hace circular el propanodiol con la bomba al 15% de su velocidad.

La temperatura del 1,2-Propanodiol y del sistema de enfriamiento se comportan de la siguiente manera (**Tabla 10**):

Tabla 10. Temperatura del 1,2-Propanodiol y el condensador en función del tiempo para la primera prueba del sistema de enfriamiento con la bomba al 15%

Tiempo [min]	Temperatura del condensador [°C]	Temperatura del propanodiol [°C]
0	17	23
10	15	22
20	12	19
30	8	18
40	7.7	17
50	7.7	15
60	7.8	15

En la segunda prueba del sistema de enfriamiento, se fija el termostato en 7°C, la temperatura inicial del condensador es de 17.7°C y la del 1,2-Propanodiol de 24°C. La bomba está al 15% de su potencia como en la prueba anterior. El comportamiento de la temperatura se muestra a continuación en la **Tabla 11**:

Tabla 11. Temperatura del 1,2-Propanodiol y el condensador en función del tiempo para la segunda prueba del sistema de enfriamiento con la bomba al 15%

Tiempo [min]	Temperatura del condensador [°C]	Temperatura del propanodiol [°C]
0	17.7	24
10	15.7	23
20	11	20
30	8	19
40	7.9	17
50	7.7	15
60	7.8	15

De estas pruebas se determina que antes de iniciar el proceso de cavitación en el circuito hidráulico, el sistema de enfriamiento debe iniciarse 40 minutos antes.

### Equipo de control

Para obtener la corriente que consume la bomba en función del porcentaje de la potencia, se usa un multímetro digital de gancho marca Mitzu modelo MP-9600, el cual se coloca en uno de los cables del convertidor de frecuencias (control de la potencia del motor de la bomba centrífuga) como se ilustra a continuación en la **Figura 25**:



Figura 25. Disposición del multímetro digital de gancho en el control de la bomba

### Metodología para tratar al 1,2-Propanodiol con cavitación hidrodinámica

La metodología para tratar al 1,2-Propanodiol con cavitación hidrodinámica, a las condiciones de la Ciudad de México, presión 78 kPa, y una temperatura ambiente promedio de 20°C, es la siguiente:

- 1) Se enciende el sistema de enfriamiento y se espera 40 minutos hasta que la temperatura del 1,2-Propanodiol sea de 15°C.
- 2) Se enciende el control de la bomba y se comienza a aumentar el porcentaje de la velocidad.
- 3) A diferentes porcentajes de velocidad de la bomba se registran lecturas de corriente y temperatura.
- 4) Este proceso se repite desde el 10% de velocidad de la bomba hasta que el sistema empieza a cavitarse a  $\sim 1.7$  kW. (aproximadamente del 35 a 40%).
- 5) El porcentaje de velocidad se mantiene así durante una hora y se realizan lecturas de corriente en la bomba y la temperatura del líquido.

El proceso descrito anteriormente se repite hasta completar las 10 horas de tratamiento y se toman muestras de 5 ml a distintos tiempos del proceso para su análisis espectroscópico (**Figura 26**).



Figura 26. Muestras de la prueba de cavitación hidrodinámica

Realizado este proceso se etiquetan las muestras de la siguiente forma (**Tabla 12**):

Tabla 12. Muestras de 1,2-Propanodiol tratado con cavitación hidrodinámica

Muestra	Tiempo de proceso	Etiqueta
1	Sin proceso	PCH201
2	25 minutos	PCH202
3	1 hora	PCH203
4	2 horas	PCH204
5	4 horas	PCH205
6	10 horas	PCH206

El comportamiento de la temperatura y corriente a distinto porcentaje de velocidad de la bomba ocurre de manera similar para las 10 horas de tratamiento, por lo que se muestra a continuación dicho comportamiento para dos partes del proceso (**Tablas 13 y 14**). Además se incluyen anotaciones cualitativas de lo observado durante el incremento de la potencia en el tubo Venturi y tubo by-pass. Se obtiene una corriente promedio para cada porcentaje de potencia.

Tabla 13. Comportamiento del sistema para la primera hora de cavitación hidrodinámica

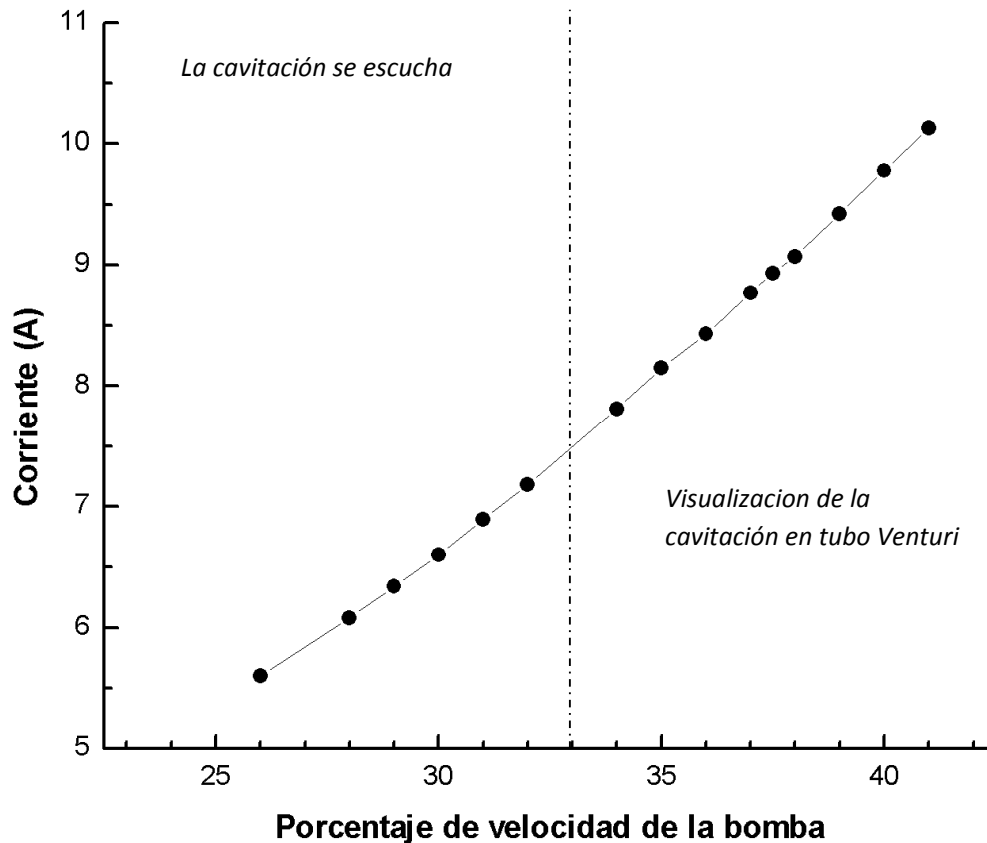
% Velocidad	Corriente Promedio [A]	Temperatura [°C]	Anotaciones Cualitativas
10	2.187±0.02	13	
15	3±0.23	13	
18.5	3.61±0.04	13	Se presenta un silbido agudo a la salida del tubo Venturi.
21	4.08±0.03	13	Comienza a verse una burbuja que gira en la contracción del tubo Venturi.
22.8	4.45±0.02	13.5	La misma burbuja comienza a girar rápidamente.
24.3	4.76±0.02	13,5	Ruido como piedras cayendo a la salida del tubo venturi.
26.5	5.26±0.02	14	Aumenta el ruido respecto al anterior y se hace

			intermitente. La burbuja en la contracción se contrae.
29	5.85±0.17	14	La misma burbuja presenta una trayectoria errática.
31	6.43±0.02	15	Comienzan a aparecer mas burbujas a la salida de la vena contracta.
32	6.74±0.04	15	
32.6	6.86±0.02	16	Ruido intermitente en el tubo Venturi.
33	6.91±0.14	16	
34	7.27±0.03	17	
35	7.63±0.12	18	A partir de este momento se deja una hora de proceso a la potencia al 35%
35	7.63±0.12	18.5	Alertas ante cualquier contingencia.

**Tabla 14. Comportamiento del sistema para la décima hora de cavitación hidrodinámica**

% Velocidad	Corriente Promedio [A]	Temperatura [°C]	Anotaciones
26	5.60	14	Comienza ruido en el tubo Venturi y burbujas en el tubo by-pass.
28	6.08±0.04		Se oye ruido de piedras golpeando en el tubo Venturi, ya no hay burbujas en tubo vertical.
29	6.34±0.02	15	Aumenta intensidad del ruido en el tubo Venturi.
30	6.60±0.02	16	Baja el ruido, no hay burbujas en tubo de acrílico del by-pass, baja el sonido de las piedras en el tubo Venturi.
31	6.89±0.05	16	Aumenta ruido de piedras, se ven pocas burbujas en Venturi.
32	7.18±0.02	16.8	Ruido de piedras más continuo.
34	7.81±0.04	17	El ruido se vuelve continuo, muy pocas burbujas en el tubo Venturi.
35	8.15±0.02	18	El ruido parece un zumbido fuerte, pocas burbujas en el tubo Venturi.
36	8.43±0.01	18,5	Ruido más intenso, burbujas pequeñas en el tubo Venturi
37.5	8.93±0.22	20	Ruido de cadenas en tubo Venturi.
38	9.07±0.01	20	
39	9.42±0.01	20	Muchas burbujas pequeñas en tubo Venturi, en tubo vertical con by-pass burbujas muy grandes.
41	10.13±0.06	21	Súper ruido
37	8.73±0.06	22	Se disminuye potencia para evitar súper ruido y se mantiene una hora

El comportamiento de la corriente a distinto porcentaje de la velocidad es el siguiente:



Gráfica 3. Corriente eléctrica en función del porcentaje de la bomba para cavitación hidrodinámica

En la última hora se mantuvo en el rango del 35 al 37%, trabajando la bomba, y sólo por un momento se subió la porcentaje de la bomba a un 41% para verificar que se repite el súper ruido causado por cavitación.

Al finalizar este proceso se tienen 70 litros de 1,2-Propanodiol tratado con cavitación hidrodinámica, de los cuales se almacenan 600 ml para realizar pruebas de viscosimetría y análisis de espectros en el IR.

Una vez concluidas las pruebas, se tienen dos muestras de 500 mL de 1,2-Propanodiol tratado con cavitación acústica y 600 ml de 1,2-Propanodiol tratado con cavitación hidrodinámica para su posterior caracterización. Además de 1,2-Propanodiol sin tratamiento como referencia de los análisis. En la **Figura 27** se muestran los frascos de color ámbar de 1 L de capacidad donde fueron almacenados.



