ADECUACIÓN DEL BANCO DE CAVITACIÓN DEL LABORATORIO DE BOMBAS HIDRÁULICAS PARA EL ESTUDIO A DIFERENTES TEMPERATURAS DE FLUIDO.

DAYSI DANIELA CAMARGO MARTIN
CRISTIAN JOHAN AREVALO CARVAJAL

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS
FACULTAD TECNOLÓGICA
MAQUINAS HIDRUALICASBOGOTÁ D.C.
Octubre 28 del 2016

ADECUACIÓN DEL BANCO DE CAVITACIÓN DEL LABORATORIO DE BOMBAS HIDRÁULICAS PARA EL ESTUDIO A DIFERENTES TEMPERATURAS DE FLUIDO.

DAYSI DANIELA CAMARGO MARTIN
CRISTIAN JOHAN AREVALO CARVAJAL

MONOGRAFIA

INGENIERA
YISSELLE ACUÑA
INGENIERA MECANICA

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSE DE CALDAS
TECNOLOGIA MECANICA
MAQUINAS HIDRUALICAS
BOGOTA
2016

Nota de aceptación

_____
_____
_____
_____
_____

_____
Presidente del jurado

_____
Firma del jurado

_____
Firma del jurado

Bogotá D.C. 2016

TABLA DE CONTENIDO

Pág.

TABLA DE CONTENIDO 4

TABLA DE ILUSTRACIONES 5

INTRODUCCION 7

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 8

2. ANTECEDENTES 9

3. OBJETIVO 11

3.1. OBJETIVO GENERAL 11

3.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS 11

4. DELIMITACION 12

5. MARCO TEORICO 13

6. DIAGNOSTICO BANCO SIN MODIFICAR 22

6.1. ELECCIÓN DE NUEVOS MATERIALES PARA MODIFICACIÓN 22

7. DISEÑO DEL BANCO DE PRUEBAS 24

7.1. DESCRIPCION Y CARACTERISTICAS DEL BANCO DE PRUEBAS 24

8. GUIA DE LABORATORIO 31

8.1. OBJETIVO 31

8.2. MARCO TEORICO 31

8.3. MATERIALES REQUERIDOS 33

8.4. PROCEDIMIENTO 34

8.5. TABLA DE DATOS 38

8.6. ACTIVIDADES 39

8.7. RECOMENDACIONES 39

9. RESULTADOS EXPERIMENTALES 40

9.1. TABLAS CON LOS DATOS DE LAS PRUEBAS 40

9.1. GRAFICAS 45

9.2. ANALISIS DE RESULTADOS 47

10. MANUAL DE OPERACIÓN 48

10.1. MEDIDAS DE SEGURIDAD ANTES DE PONER EN MARCHA EL BANCO. 48

10.2. PROCEDIMIENTO PARA PUESTA EN MARCHA. 49

11. MANUAL DE MANTENIMIENTO 51

11.1. MANTENIMIENTO DEL TANQUE PULMON 51
11.2. VÁLVULAS DE GLOBO Y MANÓMETROS 51
11.3. MANTENIMIENTO BOMBA 52
12. CONCLUSIONES 56
13. BIBLIOGRAFÍA 57
14. ANEXOS 58

TABLA DE ILUSTRACIONES

Figura 1. Figura Presión en la cavitación. 14
Figura 2. Rodetes deteriorados por efecto de la cavitación.} 15
Figura 3. Esquema de la instalación en la succión de una bomba. 17
Figura 4. Altura de aspiración Hs 18

Imagen 1. Bomba impulsor de nylon / Bomba actual con impulsor metálico. 23
Imagen 2.Tanque de almacenamiento 24
Imagen 3.Caudalimetro. 24
Imagen 4.Válvula de globo 1”. 25
Imagen 5.Vacuómetro 25
Imagen 6.Interruptor Bomba. 25
Imagen 7.Válvula de globo 1½”. 26
Imagen 8.Soporte metálico banco de pruebas. 26
Imagen 9.Termostato. 26
Imagen 10.Resistencia calentadora. 27
Imagen 11. Niples y manguera. 27
Imagen 12.Accesorios en CPVC. 28
Imagen 13. Bomba Centrifuga. 29
Imagen 14.Termómetro. 29
Imagen 15. Descripción de partes del banco de pruebas. 30
Imagen 16. Banco de pruebas para pruebas de cavitación. 34
Imagen 17. Sentido de giro para abrir válvulas. 35
Imagen 18. Nivel Tanque. 35
Imagen 19. Posiciones apagado. 36
Imagen 20. Selección de temperatura, en este caso 50°C. 37
Imagen 21. Avisos de precaución del banco de pruebas. 49
Imagen 22. Posición de apagado del termostato. 50

Imagen 23. Evidencia de corrosión en el tanque. 51
Imagen 24. Lugar donde se aprecia la contaminación del Caudalimetro. 52
Imagen 25. Bomba de succión. 52

Tabla 1. Presión del agua en función de la temperatura. 9
Tabla 2. Presión del vapor de agua. 13
Tabla 3. Formato para la primera parte del laboratorio. 38
Tabla 4. Formato para la segunda parte del laboratorio. 38
Tabla 5. Datos iniciales 41
Tabla 6. Cabeza reducida a 3% 41
Tabla 7. NPSHr 42
Tabla 8. Datos iniciales 42
Tabla 9. Cabeza reducida a 3% 42
Tabla 10. NPSHr 42
Tabla 11. Datos iniciales 43
Tabla 12. Cabeza reducida y npshr 44

INTRODUCCION

En el presente artículo se abarcará el tema sobre la presencia del fenómeno de cavitación variando la temperatura del fluido de trabajo, esto se realizará con ayuda del banco que hay actualmente en la universidad distrital francisco José de caldas, sede tecnológica. Por lo que para dicho proyecto será necesario cambiar las condiciones físicas del banco en cuanto a elementos, ya que se garantizará el funcionamiento sin ningún tipo de problema con agua caliente. Al realizar esta modificación, será posible realizar un análisis detallado sobre la afectación que posee esta variable, y que tanto nos aumenta o disminuye la presencia de cavitación en nuestra bomba a medida que cambiamos la temperatura. También se construirá una guía completamente nueva para nuestro banco modificado, por lo que realizaremos varios laboratorios, para poder así garantizar la metodología de esta guía renovada.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En Colombia existen varias industrias que estudian el fenómeno de cavitación para la fabricación de sus bombas, pero estos estudios los realizan generalmente a una temperatura constante, por lo que no se realizan pruebas variando la temperatura. Este es el caso del Banco de Cavitación de la Facultad Tecnológica en la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, el cual no permite el estudio del fenómeno de cavitación a temperaturas diferentes al ambiente.

Por lo que concierne a la guía de laboratorio, la actual es muy confusa; Esta guía debe ser clara para cualquier estudiante que quiera realizar esta práctica, que pueda ejecutarla simplemente con las instrucciones de dicha guía. Así que es necesaria la creación de una nueva guía de laboratorio, donde se especifiquen cada uno de los pasos que los estudiantes deben realizar para la culminación exitosa de la práctica.

Teniendo en cuenta lo anterior, surge la necesidad de adaptar el banco existente, para permitir el estudio del fenómeno de cavitación, en bombas centrífugas a diferentes temperaturas.

2. ANTECEDENTES

La referencia base para este proyecto es la realizada por los jóvenes de la universidad distrital francisco José de caldas, con el proyecto de diseño y construcción de un banco hidráulico para generar el fenómeno de cavitación. En este proyecto se encontró los primeros análisis respecto a las variables que intervienen en la cavitación, y sirvió como punto de partida para la ejecución de la modificación planteada.

La universidad industrial de Santander construyo un banco de pruebas para el estudio de cavitación en una bomba centrifuga, mediante el análisis de vibraciones mecánicas esto servía para determinar las condiciones de las operativas de la máquina y así proveer que no se vaya a detener más adelante la máquina.
La Universidad Zaragoza, Facultad de Ingeniería Mecánica, buscaba la instalación del Bucle de Cavitación Hidrodinámica y su efecto oxidante, este posibilita la realización de ensayos sobre el efecto Venturi y el teorema de Bernoulli, para el laboratorio de Mecánica de Fluidos, diseñaron el banco de pruebas de cavitación.

La cavitación es un fenómeno que aparece en líquidos, cuando la presión disminuye por debajo de la presión del vapor del líquido a la temperatura existente. Generalmente es un proceso que aparece asociado a altas velocidades. La presión del vapor para el agua, en función de la temperatura, puede encontrarse en la siguiente tabla

T [ºC]	Pv [Pa]
0	615
10	1.230
20	2.340
40	7.400
60	20.000
80	47.400
100	101.500

Tabla 1. Presión del agua en función de la temperatura.

Como consecuencia de la cavitación, aparecen núcleos de vaporización que pueden presentarse en forma de burbujas, bolsas o ambos. En esta instalación, el interés se centra en la vaporización en forma de burbujas, que tienen una duración del orden de 10-4 lo-, segundos. Cuando estas alcanzan zonas de mayor presión colapsan, cuya implosión genera altas temperaturas (75xl

03,C) y presiones (103 -104 bar) instantáneas, descomponiendo el agua en elementos extremadamente reactivos; átomos de hidrogeno (H) y radicales hidroxilos (OH). También puede observarse luminiscencia. En concreto, el radical hidroxilo es el agente oxidante más potente encontrado en la naturaleza, con un potencial de oxidación de 2,8 voltios. Durante el enfriamiento rápido, los átomos de hidrógeno y radicales hidroxilos se recombinan a peróxido de hidrogeno (H202) e hidrógeno molecular (H2), que en presencia de otros compuestos pueden dar lugar a un amplio abanico de reacciones secundarias. El resultado general es la transformación (le moléculas orgánicas en CO2 y agua, con pequeñas concentraciones de Haloideos (Ácidos y Sales) y Ácidos Orgánicos.

El banco se ilustra en la siguiente imagen

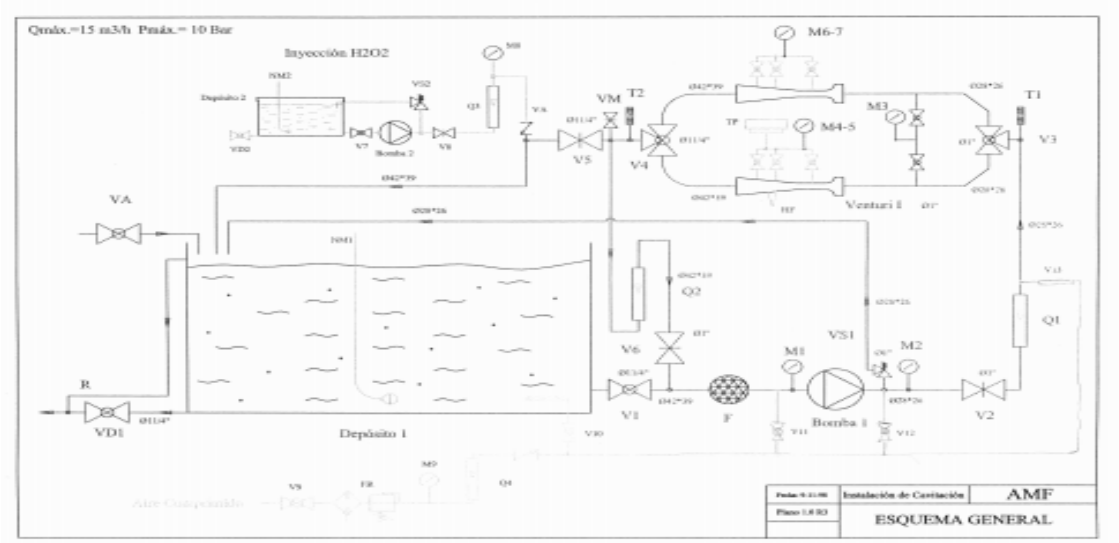


Ilustración 1. Esquema banco cavitación.

3. OBJETIVO

3.1. OBJETIVO GENERAL

Adaptar el banco de cavitación del Laboratorio de bombas hidráulicas, para el estudio a diferentes temperaturas de fluido**.**

3.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Hacer un diagnóstico del estado actual del banco de cavitación.
- Establecer las modificaciones requeridas para su funcionamiento con fluido a temperaturas mayores a la del ambiente.
- Generar las curvas de comportamiento NPSHreq Vs. Caudal y H Vs. Caudal, con base en los resultados arrojados por el banco modificado a diferentes temperaturas.
- Analizar la influencia de la temperatura en el fenómeno de cavitación en una bomba centrífuga.
- Construir una guía de laboratorio para realizar prácticas en el banco modificado.

4. DELIMITACION

El proyecto está enfocado principalmente en la adecuación del banco de cavitación, que actualmente está en el laboratorio de máquinas hidráulicas de la universidad, para que sea posible un estudio más detallado de este fenómeno cuando se eleva la temperatura del líquido, en este caso, agua. Por lo que es necesario hacer cambios a los elementos actuales, y escoger cuidadosamente los elementos extra que se requieran.

Con los valores tomados en las nuevas pruebas, será posible crear las curvas de NPSHR vs. Caudal y la de carga (H) Vs. Caudal, para lograr hacer la comparación correspondiente entre temperaturas.

En el presente trabajo no se realizarán pruebas para medir el desgaste erosivo producido por la cavitación en los materiales, tampoco se profundizará en las consecuencias que acarrea este fenómeno en el funcionamiento final de los elementos en cualquier sistema, la cavitación no constituye un efecto inevitable, sino un efecto que debe ser juzgado y evaluado desde el punto de vista de la ingeniería.

5. MARCO TEORICO

La presión de vapor o saturación (Pv) se conoce como la presión a la cual, a una temperatura dada, una sustancia comienza a evaporarse. El valor de esta presión aumenta con la temperatura y varía de acuerdo con las sustancias. En la Tabla 2, se observa como varía la presión de vapor del agua en un rango de temperaturas.