Figura 27. Muestras de 1,2-Propanodiol con diferentes tratamientos

Las muestras son sometidas al proceso de viscosimetría y análisis por espectroscopía infrarroja IR. En el siguiente capítulo se analizan los datos de las pruebas, así como las gráficas de viscosidad-temperatura y espectros infrarrojos.

## Capítulo 5

### Resultados y análisis

En este capítulo se describe la adquisición de datos de corriente y flujo volumétrico. A partir de estas mediciones se relacionan las ecuaciones que permitan obtener el número de cavitación y la energía suministrada. Posteriormente, se grafican los datos adquiridos de viscosidad en función de la temperatura, se comparan las graficas de cavitación hidrodinámica y acústica con una muestra sin tratamiento de 1,2-Propanodiol. Finalmente, se analizan los espectro de infrarrojo y se determina la densidad para cada una de las muestras finales.

#### 5.1 Cálculo del número de cavitación en el tubo Venturi y en el sistema acústico

El cálculo del número de cavitación del tubo Venturi, se obtiene a partir de la energía suministrada a la bomba teniendo consideraciones de eficiencia de la bomba. Se considera también una eficiencia en el impulsor debido a la modificación de éste.

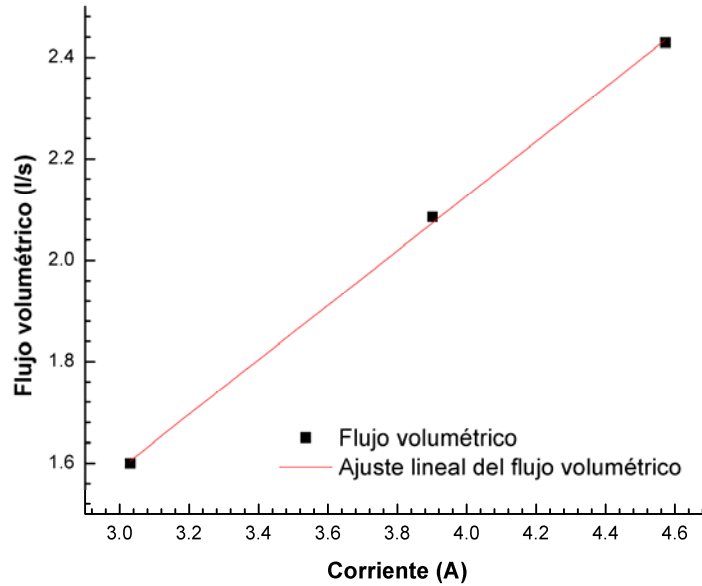
##### Determinación del gasto volumétrico, potencia empleada y presión

El gasto volumétrico se midió de forma experimental, se realizan lecturas a distintos valores de corriente. En la **tabla 15** se muestra los valores calculados.

Tabla 15. Adquisición de corriente y flujo volumétrico

Corriente [A]	Flujo Volumétrico [l/s]
4.57±0.06	2.42±0.09
3.9±0.1	2.08±0.16
3.03±0.06	1.60±0.12

A partir de estos tres puntos se caracteriza la curva que relaciona la corriente con el flujo volumétrico como se muestra a continuación (**Gráfica 4**).



Gráfica 4. Relación entre la corriente y el flujo volumétrico

El ajuste numérico proporciona la siguiente ecuación

$$Q = 0.53899I - 0.02831 \quad (5.1)$$

$Q$  = flujo volumetrico l/s

$I$  = corriente eléctrica A

A partir de esta ecuación se adquiere el gasto del circuito hidrodinámico cuando este empieza a cavitarse y cuando está cavitando totalmente (**Tabla 16**).

Tabla 16. Flujo volumétrico teórico en función de la corriente

Corriente	Flujo Volumétrico [l/s]
7.63	4.0843
8.84	4.7366
9.4	5.0384

Se procede a obtener la velocidad del fluido en los puntos 1 y 2 de la **Figura 28**.

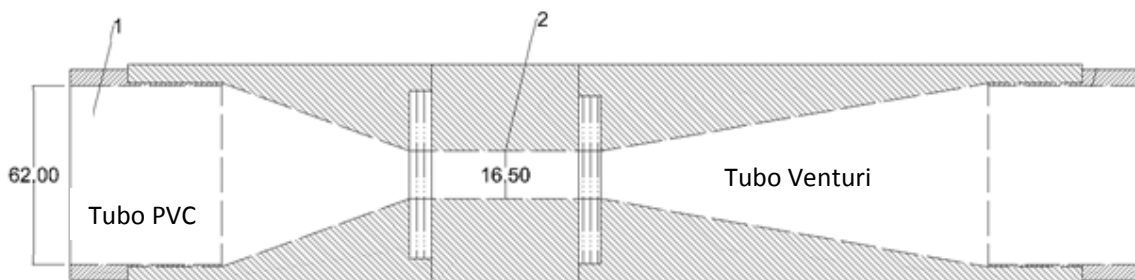


Figura 28. Tubo Venturi con conexiones de tubo PVC C80 2 1/2" (Acotaciones en mm)



### Cálculo de la velocidad en el tubo Venturi.

Primero se miden los diámetros internos del tubo Venturi donde se genera la cavitación hidrodinámica  $D_1$  y  $D_2$  (diámetro nominal para tubería de 2 1/2" cedula 80 [44]).

$$D_1 = 62.5 \text{ mm}$$

$$D_2 = 16.5 \text{ mm}$$

Calculo del área transversal, al ser circulares solo se utiliza la fórmula para el área de un círculo.

$$A = \pi \frac{D^2}{4} \quad (5.2)$$

$$A_2 = \pi \frac{(0.0165)^2}{4} = 2.13 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$A_1 = \pi \frac{(0.062)^2}{4} = 3.01 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

El flujo volumétrico se relaciona con el área transversal por donde circula el fluido de trabajo, de esta manera se encuentra la velocidad.

$$V = \frac{Q}{A} \quad (5.3)$$

Donde  $V$  es la velocidad del fluido,  $Q$  es el flujo volumétrico y  $A$  es el área transversal que atraviesa el 1,2-Propanodiol. Se calculan las velocidades en los puntos 1 y 2 del tubo Venturi a diferentes flujos volumétricos (**Tabla 17**).

Tabla 17. Velocidades en la garganta del tubo Venturi y tubería

% Potencia	Flujo volumétrico [m <sup>3</sup> /s]	Velocidad 1 [m/s]	Velocidad 2 [m/s]
41	0.0050	1.65	23.56
37	0.0047	1.55	22.15
31	0.0040	1.32	19.10
28	0.0024	0.79	11.35
25	0.0020	0.66	9.75
20	0.0016	0.52	7.48

Para calcular la energía suministrada al circuito hidrodinámico se toman las siguientes consideraciones:

- Voltaje 220 V
- Corriente variable

Para una bomba trifásica se tiene la siguiente ecuación para el suministro de energía [45].

$$Pot = \sqrt{3} \cdot I \cdot V \cdot \cos(60) \quad (5.4)$$

$Pot$  = Potencia [W]

$I$  = Corriente eléctrica [A]

$V$  = Voltaje de línea [V]

Potencia suministrada:

Tabla 18. Potencia ideal suministrada a la bomba

Voltaje [V]	Corriente [A]	Potencia [W]
220	9.4	1790.94
220	8.84	1684.24
220	7.63	1453.71
220	4.57	870.70
220	3.9	743.04
220	3.03	577.29

Tomando en cuenta la eficiencia de la bomba y considerando una eficiencia en el impulsor debido a la disminución de área de salida, se obtiene la potencia que aprovecha el circuito hidrodinámico (**Tabla 19**).

Tabla 19. Potencia real suministrada a la bomba

Potencia [W]	Potencia con eficiencia 85% bomba	Potencia con eficiencia 40% impulsor
1790.94	1522.29	608.91
1684.24	1431.60	572.64
1453.71	1235.65	494.26
870.70	740.09	296.03
743.04	631.59	252.63
577.29	490.69	196.27

Hay una relación entre la potencia, la presión y el flujo volumétrico que se muestra en la siguiente ecuación.

$Pot$  - potencia [W]

$P_1$  - presión [Pa]

$Q$  - flujo volumétrico [ $m^3/s$ ]

La presión a la entrada del Venturi (**Tabla 20**).

$$P_1 = \frac{Pot}{Q} \quad (5.5)$$

Tabla 20. Presión a la entrada del tubo Venturi

Potencia [W]	Flujo Volumétrico [m <sup>3</sup> /s]	Presión [kPa]
608.91	0.00503	120.85
572.64	0.00473	120.89
494.261	0.00408	121.01
296.038	0.00242	121.89
252.63	0.00208	121.17
196.27	0.0016	122.67

### Número de cavitación en la garganta del tubo Venturi

Al conocer la velocidad en la vena contracta  $V_2$  de la tabla 18 y la presión  $P_1$  antes de la contracción del tubo Venturi de la **tabla 20** se calcula el número de cavitación. Para el 1,2-Propanodiol tienen las siguientes propiedades:

$P_1$  - presión a la entrada del Venturi

$P_v$  - presión de vaporización del 1,2-Propanodiol 133[Pa] a 25°C

$\rho$  - 1036 [kg/m<sup>3</sup>] a 25°C

$V_2$  - velocidad en la garganta del tubo Venturi

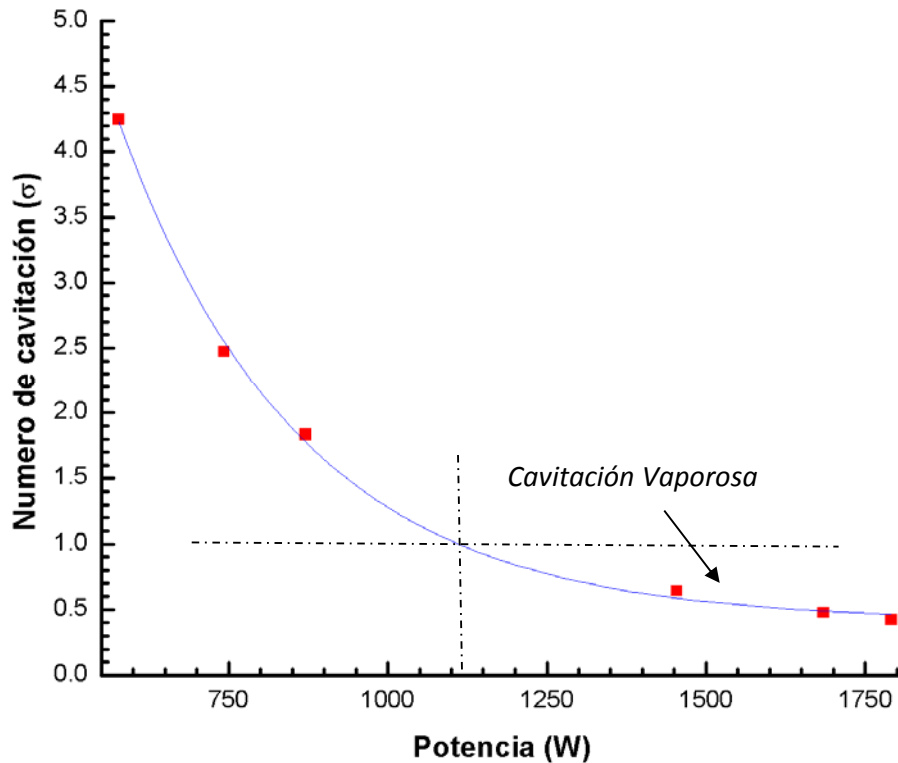
$$\sigma = \frac{P_1 - P_v}{\frac{1}{2}\rho V_2^2} \quad (2.3)$$

Se obtiene del número de cavitación de acuerdo a la **ecuación 2.3**. Se conoce la presión antes de la vena contracta absoluta, la presión de vapor del fluido con el que estamos trabajando el cual se considera constante, la densidad de igual forma se considera constante. La velocidad en la vena contracta se relaciona con el flujo volumétrico y la energía suministrada al sistema.