En el flujo de fluidos y las máquinas de flujo, el fenómeno de cavitación ocurre cuando la presión del fluido se hace igual o menor que la presión de vapor o saturación de ese fluido a la temperatura a la que se encuentra. En una bomba, la cavitación ocurre porque la energía en el punto de entrada del rodete, no es suficientemente alta para superar la caída de presión asociada a los cambios de dirección, choques y fricción en la entrada a los canales de los álabes.

Tabla 2. Presión del vapor de agua.

T (°C)	Pv (kPa)	T (°C)	Pv (kPa)
0	0,611	65	25,01
5	0,872	70	31,16
10	1,227	75	38,55
15	1,704	80	47,36
20	2,337	85	57,80
25	3,166	90	70,11
30	4,241	95	84,53
35	5,622	100	101,33
40	7,375	105	120,8
45	9,582	110	143,38
50	12,335	115	169,18
55	15,741	120	198,67
60	19,920	125	232,23

Los motivos por los que puede darse la cavitación pueden ser:

- Cambios bruscos de velocidad del fluido.
- Velocidades de fluido excesivas.
- Resistencia demasiado elevada en la línea de aspiración.
- Nivel de agua en el tanque demasiado alejado de la entrada de la bomba.

En la Figura 1. se observa como inicialmente el flujo se encuentra en el punto 0 en una fase líquida con la presión de entrada a la bomba (PE), pero debido a las pérdidas en la entrada de la bomba y del rodete, la presión del fluido comienza a descender. Si ésta disminuye hasta alcanzar el valor de la presión de vapor (punto 1) se inicia la formación de burbujas de vapor de fluido. En una bomba la presión del fluido alcanza su mínimo valor justo después de entrar a los canales de los álabes.

Una vez se forman las burbujas de vapor de fluido son conducidas a la zona de alta presión dentro de los canales donde implotan debido a la presión del fluido que le rodea. Al colapsar cada burbuja, el líquido alrededor tiende a ocupar el espacio que ocupaba ésta, alcanzando grandes velocidades, estas gotas aceleradas chocan con gran fuerza contra la superficie del rodete, dando origen al deterioro por cavitación, conocido como picadura como resultado de la erosión en la superficie. En la Figura 1, se observa la magnitud del deterioro causado por este fenómeno.

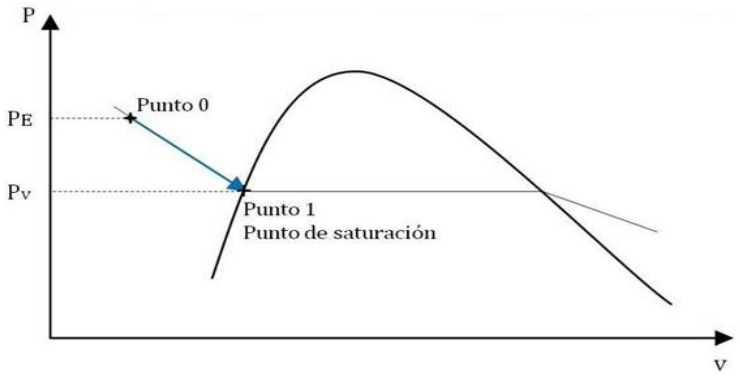


Figura 1. Figura Presión en la cavitación.

Figura 2. Rodetes deteriorados por efecto de la cavitación.}

Entre las consecuencias de este fenómeno se observan:

- Vibraciones y ruidos durante el funcionamiento de la bomba.
- Reducción en el caudal de la bomba.
- Disminución de la potencia útil y el rendimiento.
- Erosión o pitting en el rodete.

Daños provocados por la cavitación. Los daños que se producen cuando hay cavitación son la erosión del metal dentro de la bomba y la aceleración del deterioro del fluido hidráulico. Cuando una bomba hidráulica está cavitando se producen vibraciones y un característico ruido similar a la explosión de burbujas por presión. No obstante, el ruido no se detecta hasta que el vacío alcanza un valor de unos 25 cm Hg. (0,33 bar), pero el daño ya está hecho tanto si se oye como si no.

Síntomas. La forma más segura de comprobar si una bomba está cavitando es controlar la línea de aspiración mediante la instalación de un vacuómetro. Para evitar la cavitación se deberían tener en cuenta, en la medida de lo posible, los siguientes puntos:

- Mantener la entrada de la bomba hidráulica limpia y libre de obstrucciones.

- Utilizar una tubería de aspiración de diámetro interno lo suficientemente grande y de longitud lo más corta posible.
- Minimizar al máximo el número de codos en la línea de la aspiración.
- Mantener las velocidades de rotación de la bomba dentro de los márgenes nominales.

Tipos de cavitación. Hay dos tipos de cavitación, uno con flujo y otro estando el líquido estático:

(a) Cavitación por flujo.
(b) Cavitación por ondas.

Ejemplos del tipo (a) los tenemos en tuberías donde la presión estática del líquido alcanza valores próximos al de la presión de vapor del mismo, tal como puede ocurrir en la garganta de un tubo Venturi, a la entrada del rodete de una bomba centrífuga o a la salida del rodete de una turbina hidráulica de reacción. „
Los ejemplos del tipo (b) aparecen cuando estando el líquido en reposo por él se propagan ondas como las ultrasónicas denominándose Cavitación Acústica, o típicas ondas por reflexión sobre paredes o superficies libres debido a ondas de compresión o expansión fruto de explosiones y otras perturbaciones como en el caso del golpe de ariete, denominadas Cavitación por Shock.

Soluciones a la cavitación

- Eliminar las posibles turbulencias que se produzcan en las conducciones de agua produzcan en las conducciones de agua.
- Eliminar los gases disueltos en el agua.
- Disminuir la velocidad del fluido.
- Evitar que se produzcan cambios bruscos en el diámetro de las conducciones.

Ecuación de energía en la succión.

A partir del esquema de la Figura 3, se planteará la ecuación de la energía entre la superficie del depósito y la entrada de la bomba, con el fin de determinar la presión en la entrada de la bomba, con la salvedad que las presiones se trabajaran en escala absoluta.

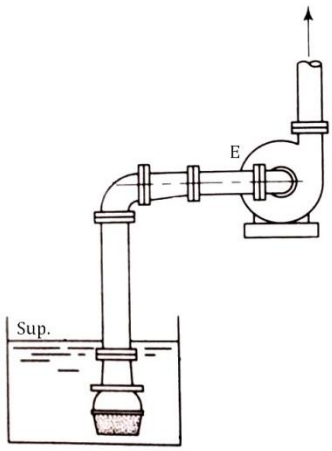


Figura 3. Esquema de la instalación en la succión de una bomba.

$$\frac{p_{sup}}{\gamma} + \frac{v_{sup}^2}{2g} + z_{sup} + \overset{0}{\widehat{H}} - \overset{0}{\widehat{h_r}} - h_{Lsucc} = \frac{p_E}{\gamma} + \frac{v_E^2}{2g} + z_E$$

Entre la superficie del depósito de succión y la entrada de la bomba no se encuentran dispositivos que adicionen o retiren energía, por lo cual se hacen igual a cero los términos H y h_r.

$$\frac{p_E}{\gamma} = \frac{p_{sup}}{\gamma} - \left(\frac{v_E^2}{2g} - \frac{v_{sup}^2}{2g}\right) - \left(z_E - z_{sup}\right) - h_{Lsucc}$$

Ecuación 1

Ésta presión en la entrada de la bomba, debe ser mayor que la presión de saturación del fluido a la temperatura de operación de la bomba, para que no ocurra la cavitación.