Tabla 21. Número de cavitación en función del porcentaje de la bomba

% Velocidad	$P_1$ [Pa]	$P_v$ [Pa]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$V_2$ [m/s]	$\sigma$
41	120853.74	133	1036	23.5636	0.422
37	120897.04	133	1036	22.1519	0.477
31	121012.43	133	1036	19.1015	0.643
28	121892.55	133	1036	11.3583	1.832
25	121179.52	133	1036	9.7501	2.472
20	122674.66	133	1036	7.4827	4.249

A continuación se grafican los valores del número de cavitación contra la energía suministrada al sistema (**Gráfica 5**).



Gráfica 5. Potencia vs Número de Cavitación

Se observa que la cavitación vaporosa ocurre para números de cavitación menores a la unidad, con valores de potencia mayores a 1100 W. Para número de cavitación mayores a la unidad no se presenta cavitación.

### Número de cavitación acústico

Considerando la cavitación acústica se usan los siguientes parámetros

$P_A$  = Presión acústica [Pa]

$V_b$  = Velocidad de las burbujas [m/s]

Por lo que el número de cavitación queda:

$$\sigma = \frac{P_A}{\frac{1}{2} \rho V_b^2}$$

Para conocer el número de cavitación acústico primero se necesita conocer la presión acústica que se aplica en el medio. La presión acústica relaciona propiedades del líquido como la densidad  $\rho$ , la velocidad del sonido en el medio  $C$  y la intensidad acústica  $I_A$  [47], como se muestra a continuación [46]:

$$P_A = \sqrt{2I_A \rho C}$$

$$I_A = 10000 \text{ [W/m}^2\text{]}$$

$$C = 1658 \text{ [m/s]}$$

$$\rho = 1036 \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

Se obtiene una presión acústica de:

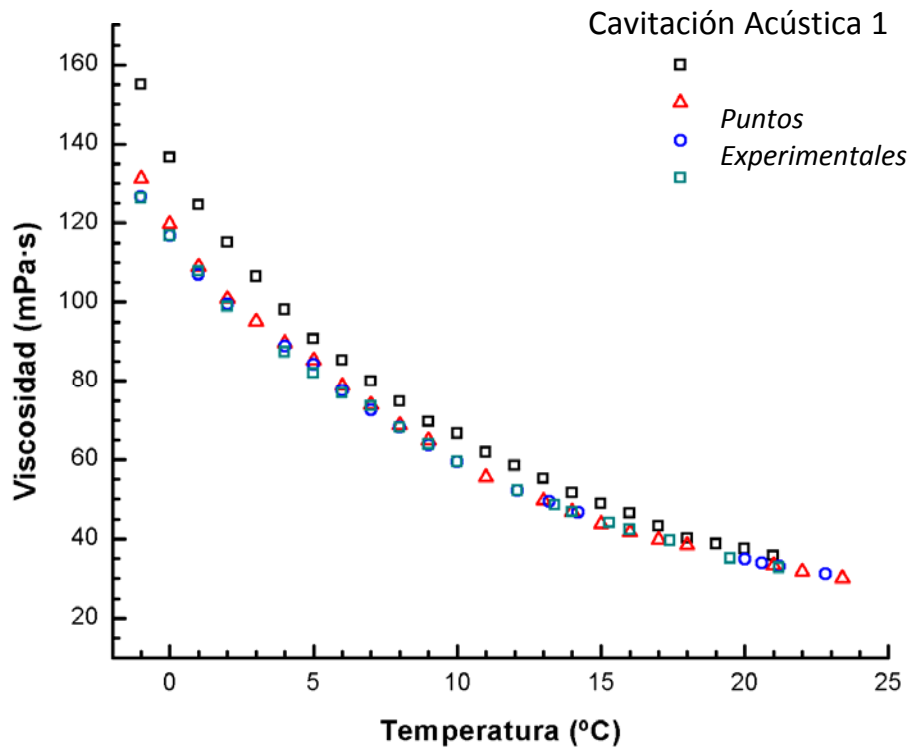
$$P_A = \sqrt{2 \cdot 10000 \cdot 1036 \cdot 1658} = 184.98 \text{ kPa}$$

Para el cálculo del número de cavitación se determina la velocidad del movimiento de las burbujas en el líquido que es aproximadamente de  $30 \text{ m/s}$  y la densidad del 1,2-Propanodiol de  $1036 \text{ kg/m}^3$ , se obtiene el siguiente resultado.

$$\sigma = \frac{185000}{\frac{1}{2} \cdot 1036 \cdot 30^2} = \frac{185000}{466200} = 0.39$$

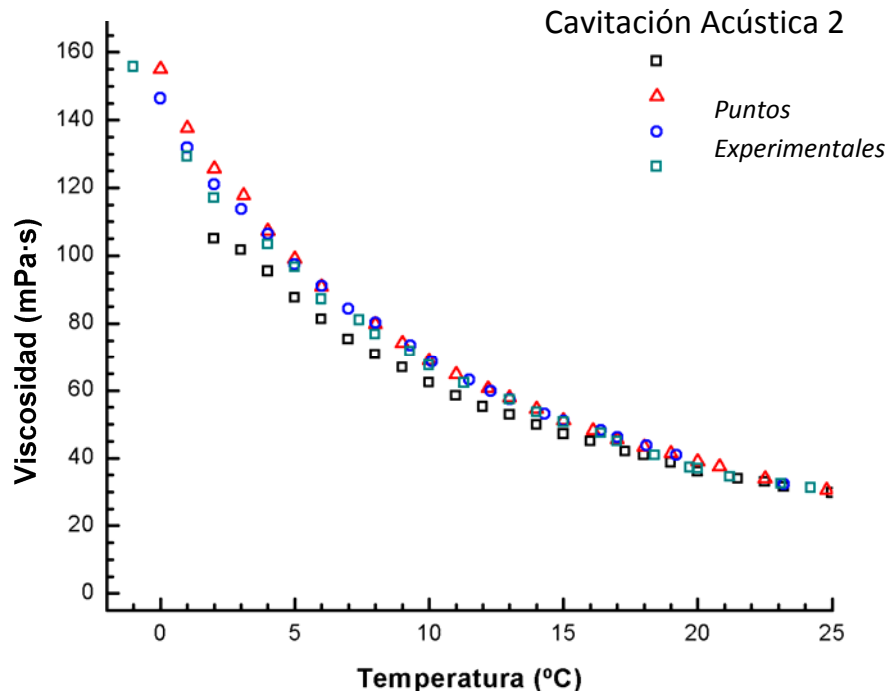
## 5.2 Curvas viscosidad-temperatura del líquido sin y con tratamiento

Terminados los procedimientos experimentales de cavitación acústica e hidrodinámica en el 1,2-Propanodiol, se tienen 4 muestras (**Figura 28**) que son sometidas al proceso de viscosimetría descrito en la **sección 4.1**. De este proceso se obtiene la gráfica Temperatura-Viscosidad para cada muestra, que nos permite determinar el comportamiento de la viscosidad en función de los procesos de cavitación. Las lecturas de las 4 muestras se despliegan en una gráfica Temperatura-Viscosidad. Las lecturas para el 1,2-Propanodiol después de la primera prueba con cavitación acústica se muestran en la **Gráfica 6**:



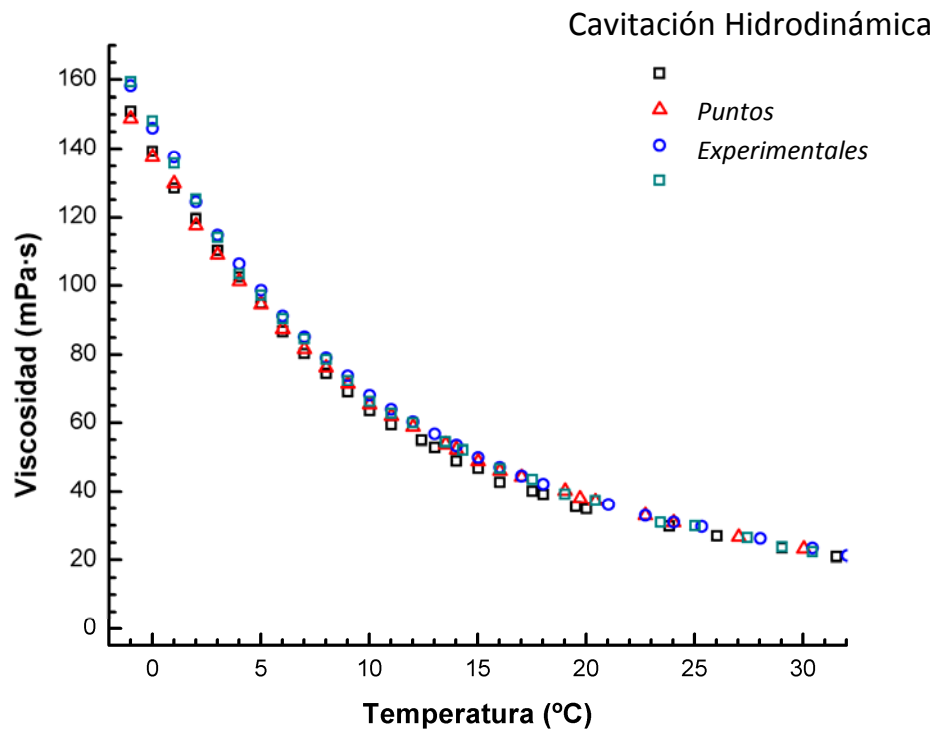
Gráfica 6. Puntos de las lecturas para 1,2-Propanodiol con la primera prueba de cavitación acústica

En la **Gráfica 7** se muestran las lecturas para la segunda prueba de cavitación acústica:



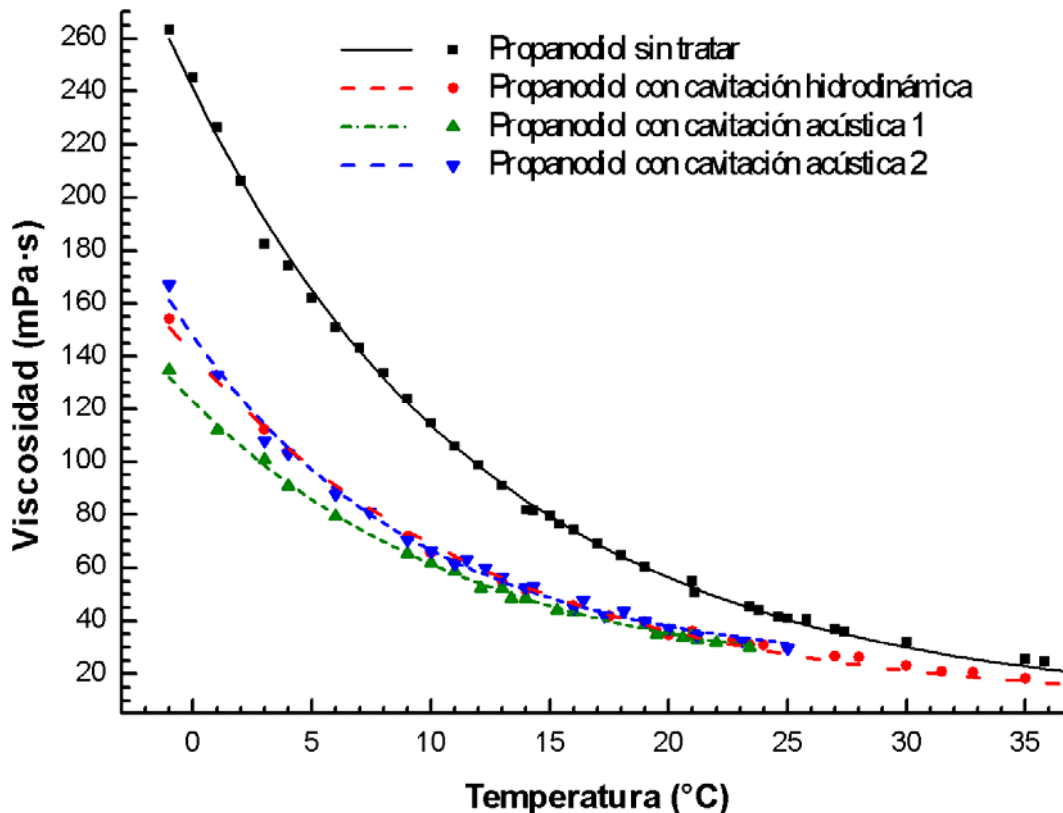
Gráfica 7. Puntos de las lecturas para 1,2-Propanodiol con la segunda prueba de cavitación acústica

En la **Gráfica 8** se muestran las lecturas de viscosidad para el 1,2-Propanodiol con el proceso de cavitación hidrodinámica



Gráfica 8. Puntos de las lecturas para 1,2-Propanodiol con la prueba de cavitación hidrodinámica

Se utiliza el programa **Origin 8®** para obtener los puntos promedio de estas lecturas para cada muestra. Posteriormente, se ajusta la ecuación de Arrhenius para cada una de ellas y se despliegan en la **Gráfica 9**:



Gráfica 9. Curvas Temperatura -Viscosidad para las 4 muestras

Los valores de los parámetros de la ecuación de Arrhenius son los siguientes:

Tabla 22. Parámetros de la ecuación de Andrade para las distintas muestras

Muestra	Constante pre-exponencial $\eta_0$ [mPa·s]	Energía de activación E [kJ/mol]	Coefficiente de determinación $R^2$ del ajuste
Propanodiol sin tratar	$2.12 \times 10^{-7}$	47.30	0.996
Propanodiol con cavitación hidrodinámica	$8.36 \times 10^{-7}$	42.01	0.990
Propanodiol con cavitación acústica 1	$10.3 \times 10^{-7}$	41.25	0.995
Propanodiol con cavitación acústica 2	$2.06 \times 10^{-7}$	45.20	0.986

Se observa en la **gráfica 9** el comportamiento de la viscosidad del 1,2-Propanodiol para los distintos procedimientos experimentales. La viscosidad en función de la temperatura disminuye en el mismo orden de magnitud para los tres tratamientos con respecto a la viscosidad del líquido sin tratamiento. Se aprecia también que arriba de los 30 grados los valores de viscosidad tienden a un valor similar, sin embargo el valor de la viscosidad sin tratar siempre se mantiene por arriba del líquido procesado. La energía de activación disminuye para las muestras con tratamiento, lo que indica que el propanodiol requiere una menor cantidad de energía para fluir.

### 5.3 Espectros infrarrojos de los diferentes tratamientos y metodología para obtener la densidad

Los espectros infrarrojos son los encargados de corroborar que el fluido de trabajo ha sufrido cambios o si se mantiene su estructura molecular. El 1,2-Propanodiol recibe su nombre según la IUPAC porque pertenece a la familia de los alcoholes, tiene dos grupos de hidroxilo en sus extremos por esto su nombre característico termina en diol y derivado del Propileno [48]. Sabiendo unas de sus principales características del 1,2-Propanodiol se muestra su estructura (**Figura 29**).

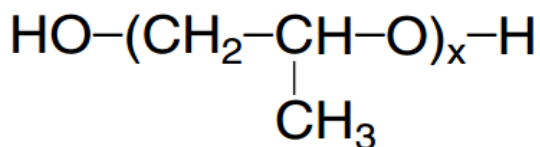


Figura 29. Estructura molecular del 1,2-Propanodiol

Los espectros infrarrojos se obtienen de las muestras PCA105, PCA106, PCH205, PCH206 y del líquido sin tratar, en la Unidad de Servicios de Apoyo a la Investigación (USAI) de la Facultad de Química en Cd. Universitaria, se utilizó el siguiente método analítico:



- Espectroscopia Infrarroja para compuestos químicos (PT-USAI-FQ-IR-001)
- Procedimiento técnico de infrarrojo por el método 1 de reflectancia
- Equipo ETIR-PE SPECTRUM 400
- Condiciones de análisis
- Intervalo espectral 4000 a 400cm<sup>-1</sup>
- Numero de barridos: 20

Al obtener el espectro de cada muestra se utilizó *Origin 8* para unir todos los espectros para observar cambios en la estructura (*Figura 30*).

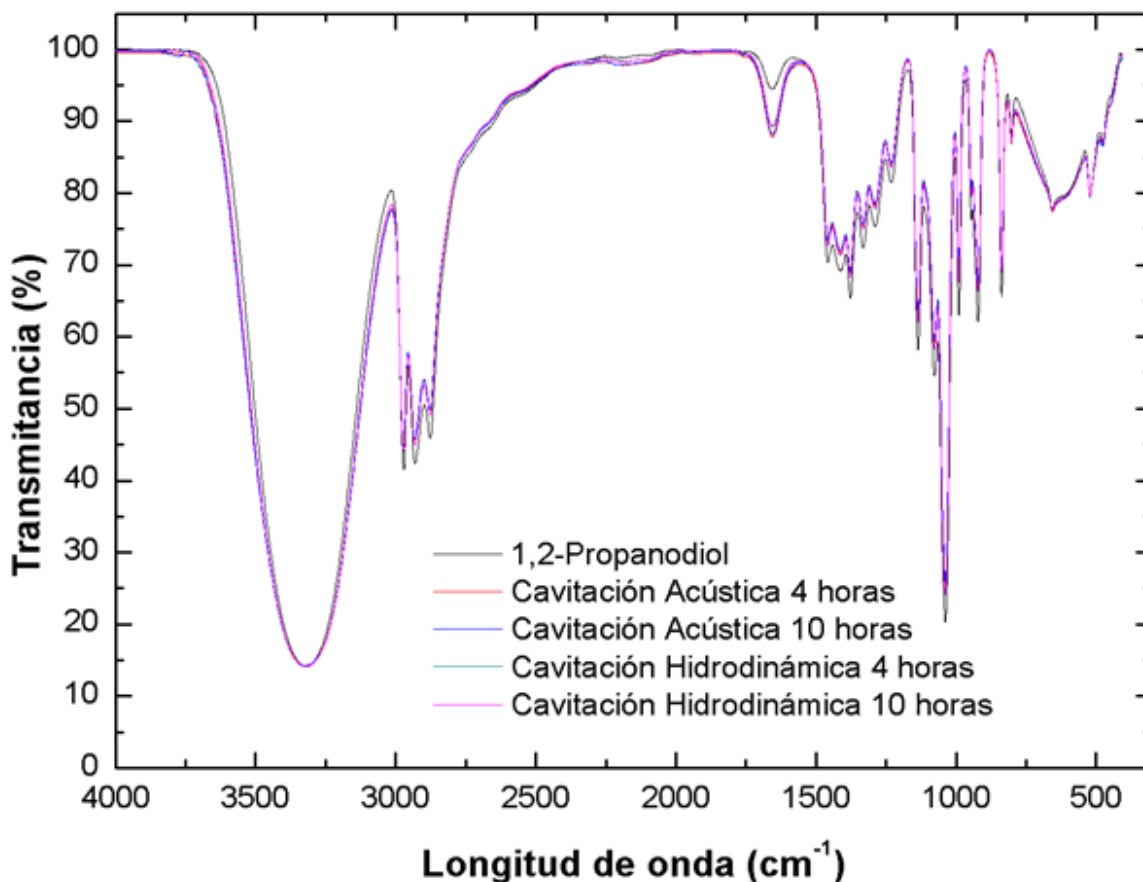


Figura 30. Espectros infrarrojos de las muestras analizadas

El espectro se caracteriza de acuerdo a la posición de los diferentes picos a lo largo de la longitud de onda, como se describe a continuación:

- Agua y alcoholes 3600-3200, 1000-675, esto es claro debido a que el 1,2.Propanodiol es un alcohol que tiene en sus extremos moléculas de hidroxilo.
- CH 3000-2800, Criterio de señales de 2 a 3 bandas se tiene CH<sub>2</sub> y CH<sub>3</sub> al observar la figura se tiene 3 bandas.
- El alquilo CH<sub>3</sub> vibra a la longitud de onda 1450-1375.
- El etileno CH<sub>2</sub> vibra a la longitud de onda 1385-1365 (*Figura 31*).