Entonces, la posibilidad de cavitación aumenta cuando:

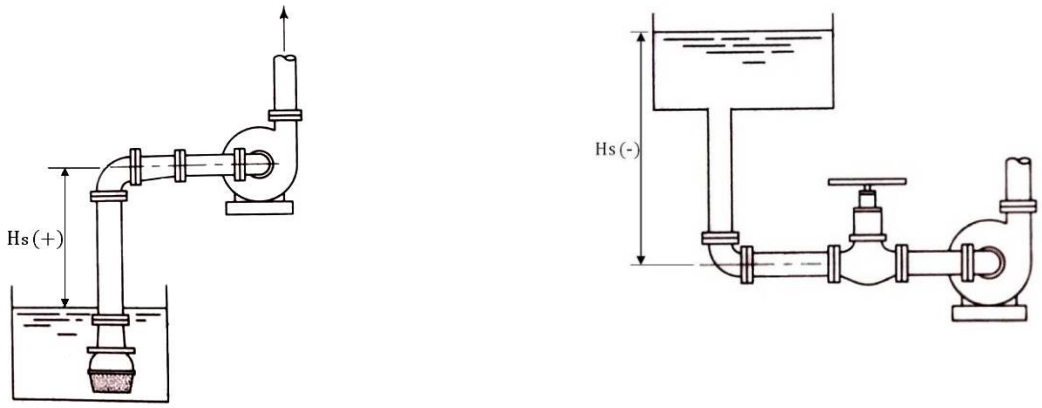
- La presión atmosférica (igual a es menor en el lugar de la instalación, si el depósito de aspiración está abierto a la atmósfera.
- La presión en el depósito de aspiración es menor, si éste no está abierto a la atmósfera.

- La velocidad en la tubería de succión es elevada, es decir el diámetro de la tubería de succión es muy pequeño.
- Cuanto mayor sea la elevación del eje de la bomba con respecto a la superficie del depósito.
- Las pérdidas en la tubería de aspiración () son altas.
- El caudal es mayor del rango de operación de diseño de la bomba.

Altura de aspiración (Hs).

Es la distancia vertical entre el nivel de líquido y la boca de aspiración de la bomba, el mismo término de la Imagen 4. (a).

En la Imagen 4.(b), se identifica la altura de aspiración para las dos posibilidades de instalación y se establece la convención que se utilizará, considerando Hs como positiva cuando la bomba está en aspiración y como negativa cuando está en carga. Se considerará la superficie del depósito como nivel de referencia 0.



(a) bomba en aspiración (Hs +) (b) bomba en carga (Hs -)

Figura 4. Altura de aspiración Hs

Altura de aspiración mínima requerida o cabeza positiva neta de succión requerida (NPSHreq).

Al entrar a la bomba y particularmente al rodete, el fluido experimenta una disminución de la presión debido a factores como rozamiento, cambios en la forma y tamaño de las secciones de flujo y en la dirección de flujo, la diferencia de presión entre las caras de los álabes, la

distribución desigual de las velocidades a lo largo de los bordes de los álabes y choques en el borde de entrada de los álabes.

El NPSHreq es un valor característico de cada bomba, obtenido experimentalmente por el fabricante y está asociado a la energía que se pierde en la entrada de la bomba y del rodete. Por lo tanto, representa cuanta energía adicional se requiere en el fluido a la entrada de la bomba para que la presión se mantenga por encima del valor de saturación y no se produzca la cavitación. Expresado numéricamente:

$$\frac{p_E}{\gamma} = \frac{p_{sat}}{\gamma} + NPSH_{req}$$

Ecuación 2

Se debe tener presente que el NPSH no es una distancia vertical, sino que es energía asociada a la presión. En términos prácticos, el $NPSH_{req}$ es el valor mínimo que se ha de aumentar la altura de presión absoluta en la entrada de los canales de los álabes para que sea mayor que la altura de presión de saturación.

Altura de aspiración disponible o cabeza positiva neta de succión disponible (NPSHd)

El NPSHd es un valor definido por las características de la instalación en la succión de la bomba. Representa cuanta energía dispone el fluido por encima de la altura de presión de saturación, después de considerar las pérdidas por fricción y posición de la bomba con respecto al depósito de aspiración.

De acuerdo con lo expuesto, como mínimo el $NPSH_d$ = $NPSH_{req}$ para evitar que ocurra el fenómeno de cavitación.

Bajo esta suposición e igualando la Ecuación 2, se obtiene:

$$\frac{p_{sat}}{\gamma} + \overbrace{NPSH_{req}}^{NPSH_d} = \frac{p_{sup}}{\gamma} - \left(\frac{v_E^2}{2g} - \frac{v_{sup}^2}{2g}\right) - \left(z_E - z_{sup}\right) - h_{Lsucc}$$

El cambio en la energía cinética, suele ser muy pequeño y se desprecia.

$$NPSH_d = \frac{p_{sup} - p_{sat}}{\gamma} - \overbrace{\left(\frac{v_E^2}{2g} - \frac{v_{sup}^2}{2g}\right)}^{\cong 0} - \overbrace{\left(z_E - z_{sup}\right)}^{H_S} - h_{Lsucc}$$

$$NPSH_d = \frac{p_{sup} - p_{sat}}{\gamma} - H_s - h_{Lsucc}$$

Ecuación 3

Aumento de la NPSHd.

Se puede mejorar en las siguientes situaciones:

a) Si el líquido está caliente, se puede enfriar intercalando un refrigerante en la tubería, con lo que la presión de vapor del líquido disminuye. También se puede conseguir aspirando el líquido en algún punto de la corriente en que esté a temperatura más baja. En algunos casos se dispone en la línea de aspiración de una inyección de líquido frío con el único objeto de reducir la temperatura.

b) Aumentando la altura mínima del líquido en la aspiración, que en principio parece la solución más sencilla, (salvo que no resulte posible porque este nivel del líquido sea fijo, como en un río, estanque o lago, o porque la altura a la que hay que subir el nivel del líquido aspirado sea totalmente impracticable, o porque el coste sea excesivo). A menudo el elevar el nivel del líquido en la aspiración unos pocos metros permite seleccionar una bomba menos costosa y más eficiente, (ahorro tanto en el coste inicial, como en el consumo de energía y mantenimiento), que compensan los costes adicionales.

c) El bajar el nivel de la bomba permite seleccionar una de velocidad específica más alta, menos costosa y más eficiente. Una variante sería emplear una bomba vertical con el rodete impulsor bajo el nivel del suelo.

d) Aumentando el diámetro de la tubería de aspiración, ya que se reducen las pérdidas de carga.

e) Reduciendo las pérdidas por fricción en la tubería de aspiración, que se recomienda en todos los casos; su costo se recupera por las mejoras introducidas en la succión y el ahorro de energía.

f) Si entre el nivel inferior de aspiración y la bomba se intercala otra bomba que trasiegue el caudal aspirado al tiempo que proporciona una altura diferencial pequeña, (justo la necesaria para aumentar el NPSHd en la brida de aspiración de la bomba principal), y que tenga un NPSHreq bajo, (inferior al NPSHd), el NPSHd de la tubería de aspiración de la bomba principal se mejora; a la bomba intercalada se la denomina bomba booster. Esta solución es muy eficiente en las bombas en servicio de alta presión, en donde las velocidades permisibles, más altas, producen ahorros en el costo inicial de la bomba principal, así como una mayor eficiencia y, a menudo, un menor número de etapas, que dan mayor fiabilidad. La bomba booster puede ser de una etapa, de baja velocidad y baja carga

5.1 Generalidades del ensayo de cavitación según la norma NTC 4990

La cavitación puede detectarse como una disminución en la cabeza o eficiencia a un determinado caudal o como una disminución en el caudal o eficiencia en una cabeza determinada. Principalmente se emplea el criterio de caída de cabeza a un determinado caudal.

Determinación de la NPSH. En este ensayo se reduce la NPSH en forma progresiva hasta la caída de la cabeza total (de la primera etapa) a caudal constante alcanza el 3%. Este valor de NPSH es NPSH3.

6. DIAGNOSTICO BANCO SIN MODIFICAR

Inicialmente se encontró el banco con las siguientes características:

- Una bomba centrifuga con una potencia de ½ HP, un flujo óptimo de 75 L/min, un diámetro de succión de 1.25”, diámetro de descarga de 1”, un impulsor de nylon,
- Una tubería y accesorios en PVC con temperatura máxima de trabajo de 60°C. debido a sus características, estos elementos se encontraban desgastados.
- Un termómetro con rango de medida entre -40°C a 50°C.
- Un tanque con capacidad de 8 galones, por su largo periodo de uso, presentaba corrosión, y afectaba en las lecturas de medición. Además de que el orificio por donde se llenaba el tanque, se encontraba sellado por un tapón el cual no se lograba abrir a causa de la corrosión misma del tanque. Por lo que era necesario llenar el tanque desacoplando el PVC.
- Un sistema indicador de nivel de agua, conformado por acoples neumáticos y una manguera en silicona. Los acoples se encontraban dañados ya que su aplicación era para sistema neumático, y no para uno hidráulico.

Con las anteriores condiciones el banco realizaba pruebas a una temperatura ambiente de 20°C.

6.1. ELECCIÓN DE NUEVOS MATERIALES PARA MODIFICACIÓN

Para la selección de los materiales tuvimos en cuenta los requerimientos necesarios para llevar a cabo la realización exitosa de este proyecto. Como nuestro objetivo es realizar un análisis de cavitación a temperaturas mayores que la del ambiente, pero sin sobrepasar la temperatura de saturación, la máxima a trabajar es 70 °C.

Con este parámetro establecido buscamos el material adecuado que se preste para estas condiciones de trabajo sin estropearse o desgastarse.

- **Tubería y accesorios.** El material indicado es el CPVC, que permite trabajar con fluidos a temperatura máxima de 80°c además a esto es resistente a la corrosión. La tubería en PVC fue cambiada por que únicamente resistía hasta 60°c así que lo mejor era cambiarla.

- **Válvulas**. Las válvulas de globo se dejaron las ya existentes, de hierro galvanizado.

- **Manómetro** se cambió por un manómetro con glicerina ya que era más preciso.

- **Vacuómetro**. Al igual que las válvulas, se dejó el mismo, ya que se puede implementar en este tipo de prueba.

- **Termómetro**. Es necesario un rango de 0 a 80°C, por lo que se adquirió un termómetro que tuviera en su escala este rango de trabajo, el anterior tenía un rango de -40 a 50 °C.

- **Resistencia eléctrica calentadora de agua.** Se necesitó de un elemento capaz de calentar el agua, por lo que se escogió una resistencia eléctrica industrial porque es resistivo y su aleación soporta hasta 1000°c.

- **Termostato.** Para mantener la temperatura regulada, necesitamos de un termostato capaz de cumplir con esta labor y garantizar un valor de temperatura constante.

- **Bomba.** La bomba debe soportar el trabajo a una temperatura Max. de 80 °C, se cambió la bomba que tenía ya que la bomba anterior tenía un impulsor fabricado en nylon, por una que tuviera el impulsor en aluminio con un flujo máximo de 75.7L/min, una potencia de 0,56 HP y cabeza máxima de la bomba de 22m.

En la siguiente imagen se muestra el impulsor de la antigua bomba en comparación del que está fabricado en aluminio.

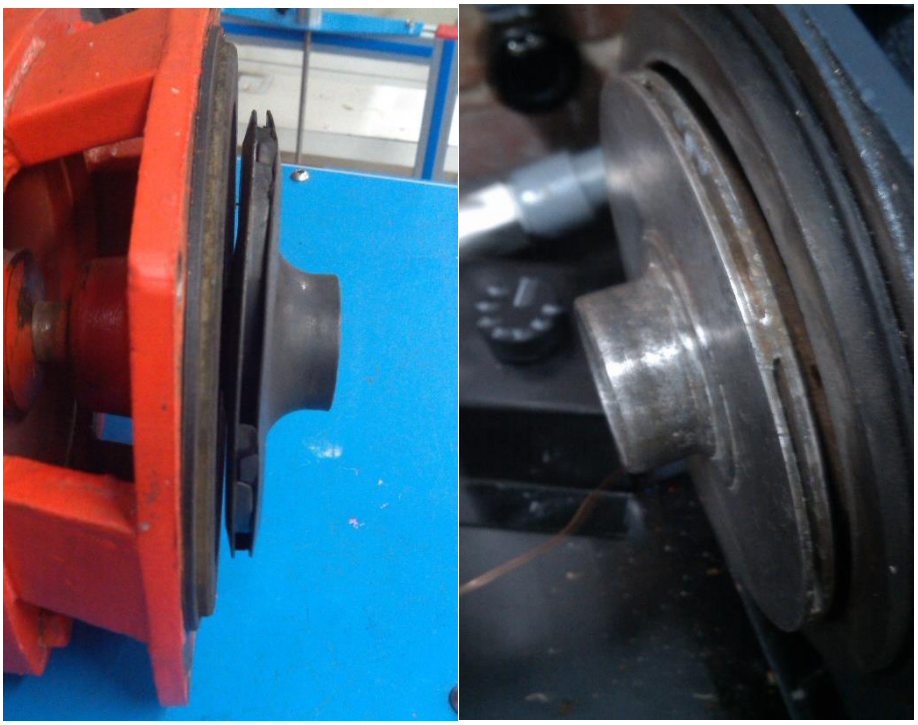


Imagen 1. Bomba impulsor de nylon / Bomba actual con impulsor metálico.