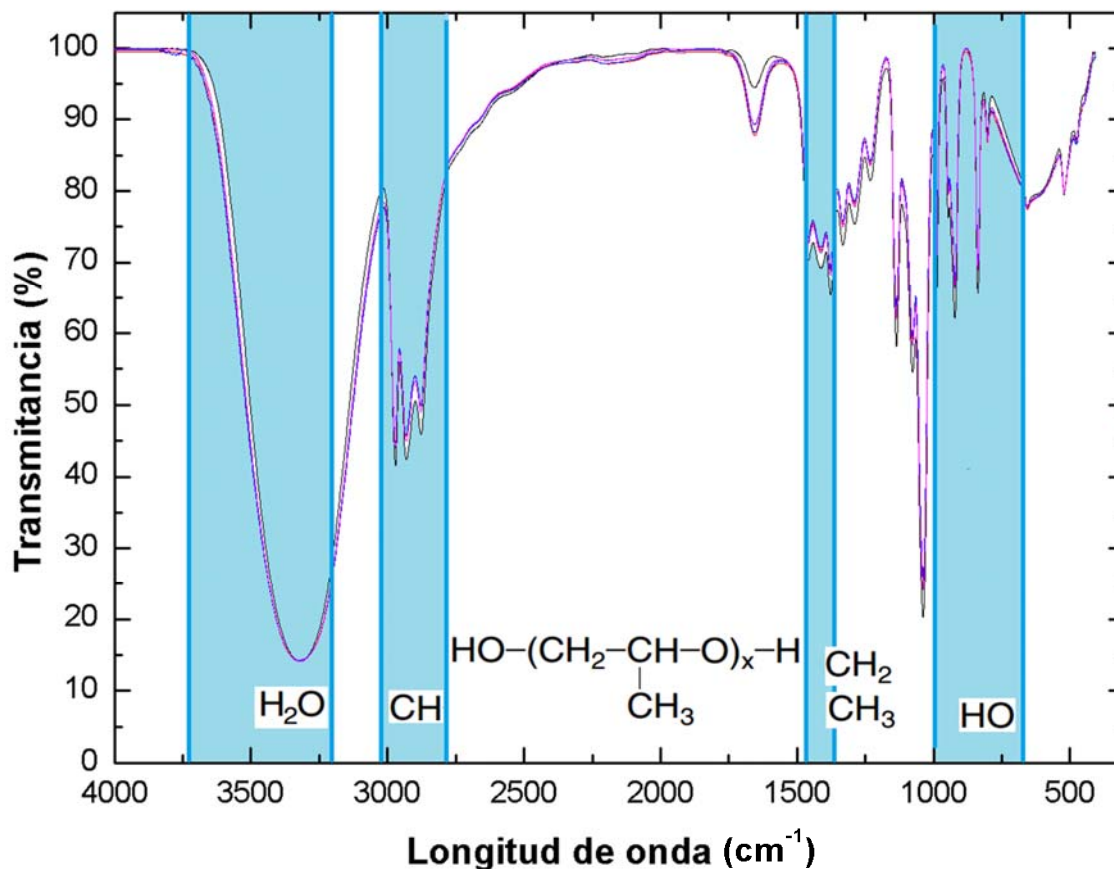


Figura 31. Caracterización del espectro infrarrojo

Se dividen las zonas donde se observan los picos que caracterizan al 1,2-Propanodiol de acuerdo con la longitud de onda a la que vibra cada compuesto. Durante las pruebas se mantienen los mismos picos con pequeñas variaciones que caracterizan a cada una de las muestras en su respectivo espectro infrarrojo, por lo tanto el líquido no presenta cambios significativos en su estructura molecular.

#### Metodología para obtener densidad

Para obtener la densidad de las muestras procesadas y líquido de referencia se emplea:

- 1. Balanza digital Scout
- 2. Matraz Aforado 25ml
- 3. Matraz Erlenmeyer 250ml
- 4. Vaso de precipitado 600ml
- 5. Vaso de precipitado 50ml
- 6. Jeringa con aguja 5ml
- 7. Bomba de vacío marca Alcatel
- 8. Matraz Erlenmeyer con esponja

En la siguiente imagen se muestran los instrumentos de laboratorio que se utilizan para realizar las mediciones (**Figura 32**).



Figura 32. Instrumentos para la medición de la densidad

### Proceso de medición

#### I. Desgasificación

La metodología que se siguió para realizar las mediciones se describen a continuación (**Figura 33**).

- Vaciar uno de los tres fluidos a analizar en el matraz Erlenmeyer
- Colocarlo en el soporte universal.
- Conectarlo a la bomba de vacío.

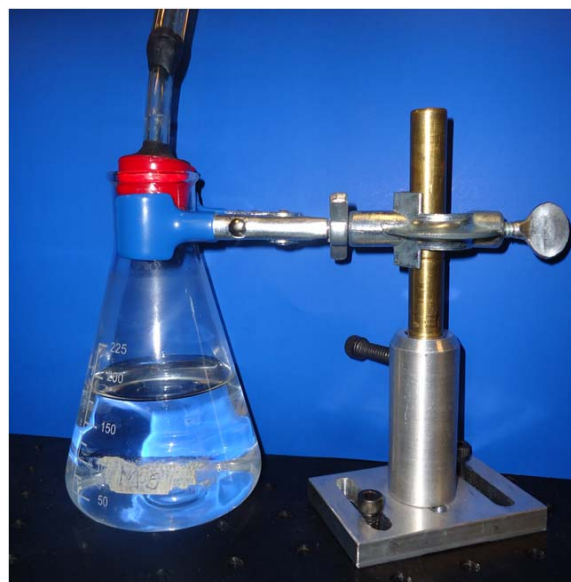


Figura 33. Imagen de la trampa para desgasificación

- La bomba de vacío está conectada a un matraz con esponja que funciona como un filtro (**Figura 34**).

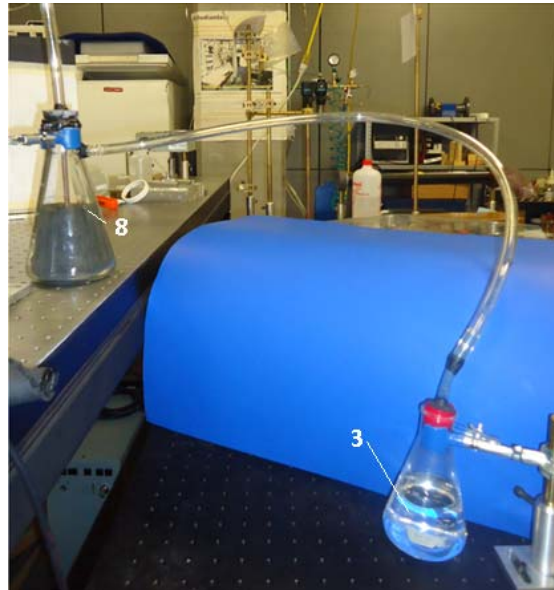


Figura 34. Equipo de desgasificación

- El sistema se encuentra conectado a una bomba de vacío (**Figura 35**).



Figura 35. Bomba de vacío

- La desgasificación dura 10 minutos y se repite para cada una de las siguientes muestras.
  1. 1,2-Propanodiol
  2. Prueba 1 Sonotrodo
  3. Prueba Hidrodinámica

## II. Cálculo de la densidad

- El matraz aforado va hacer nuestra base para realizar el cálculo de la densidad (**Figura 36**) [49].

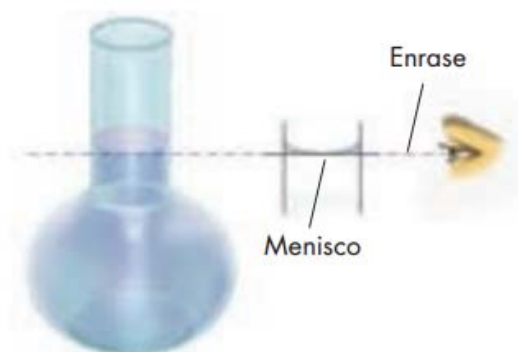


Figura 36. Esquema del enrazado del matraz

- Se utiliza el vaso de precipitado de 50 ml para vaciar cada uno de los fluidos mencionados en el matraz aforado de 25 ml (**Figura 37**).
- La jeringa se utiliza para una mayor precisión.



Figura 37. Matraz aforado de 25 ml con 1,2-Propanodiol

- Se realizan cinco mediciones para cada muestra.
- Primero se pesa el matraz aforado vacío.
- Se pesa el matraz con el líquido de trabajo.
- Se resta peso del matraz aforado al peso total.
- Se calcula la densidad para un matraz de 25ml.
- La temperatura se mantiene a 25°C durante las mediciones.

En las siguientes tablas se muestran los resultados para cada medición y cada muestra.

## 1,2-Propanodiol de referencia

Tabla 23. Cálculo de la densidad 1,2-Propanodiol

Masa de referencia del matraz aforado vacío [g]	Masa total con fluido [g]	Masa del fluido [g]	Volumen del matraz aforado [ml]	Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]
19.66	45.37	25.71	25	1028.4
19.66	45.36	25.70	25	1028.0
19.66	45.39	25.73	25	1029.2

## Prueba Cavitación acústica 1

Tabla 24. Cálculo de la densidad prueba 1 sonotrodo

Masa del matraz aforado vacío [g]	Masa total con fluido [g]	Masa del fluido [g]	Volumen del matraz aforado [ml]	Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]
19.66	45.49	25.83	25	1033.2
19.66	45.5	25.84	25	1033.6
19.66	45.49	25.83	25	1033.2

## Prueba Hidrodinámica 1

Tabla 25. Cálculo de la densidad prueba 1 hidrodinámica

Masa del matraz aforado vacío [g]	Masa total con fluido [g]	Masa del fluido [g]	Volumen del matraz aforado [ml]	Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]
19.66	45.47	25.81	25	1032.4
19.66	45.48	25.82	25	1032.8
19.66	45.47	25.81	25	1032.4

La densidad promedio de las muestras en la **tabla 26**

Tabla 26. Densidades de las muestras procesadas

Muestra	Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]
1,2-Propanodiol / Referencia	1028.53±0.61
Prueba Sonotrodo 1	1033.33±0.23
Prueba Hidrodinámica 1	1032.53±0.23

La densidad del 1,2-Propanodiol sin tratamiento es menor en comparación con las dos muestras que se les aplicó cavitación hidrodinámica y acústica. Este aumento es debido a efectos físico-químicos específicos que se manifiestan durante el colapso de las burbujas. Las moléculas en

estado líquido de agua y alcoholes se encuentran más cercanas formando puentes de hidrogeno provocando un aumento en la densidad, de esta manera se forman cadenas cortas de 1,2-Propanodiol que tienen Hidroxilo en sus extremos los cuales buscan formar puentes de hidrogeno con cadenas vecinas [37].