7. DISEÑO DEL BANCO DE PRUEBAS

7.1. DESCRIPCION Y CARACTERISTICAS DEL BANCO DE PRUEBAS

Materiales que se conservaron del antiguo banco.

	Capacidad: 8 galones **Material:** Acero estructural A-36 **DIMENSIONES** **Diámetro:** 0.27 m **Altura:** 0.62 m

Imagen 2.Tanque de almacenamiento

	Tipo: Resorte **Marca:** HEDLAND HLIT 300 **Modelo:** H621-028 **Diámetro**: 0,0254 m (1 in) **Rango:** (4 – 28 GPM) / (20 a 100) LPM

Imagen 3.Caudalimetro.

	diámetro: 1” **Material:** Galvanizada

Imagen 4.Válvula de globo 1”.

	Tipo: Análogo **Marca**: Desconocida **Rango**: (-1 a 0) bar / (-30 a 0) in Hg

Imagen 5.Vacuómetro.

	Cuerpo metálico Botón de ***ON*** con enclavamiento Botón ***OFF*** con mecanismo de emergencia Manipulación hasta 3 líneas

Imagen 6.Interruptor Bomba.

	diámetro: 1½” **Material:** Hierro **g**alvanizada

Imagen 7.Válvula de globo 1½”.

	Material: Acero estructural A-36 **Dimensiones:** 170X44 cm

Imagen 8.Soporte metálico banco de pruebas.

<u>Nuevos materiales necesarios para modificación</u>.

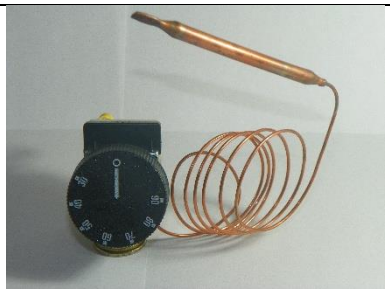
	**Voltaje**: 110 V – 60 HZ **Rango.**: 0 – 90 °C / 32 – 194 °F **Longitud sonda sensor:** 1 m

Imagen 9.Termostato.

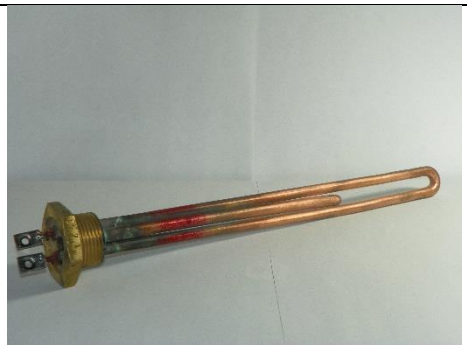
	**Voltaje**: 110 V – 60 HZ **diámetro Rosca:** ¾ “

Imagen 10.Resistencia calentadora.

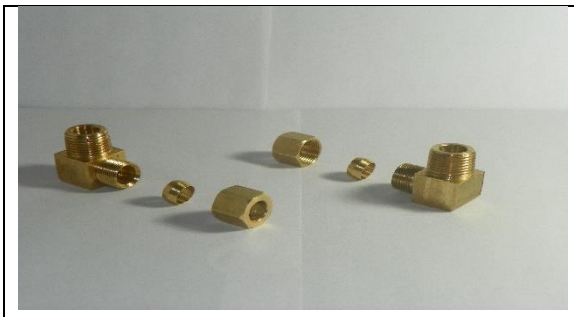
	**Material niple:** Bronce **Diámetro:** 3/8”
	Material manguera: Poliuretano **Diámetro:** 3/8 **Temp. Max:** 95 °C

Imagen 11. Niples y manguera.

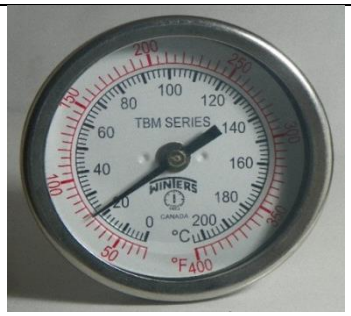
	2 uniones universal cpvc sch-80 de 1”. 2 uniones universal cpvc sch-80 de 1½”. 4 adaptadores macho cpvc sch-80 de 1”. 4 adaptadores macho cpvc sch-80 de 1½”. 2 adaptadores hembra cpvc 80 de 1”. 2 adaptadores hembra cpvc 80 de ½”. 2 reducciones b. cpvc sch-80 de ½ x ¼ “. Tee cpvc sch-80 de 1”. Tee cpvc sch-80 de 1½”. 2 codo 90 cpvc sch-80 de 1”. 2 Mts tuberías cpvc sch-80 de 1”. 1 Mts tuberías cpvc sch-80 de 1½” 19' 470 psi @ 73.4 ºF. 2 Mts tuberías cpvc sch-80 de 1” 19' psi @ 73.4 ºF.

Imagen 12.Accesorios en CPVC.

	Tipo: Centrifuga **Voltaje**: 115/230V-60HZ **Flujo máx.**: 75.7 L / min **Diámetro de succión:** 1” **Diámetro de descarga:** 1” **Potencia:** ¾ Hp **Diámetro impulsor:** 0.12 m **Material impulsor:** Metálico

Imagen 13. Bomba Centrifuga.

Imagen 14.Termómetro.

	**Tipo**: Análogo **Marca**: WINTERS **Modelo**: Genérico **Rango**: (30 a 400) ºF / (0 a 200) ºC

En la siguiente imagen se muestra el banco ya modificado.