## 5.4 Cálculo de la energía suministrada a los sistemas generadores de cavitación hidrodinámica y acústica

Los sistemas que se utilizaron para generar la cavitación hidrodinámica y acústica, se alimentaron de una fuente de energía eléctrica.

El circuito hidrodinámico lo conforma una bomba de 5 HP que es la fuente principal para que se genere la cavitación hidrodinámica. La bomba está conectada a un variador de frecuencias el cual demanda una corriente, al generar la cavitación se obtuvo una corriente de 9.4 Amperes. Ésta, se relaciona con el voltaje en una conexión trifásica de 220 V y aplicando la **fórmula 5.4** obtenemos una potencia de 1790 W. El sistema que se implementó para generar cavitación acústica se alimenta con un generador de 750 W, por lo que la potencia suministrada es la misma durante las pruebas con cavitación acústica. Al comparar la energía suministrada al circuito hidrodinámico y acústico, sin considerar las pérdidas debido a que es la energía que demandan los sistemas para su funcionamiento, considerando la cantidad de 1,2-Propanodiol tratado obtenemos los siguientes resultados (**Tabla 27**).

Tabla 27. Potencia suministrada a los sistemas experimentales

Sistema	Potencia [W]	Litros [L]
Hidrodinámico	1790	70.0
Acústico	750	0.5

Al obtener el valor para 500 ml, ya que es la cantidad máxima de 1,2-Propanodiol tratada por cavitación acústica, obtenemos lo siguiente (**Tabla 28**).

Tabla 28. Potencia total suministrada a 500 ml

Sistema	Potencia [W]	Litros [L]
Hidrodinámico	12.78	0.5
Acústico	750	0.5

La energía suministrada en el sistema de cavitación acústica es mayor a la del sistema de cavitación hidrodinámica en un mismo volumen de líquido, a pesar que la disminución de la viscosidad es similar. Por lo que el sistema de cavitación acústica no es recomendable para tratar grandes volúmenes de líquidos. Por lo que la cavitación hidrodinámica tiene un beneficio mayor respecto al tratamiento acústico.

## Conclusiones y recomendaciones

Desde hace algunos años, la cavitación dejó de ser un fenómeno indeseado para pasar a ser un proceso con una gran cantidad de aplicaciones, entre las cuales se tiene la aceleración de reacciones químicas, limpieza y desinfección de agua y actualmente en la disminución de viscosidad del petróleo y sus derivados. Sin embargo en esta última aplicación no existen dispositivos con aplicaciones industriales. Como se sabe, para generar cavitación se requiere lograr la formación de cavidades o burbujas, su crecimiento e implosión.

Como el objetivo es estudiar el efecto de la cavitación acústica e hidrodinámica sobre la viscosidad en líquidos, se tienen dos sistemas cavitantes que se preparan para procesar al 1,2-Propanodiol. El primero produce cavitación acústica usando un generador ultrasónico “sonotrodo” con potencia variable la cual se mantiene al 100% a 750 W y 20 kHz y cuyo sonotrodo se encuentra inmerso en un recipiente de 500 ml acondicionado con un sistema de enfriamiento. El segundo, es un circuito hidráulico, el cual consta de una bomba centrífuga con control de velocidad y su impulsor modificado, un tubo Venturi, un sistema de enfriamiento y un tanque de almacenamiento de 70 litros.

Ambos sistemas se usan para disminuir la viscosidad del 1,2-Propanodiol durante un periodo de 10 horas. Se verifica la estabilidad molecular del líquido procesado con espectroscopía IR. Para la cavitación hidrodinámica se calcula un número de cavitación de 0.45 y para la cavitación acústica de 0.39. Para determinar sus curvas de viscosidad vs temperatura se aplica viscosimetría rotatoria. Al comparar las curvas se observa una reducción en la viscosidad de 30% en ambos sistemas. Aún así, la energía suministrada en cada proceso es diferente; en el proceso acústico se aplican 1500 W/l y en el proceso hidrodinámico 25 W/l.

Por todo lo anterior se comprueba que la cavitación es un medio viable para disminuir la viscosidad de líquidos ya que disminuye los enlaces secundarios y fuerzas electrostáticas. Además la cavitación hidrodinámica es un método más eficiente ya que necesita una menor cantidad de energía para procesar grandes volúmenes de líquido de forma continua.

Para darle continuidad a este proyecto se hacen las siguientes recomendaciones:

- a) Instrumentar al circuito con dispositivos apropiados para flujo bifásico.
- b) Implementar un sistema de enfriamiento automático en el sistema generador de cavitación acústica.
- c) Adquirir cilindros del viscosímetro para medir muestras menores a 600 ml o un accesorio tipo plato-cono.



## Referencias

- [1] Rayleigh L. *On the pressure developed in a liquid during the collapse of a spherical cavity*. Philanthropic Mag 34:94–98. 1917
- [2] Gogate PR, Pandit AB. En: Pankaj, Ashokkumar A, Eds. *Cavitation and Usage Without Ultrasound: Hydrodynamic Cavitation*. Springer Science y Business Media B. V. 2009; p.69-106
- [3] Nunez G, Briceno M, Mata C, Rivas H. Flow characteristics of concentrated emulsions of very viscous oil in water systems. *J Rheol* 1996; p. 40:405
- [4] Ghannam MT, Hasan SW, Esmail N. *Heavy crude oil viscosity reduction and rheology for pipeline transportation*. *Fuel*. 2010; p. 89:1095–1100
- [5] Ghannam MT, Hasan SW, Abu-Jdayil B, Esmail N. *Rheological properties of heavy & light crude oil mixtures for improving flowability*. *J. of Petroleum Science and Engineering*. 2012; p. 81:122–128
- [6] Hernández J. *Tesis: Emulsificación de un líquido viscoso en agua*. Facultad de Ingeniería, UNAM. 2007
- [7] Pal R, Rhodes E. Viscosity/concentration relationships for emulsions. *J. Rheol*. 1989; p. 33:1021-1045
- [8] Padalka ES, *Ultrasound in the Petroleum Industry*. Gosudarstvennoe Izd. Tekhn. Lit., Kiev, 1962
- [9] Berlizov YS, Nesterenko AI. *The possibility of cracking hydrocarbons with cavitation*. *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*. 2007; p. 43:515-518
- [10] Lecoffre Y. *Cavitation, Bubble Trackers*. A. A. Balkema. 1999
- [11] Gogate PR, Mededovic-Thagardb S, McGuirec D, Chapas G, Blackmond J, Cathey R. Hybrid reactor based on combined cavitation and ozonation: From concept to practical reality. *Ultrasonics Sonochemistry* 2014; p. 21:590–598
- [12] Chand R, Inceb NH, Gogate PR, Bremnera D. Phenol degradation using 20, 300 and 520 kHz ultrasonic reactors with hydrogen peroxide, ozone and zero valent metals. *Separation and Purification Technology* 2009; p. 67:103–109
- [13] Kenneth S. *Sonoluminescence and sonochemistry*. *Encyclopedia of Physical Science and Technology* (Third Edition). 2003, p. 363–376
- [14] Gore MM, Saharan VK, Pinjari DV, Chavan PV, Pandit AB. Degradation of reactive orange 4 dye using hydrodynamic cavitation based hybrid techniques. *Ultrasonics Sonochemistry* 2014; p. 21: 1075-1082
- [15] Huang Y, Wu Y, Huang W, Yang F, Ren X. Degradation of chitosan by hydrodynamic cavitation. *Polymer Degradation and Stability*. 2013; p. 98:37-43
- [16] Ecosphere Technologies Inc. *Industrial Water Management Solutions*. Disponible en <http://www.ecospheretechnology.com> (Consultado en: Junio 10, 2014)
- [17] Kosjuk OV, Litvinenko AA, Kravets BK, *Method of obtaining Free Disperse System and device for effecting same*. Estados Unidos, Patente 5492654, 20 Febrero 1996
- [18] Arisdyn Systems. Disponible en: <http://www.arisdyn.com/home.asp> (Consultado en: Junio 10, 2014)
- [19] Cavitation Technologies, Inc: *CTI Water Treatment Process, From Science to Technology*. <http://ctinanootech.com/> (Consultado en: Junio 10, 2014)
- [20] Gordon A, Gorodnitsky M, del Rey M, Promotov M y Grichko V. Flow-through cavitation-assisted rapid modification of crude oil. Estados Unidos, Patente 0101978 A1, 29 Abril 2010
- [21] Hsiao CT, Wu X, Ma J, Chahine GL. Numerical and Experimental Study of Bubble Entrainment due to a Horizontal Plunging Jet. *International Shipbuilding Progress*. 2013; p. 60:435-469
- [22] Loraine G, Chahine G, Hsiao C, Choi J, Aley P. Disinfection of gram-negative and gram-positive bacteria using DYNAJETS hydrodynamic cavitating jets. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2012; p. 19: 710-717