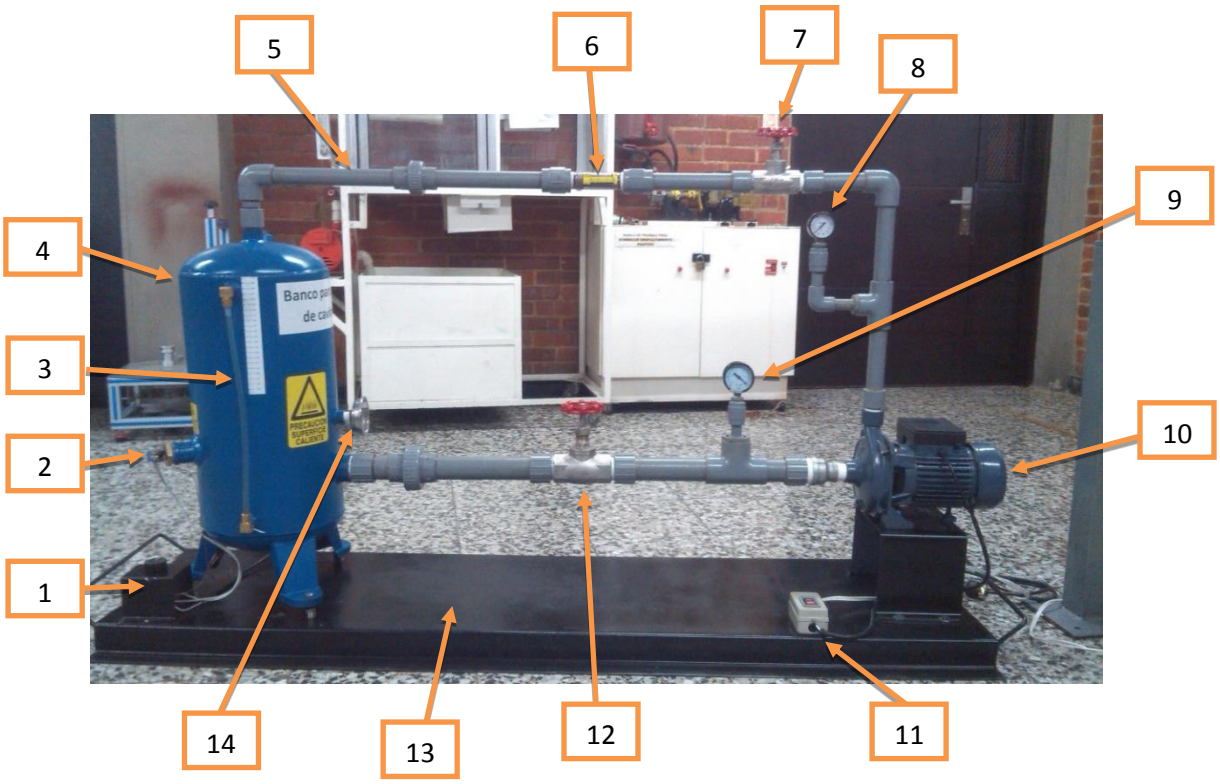


Imagen 15. Descripción de partes del banco de pruebas.

1. Termostato
2. Resistencia eléctrica calentadora de agua
3. Niples codo bronce y tubo de poliuretano para nivel de tanque
4. Tanque de almacenamiento
5. Tubería, codos, tees, reducciones y universales en CPVC SCH-80
6. Caudalimetro
7. Válvula de globo de 1” de diámetro para descarga
8. Manómetro
9. Vacuómetro
10. Motobomba centrifuga
11. Interruptor motobomba
12. Válvula de globo de 1½” de diámetro para succión
13. Soporte metálico para el banco de pruebas
14. Termómetro.

8. GUIA DE LABORATORIO

En esta guía de laboratorio se encuentra el proceso para tomar los datos de presiones manométricas; con estos datos se calculará el punto en la cabeza de la bomba en la que se empieza a generar cavitación y se realizaran las gráficas de carga de succión vs caudal y cabeza de la bomba vs caudal.

8.1. OBJETIVO

Identificar los principios del fenómeno de cavitación en bombas centrifugas mediante el cálculo de la cabeza de la bomba y la carga de succión neta positiva (NPSHr), con lo cual se construirá las gráficas necesarias para este laboratorio.

8.2. MARCO TEORICO

En el flujo de fluidos y las máquinas de flujo, el fenómeno de cavitación ocurre cuando la presión del fluido se hace igual a la presión de vapor o saturación de ese fluido a la temperatura a la que se encuentra.

En una bomba, la cavitación ocurre porque la energía en el punto de entrada del rodete, no es suficientemente alta para superar la caída de presión asociada a los cambios de dirección, choques y fricción en la entrada a los canales de los álabes.

Si la presión disminuye hasta la presión de vapor después de entrar a los canales de los álabes, se forman burbujas de vapor de fluido. Éstas son conducidas a la zona de alta presión dentro de los canales, donde implotan debido a la presión del fluido que le rodea. Al colapsar cada burbuja, el líquido alrededor tiende a ocupar el espacio que ocupaba ésta, alcanzando grandes velocidades, estas gotas aceleradas chocan con gran fuerza contra la superficie del rodete, dando origen al deterioro por cavitación, conocido como picadura como resultado de la erosión en la superficie.

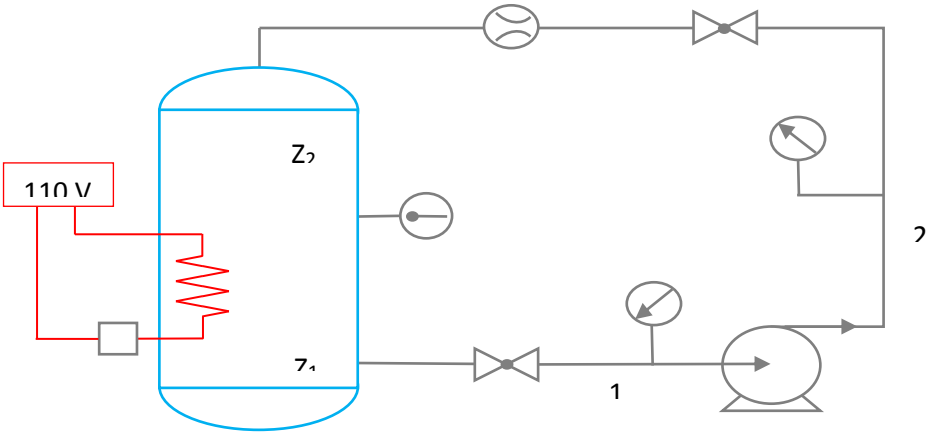


Ilustración 2. Esquema de funcionamiento.

La cabeza de la bomba se determina a partir de una ecuación de energía entre la entrada (punto 1) y la salida de la bomba (punto 2), despreciando el cambio de velocidad y de elevación, así como las pérdidas de tubería.

$$\mathbf{H_b = \frac{P_S - P_E}{\rho * g}}$$

Ecuación 4. Cabeza total de la bomba.

Donde;

g = aceleración debido a la gravedad, ***9.81m/s²*.**

P_E = Presión del vacuómetro. ***[Pa]***

P_S = Presión del manómetro. ***[Pa]***

ρ = Densidad del agua a temperatura de trabajo. ***[Kg/m³]***

Las velocidades se calculan a partir de la ecuación de caudal:

$$Q = A * V$$

Ecuación 5. Calculo de velocidad.

Q= caudal

A= Área de succión o descarga

V=velocidad de succión o descarga

A partir de su definición, la cabeza neta de succión requerida, NPSHR, se calcula como:

$$\mathbf{NPSH_R = \frac{(P_E + P_{amb}) - P_v}{\rho g}}$$

Ecuación 6. NPSHr (Requerida)

Donde;

P_E: Presión del Vacuómetro *[Pa]*

P_{amb}: Presión del atmosférica

P_v: Presión de saturación del agua. (varía con la temperatura)

: Densidad del agua. (varía con la temperatura)

g: Gravedad. 9,81 *[m/s^2]*

De acuerdo con la norma técnica colombiana NTC 4990, el puto en el cual aparece el fenómeno de la cavitación es cuando a caudal constante la cabeza total de la bomba sufre una disminución de 3% debido a la caída de presiona en la succión.

8.3. MATERIALES REQUERIDOS

- Formato para registro de datos. (Tabla 3 ***y*** Tabla 4)
- Libro guía.
- Banco de pruebas.