- [23] Mancosky D, Milly P. Controlled Cavitation for Scale-Free Heating, Gum Hydration and Emulsification in Food and Consumer Products. *Ultrasound Technologies for Food and Bioprocessing*. Springer New York. 2011; p. 191-210
- [24] Ovivo: Eimco Water Technologies. Disponible en: <http://www.ovivowater.us/en/Eimco-Water-Technologie> (Consultado en: Junio 10, 2014)
- [25] VRTX: Dynamic Water Technologies. Disponible en: <http://vrtxtech.com/> (Consultado en: Junio 10, 2014)
- [26] Benito JC. Tratamiento físico por cavitación hidrodinámica contra la bacteria: legionella pneumophila. II Congreso Egarense, Legionela y Calidad del aire: el reto de hoy. Terrassa, España, 22 y 23 Noviembre, 2006
- [27] Kuiper G. Cavitation in Ship Propulsion. 2010; p. 9-10.
- [28] Akhatov I, Lindau O, Topolnikov A, Mettin R, Vakhitova N, Lauterborn W. *Collapse and rebound of a laser-induced cavitation bubble*. *Physics of Fluids*. 2001; p. 13: 2805-2819
- [29] Cook JA, Gleeson AM, Roberts RM, Rogers RL. A spark-generated bubble model with semi-empirical mass transport. *Journal Acoustical Society of America*. 1997; p. 101:1908-1920
- [30] Knapp RT, Daley JW, Hammitt RG. *Cavitation*. McGraw-Hill, New York. 1970
- [31] Carrillo OE, Galindo G, García I. Tesis: Reproducción de cavitación hidrodinámica luminiscente para limpieza de agua a nivel terciario. Facultad de Ingeniería, UNAM. 2012
- [32] Kanthale PM, Gogate PR, Pandit AB, Wilhelm AM. Dynamics of cavitation bubbles and design of a hydrodynamic cavitation reactor: cluster approach. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2005; p. 12: 441- 452
- [33] Youn FR. *Sonoluminescence*. CRC PRESS, United States of America. 2005. p.70
- [34] Potter MC, Wiggert DC. *Mécanica de fluidos*. Pearson Education, México. 1998
- [35] Soto-Ruiz KM, Peacock WF, Varon J. The men and history behind the venturi mask. University General Hospital, Texas Medical Center, Houston USA, 2010
- [36] Ruiz G. Historia del Tubo Venturi. XXII Congreso Nacional de Hidráulica. Guerrero, México, Noviembre 2012
- [37] Medición de flujo, Tubo Venturi. Disponible en [http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/djean/index\\_archivos/Documentos/I5\\_Medicion\\_de\\_flujo%20A.pdf](http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/djean/index_archivos/Documentos/I5_Medicion_de_flujo%20A.pdf) (Consultado en: Julio 03, 2014).
- [38] Rivas I. Tubos Venturi, Dall y Tobera. Instituto Mexicano de la tecnología del agua, Comisión Nacional del Agua. Diciembre 2001
- [39] ISO 5167-1:2003 Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full -- Part 1: General principles and requirements. Disponible en: [http://www.iso.org/iso/catalogue\\_detail.htm?csnumber=28064](http://www.iso.org/iso/catalogue_detail.htm?csnumber=28064) (Consultado en: Julio, 2014)
- [40] Godinez FA, Navarrete M, Sánchez-Ake C, Mejía-Uriarte EV, Villagrán-Muñiz M. Spectroscopic and thermodynamic features of conical bubble luminescence. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2012; 19:668-681
- [41] Cruz S. Tesis: Detección pasiva de agentes de contraste por arreglo confocal. Programa de Posgrado en Ingeniería, UNAM, 2013
- [42] Bajic DM, Ivaniš GR, Visak ZP, Zivkovic EM, Šerbanovic SP, Kijevcanin ML. Densities, viscosities, and refractive indices of the binary systems (PEG200 + 1,2- propanediol, +1,3-propanediol) and (PEG400 + 1,2-propanediol, +1,3-propanediol) at (288.15 to 333.15)K and atmospheric pressure: Measurements and modeling. *J. Chem. Thermodynamics*. 2013; p. 57:510–529
- [43] Riddick JA, Bunger WB. *Organic Solvents: Physical properties and methods of purification. Techniques of chemistry*; Vol. 2. 1970; p. 199

- [44] Válvulas y termoplásticos industriales, Tubería hidráulica de PVC Cedula 80 CEMENTAR ASTM. Disponible en <http://www.tuberiadepvc.mx/Tuberia-Hidraulica-de-PVC-Cedula-80.html> (Consultado en: Mayo 16,2014)
- [45] Boylestad R. Introducción al análisis de circuitos. Pearson Educación. 2004. Pp 700
- [46] Leighton TG. What is ultrasound?. Progress in Biophysics & Molecular Biology. 2007; 93:3-38
- [47] The Physics Classroom. Intensity and the Decibel Scale. Disponible en <http://www.physicsclassroom.com/class/sound/Lesson-2/Intensity-and-the-Decibel-Scale> (Consultado en Junio 20, 2014)
- [48] Alcoholes, Alcoholes, Fenoles y Eteres. Disponible en <http://www.guatequimica.com/tutoriales/oxigenados/Alcoholes.htm> (Consultado en Junio 6,2014)
- [49] Disoluciones, diluciones y densidades, Enrasado del matraz aforado. Disponible en <http://www.mcgraw-hill.es/bcv/guide/capitulo/8448184491.pdf> (Consultado en: Mayo 19,2014).
- [50] De las Heras S. Fluidos, bombas e instalaciones hidráulica. Bombas hidráulicas. España: Universidad Politécnica de Catalunya. 2011; p. 121
- [51] Bombas, Bombas rotatorias y bombas alternativas. Disponible en: <http://biblioagora.ucevalpo.cl/docs/1045/Apuntes%20III%20BOMBAS.pdf> (Consultado en Junio 06, 2014)
- [52] Maquinas hidraulicas y termicas, Bomba centrifuga. Disponible en <http://www.itescam.edu.mx/principal/sylabus/fpdb/recursos/r75171.pdf>. (Consultado en Junio 06,2014)
- [53] Rodríguez GJ, Vírgos RJ, Fundamentos de óptica ondulatoria. El espectro electromagnético. Universidad de Oviedo, 1998; p. 37
- [54] Casbo GJ, Estructura atómica y enlace químico, El espectro electromagnetico, España: Reverté, 2007; p. 26
- [55] Quesada M.S., *Manual de experimentos de laboratorio para bioquímica*. Espectrofotometría. Costa Rica: EUNED, 2007; p. 11
- [56] Morrison T.R., Boyd N.R., Organic Chemistry. Espectroscopia Infrarroja. Dorling Kindersley: Pearson, 2005; p. 564
- [57] Galiana MT, Gran diccionario de las ciencias, Espectrograma, Paris:Larousse, 1987; p. 403-404
- [58] Viscosímetros rotacionales, Principio de funcionamiento de los viscosímetros. Disponible en [http://www.grupo-selecta.com/pdfs/es/cats/catpdf\\_es\\_26.pdf](http://www.grupo-selecta.com/pdfs/es/cats/catpdf_es_26.pdf) (Consultado en: Abril 14,2014)
- [59] Levitt BP, Química Física práctica de findlay, Viscosidad, España: Reverté, 1979; p. 103-104

# Anexos

## A. Clasificación de las Bombas

Según varios autores han definido a las Turbobombas mejor conocidas como bombas de la siguiente manera. Las turbomáquinas son los dispositivos de uso común que proporcionan energía a o extraen energía de un fluido en movimiento. La bomba añade energía al sistema, aumentando la presión en él [32].

Una bomba hidráulica es una máquina generadora que trabaja con un fluido incompresible en la que se produce una transformación de energía mecánica en hidráulica [50].

Las bombas se clasifican en tres tipos principalmente

- Émbolo rotativo
- Émbolo alternativo
- Rotodinámicas

**Bombas rotatorias:** Las bombas rotatorias, que generalmente son unidades de desplazamiento positivo, consisten de una caja fija que contiene engranajes, pistones, levas, tornillos, que operan con un claro mínimo. Una bomba rotatoria lo atrapa, lo empuja contra la caja fija. La bomba rotatoria descarga un flujo continuo. Aunque generalmente se les considera como bombas para líquidos viscosos, las bombas rotatorias no se limitan a este servicio solo, pueden manejar casi cualquier líquido que esté libre de sólidos abrasivos.

**Bombas alternativas:** Las bombas alternativas o reciprocas son también unidades de desplazamiento positivo descargan una cantidad definida de líquido durante el movimiento del pistón o émbolo a través de la distancia de carrera. En este tipo de bombas el fluido se desplaza mediante movimiento alternativo; al moverse en un sentido succiona y en el sentido inverso expulsa [51].

**Bombas centrifugas:** La característica principal de la bomba centrífuga es la de convertir la energía de una fuente de movimiento (el motor) primero en velocidad (o energía cinética) y después en energía de presión. El rol de una bomba es el aporte de energía al líquido bombeado (energía transformada luego en caudal y altura de elevación), según las características constructivas de la bomba misma y en relación con las necesidades específicas de la instalación. El funcionamiento es simple: dichas bombas usan el efecto centrífugo para mover el líquido y aumentar su presión.

Dentro de una cámara hermética dotada de entrada y salida (tornillo sin fin o voluta) gira una rueda con paleta (rodete), el verdadero corazón de la bomba. El impulsor es el elemento rodante de la bomba que convierte la energía del motor en energía cinética (la parte estática de la bomba, o sea la voluta, convierte, en cambio, la energía cinética en energía de presión). El impulsor está, a su vez, fijado al eje bomba, ensamblado directamente al eje de transmisión del motor o acoplado a él por medio de acoplado rígido. Cuando entra líquido dentro del cuerpo de la bomba, el rodete (alimentado por el motor) proyecta el fluido a la zona externa del cuerpo-bomba debido a la fuerza centrífuga producida por la velocidad del impulsor; el líquido, de esta manera, almacena una energía (potencial) que se transformará en caudal y altura de elevación (o energía cinética) [52]. La

bomba que cuenta el circuito hidrodinámico cuenta con un impulsor del tipo radial que ha sido modificado para generar burbujas que faciliten la generación de cavitación hidrodinámica.

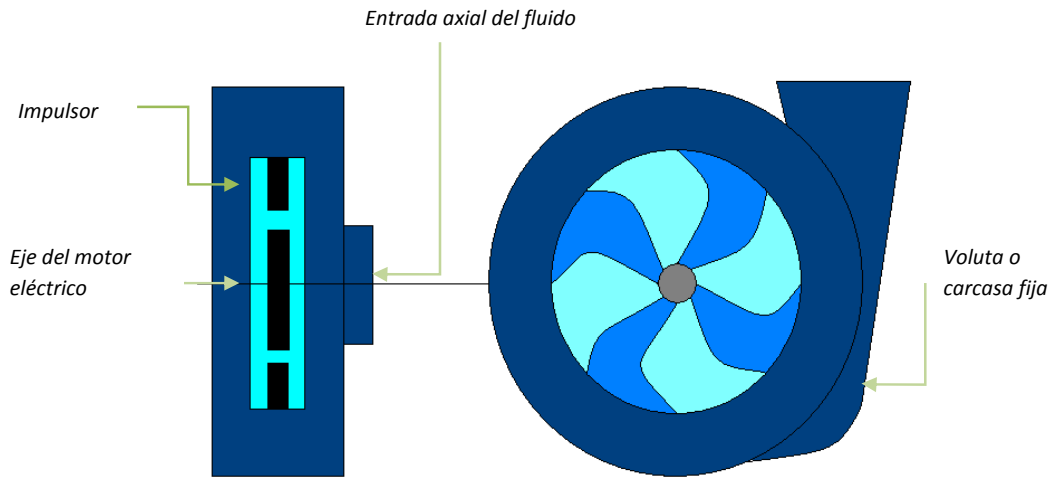


Figura 38. Representación esquemática del interior de la carcasa de una bomba centrífuga

## B. Espectro Electromagnético

En general, se llama espectro de una radiación compuesta al conjunto de las frecuencias que contiene. En principio, todos los estudios sobre las ondas luminosas se referían a las ondas correspondientes al espectro visible, cuyas longitudes de onda están comprendidas entre  $4 \times 10^{-5}$  y  $7.5 \times 10^{-5}$  cm. En el año 1800, proyectando el espectro solar sobre una serie de termómetros, W. Herschel descubrió, por la elevación de temperatura fuera de la luz visible, la zona infrarroja del espectro. En la misma época, Ritter y Wollaston descubrieron por el ennegrecimiento de las sales de plata la zona ultravioleta. Cuando Hertz descubrió la forma de generar ondas de distinta frecuencia, se extendió el espectro electromagnético por el lado de las ondas largas hasta las ondas kilométricas de radio, y por el lado de las cortas hasta enlazar las centimétricas del infrarrojo. Más tarde, en 1895 Röntgen descubrió los rayos X, y con el descubrimiento de la radioactividad por Becquerel en 1896 el espectro electromagnético se extiende hasta la radiación  $\gamma$  (gamma) de muy corta longitud de onda [53,54].

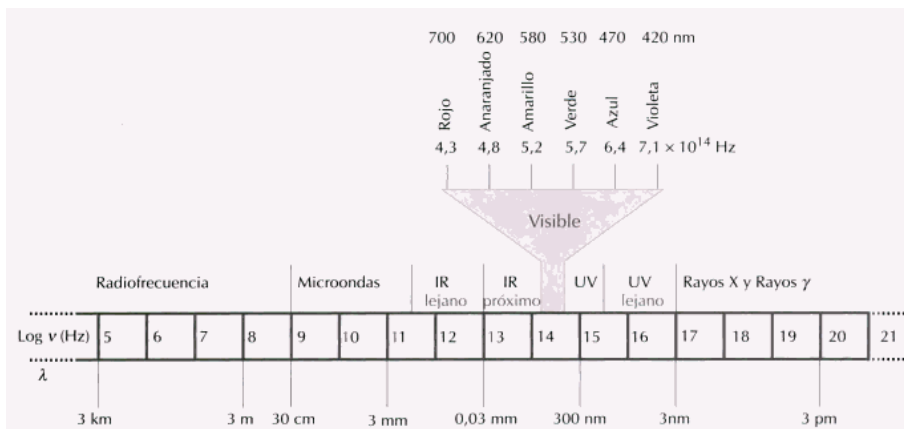


Figura 39. Esquema del espectro electromagnético

Por medio de un espectro de absorción, se determina la longitud de onda ( $\lambda$ ) óptima de absorción de una sustancia dada. El espectro de absorción de una sustancia se obtiene midiendo la absorbancia de la muestra a diferentes longitudes de onda; si se trabaja en el espectro visible, el rango de medición es desde 400nm hasta 700nm. Luego, se grafica la absorbancia vs la longitud de onda, y se encuentra la longitud de onda que corresponde con el punto máximo de absorbancia de la muestra. El espectro de absorción es característico para cada sustancia y la forma de la curva es igual para una misma sustancia a diferentes concentraciones [55].

### C. Espectroscopia Infrarroja

Espectroscopia infrarroja (Espectroscopia IR) es la rama de la espectroscopia que trata con la parte infrarroja del espectro electromagnético. Esta cubre un conjunto de técnicas, siendo la más común una forma de espectroscopia de absorción o transmitancia. Así como otras técnicas espectroscópicas, puede usarse para identificar un compuesto e investigar la composición de una muestra [57].

De todas las propiedades de un compuesto orgánico, la que da más información acerca de su estructura es su espectro infrarrojo. Una molécula vibra constantemente, sus enlaces se alargan y contraen. La absorción de la luz infrarroja produce cambios en las vibraciones de una molécula; la luz que se encuentra más allá (frecuencia menor, longitud de onda mayor, energía menor) del rojo del espectro visible [56]. Cada enlace químico en una molécula vibra a una frecuencia característica y, generalmente, esta frecuencia se encuentra dentro del intervalo de la radiación infrarroja.

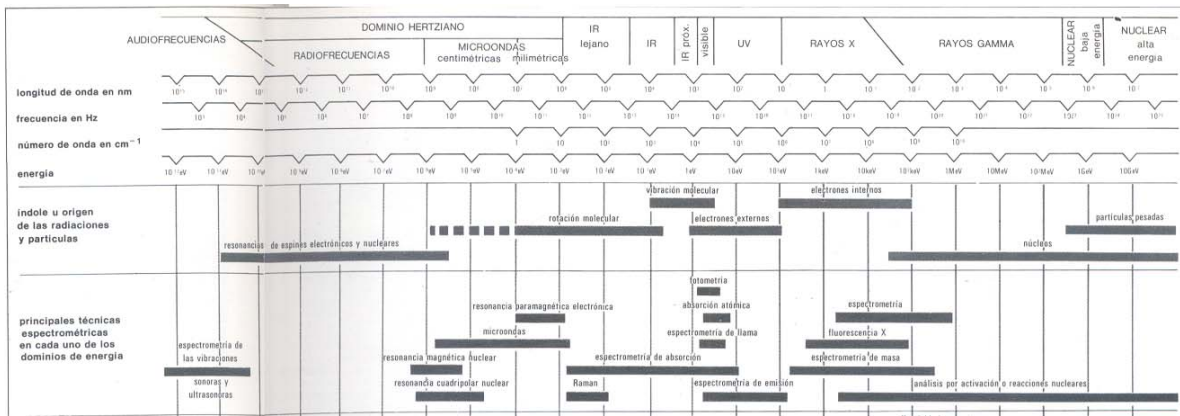


Figura 40. Esquema de las principales técnicas espectrométricas

### D. Tipos de Viscosímetro

La viscosidad se obtiene como resultado de la relación entre el esfuerzo tangencial y la deformación de corte. La viscosidad depende en gran parte de las condiciones ambientales tales como temperatura y presión. La medida de la viscosidad ha ido más allá del campo de la investigación e incluso del laboratorio, entrando progresivamente en el campo del control industrial [58].

**Viscosímetro de caída de esferas:** Se mide el tiempo de caída de una determinada bola a una determinada distancia por dentro de un tubo cilíndrico con el líquido. Sin embargo, son imprescindibles ciertas correcciones a consecuencia de la influencia de las paredes y del fondo del tubo. Este método es particularmente adecuado para fluidos viscosos, de los que se disponga de bastante cantidad.

**Viscosímetro capilar:** Se basan en el principio de funcionamiento del viscosímetro de Ostwald el cual es un tubo U donde la rama izquierda es en esencial una pipeta con dos marcas definidas A y B, y un capilar de paredes resistentes C, a través del cual el líquido contenido en el ensanchamiento D fluye por la acción de la gravedad hacia el ensanchamiento E, situado en la rama derecha. Cuando el menisco para por el enrase A se pone en marcha un cronómetro que se para cuando el menisco para por el enrase B y este tiempo debe ser registrado [59].

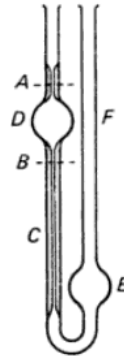


Figura 41. Diagrama del viscosímetro de Ostwald

**Viscosímetro Rotatorio:** estos instrumentos operan por medio de la rotación de un cilindro o disco (husillo) el cual se sumerge en el fluido a analizar midiendo su resistencia a una velocidad seleccionada. La resistencia resultante o par es la medida del flujo de viscosidad, dependiendo de la velocidad y características del husillo [59]; El viscosímetro rotatorio funciona sumergiendo un husillo al fluido de trabajo, lo recomendable es no generar burbujas en el husillo ya que arrojaría lecturas erróneas, se selecciona una velocidad de rotación determinada dentro de un rango de operación del viscosímetro y el par resultante necesario para girar el husillo es proporcional a la viscosidad dependiendo de la geometría del husillo, el tipo de fluido y la temperatura y se ve reflejada en una visualización analógica o digital.

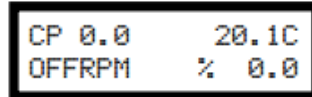
Los husillos son proporcionales a la viscosidad de los fluidos, entre menos viscosos sean se necesitan husillo de diámetros y longitudes grandes, ya que se necesita una área de contacto mayor para generar una obstrucción al giro, mientras que para fluidos muy viscosos el área de contacto es mínima ya que básicamente lo que se necesita es cortar el fluido de trabajo por lo general son discos delgados en las siguientes **Figura 43**, se muestran un viscosímetro digital Brockfield y una variedad de husillos.



Figura 42. Husillo y viscosímetro digital marca Brockfield

## E. Cómo usar el viscosímetro

- Cada que se enciende el viscosímetro, automáticamente se pone en cero. La misma pantalla irá guiando el procedimiento.
- Después de un tiempo aparecerá una pantalla que pide que retire el husillo
- Pide remplazar el husillo y presionar cualquier botón y queda una pantalla así:



CP 0.0      20.1C  
OFFRPM      % 0.0

- Se selecciona el husillo y se oprime el botón SELECT SPINDLE, se selecciona el que se esté usando y se vuelve a presionar el botón SELECT SPINDLE.
- Se selecciona la velocidad del viscosímetro, con la tecla SET SPEED y con las flechas.
- Se selecciona lo que aparecerá en la pantalla, ya sea la viscosidad, Shear Stress o Shear Rate presionando el botón SELECT DISPLAY

Procedimiento para medir viscosidad:

1. Montar el sujetador e insertar el contenedor
2. Insertar y centrar el husillo hasta que el fluido este a la altura de la ranura del eje del husillo. Colocar el cabezal en el eje inferior del viscosímetro.

El proceso de selección de un husillo y la velocidad de un fluido desconocido es normalmente de ensayo y error. Hay dos reglas que pueden ayudar:

- 1) Rango de viscosidad es inversamente proporcional al tamaño del husillo.
- 2) Rango de viscosidad es inversamente proporcional a la velocidad de rotación.

Escala de viscosidad máxima [cP]

$$cP = TK * SMC * \frac{10000}{RPM}$$

TK=constante de torque del viscosímetro=0.09373

SMC=constante del husillo

- 61=6.4
- 62=32
- 63=128
- 64=640

Dé tiempo para que la lectura indicada se estabilice. El tiempo requerido para la estabilización dependerá de la velocidad a la que el viscosímetro está en funcionamiento y las características del líquido.

3. Pulse el botón MOTOR ON / OFF / y apagar el motor "OFF" cuando se cambia de un eje, muestras o cuando se quiera hacer otra medición. Quite el eje antes de limpiarlo.