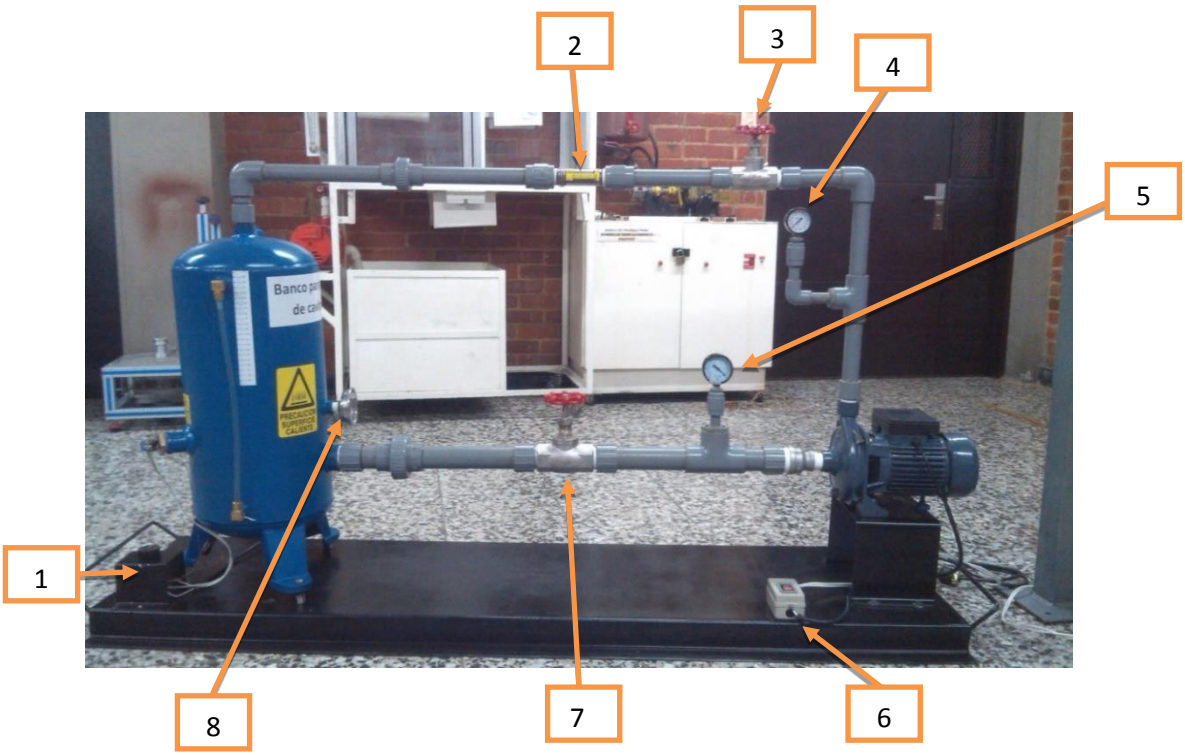


Imagen 16. Banco de pruebas para pruebas de cavitación.

1. Caudalimetro.
2. Válvula de globo de 1” de diámetro para descarga.
3. Manómetro.
4. Vacuómetro.
5. Interruptor motobomba.
6. Válvula de globo de 1½” de diámetro para succión.
7. Termómetro.

8.4. PROCEDIMIENTO

i. Verificar el estado de la maquina e identificar todas las partes del banco de acuerdo a la Imagen 17, sin conectar las líneas de corriente.

Imagen 17. Sentido de giro para abrir válvulas.

ii. Verificar que las válvulas de succión y descarga se encuentren completamente abiertas.

iii. Asegurarse que el motor de la bomba tenga buena ventilación, y que no se encuentre mojado.

iv. Confirmar que el nivel del agua contenido en el tanque sea el indicado (0,32m medidos a partir de la línea de succión), de lo contrario, agregue agua hasta alcanzar el nivel requerido.

Imagen 18. Nivel Tanque.

v. Confirmar que los interruptores de la bomba y el termostato se encuentren en la posición de apagado.

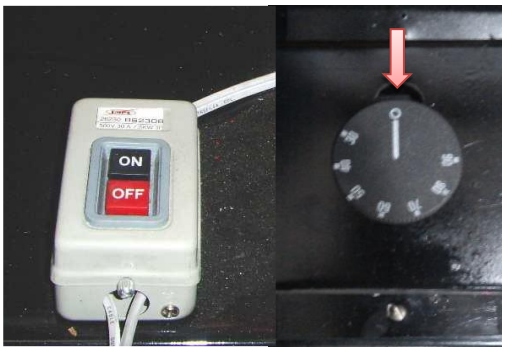


Imagen 19. Posiciones apagado.

vi. Si la prueba de cavitación con la que inicia es a temperatura ambiente, únicamente conecte la bomba a la toma de 110 V. En caso de que ya se haya realizado, siga al paso x**iii**.

vii. Active el interruptor y ponga en funcionamiento la bomba, espere aprox. 1 min para que se regule el sistema, recuerde que debe tener las dos válvulas completamente abiertas. Aproveche este tiempo para revisar que no se encuentren fugas en las tuberías y accesorios, y que no se presenten ruidos extraños.

viii. Con la válvula de succión completamente abierta y el tapón de llenado abierto, comience a cerrar la válvula de descarga hasta que el Caudalimetro le indique un flujo de **16 GPM** (galones por minuto). Luego de esto, registre los datos de presión arrojados por el vacuómetro y el manómetro en la Tabla 3 para dicho caudal.

ix. Calcule la **cabeza reducida 3%** (es la diferencia entre $\mathbf{P_S}$ y $\mathbf{P_E}$, multiplicado por *0.97)*, este valor servirá como guía para el desarrollo del paso **xi.**

x. Repita los dos anteriores pasos para cada uno de los siguientes caudales: **14, 12, 10, 8 y 6 GPM**. Y así concluir con el registro de la tabla.

xi. Para esta segunda etapa, teniendo las válvulas completamente abiertas, realice una combinación de cierre hasta garantizar un caudal de **16 GPM**. Se debe cerrar más la válvula de carga que las de descarga, esto es para inducir la cavitación. Trate de obtener presiones en el vacuómetro y manómetro cuya suma sea igual a la **cabeza reducida 3%** calculada en el paso anterior.

xii. Repita el paso anterior para cada uno de los siguientes caudales: **14, 12, 10, 8 y 6 GPM**. Y así concluir con el registro de la Tabla 4**.**

xiii. Para realizar la prueba de cavitación a una temperatura mayor, apague la bomba y asegúrese de que el termostato se encuentre en posición de apagado, luego conecte el termostato a la toma de 110 V.

xiv. Seleccione la temperatura deseada con la perilla de la Imagen 20, la temperatura de la perilla debe estar **17°C** por encima de la temperatura de trabajo deseada. Es decir, si desea una temperatura de **50°C**, en la perilla se debe colocar una de **67°C,** esto para compensar la disminución de temperatura del agua. Por características del banco, solo se permite trabajar hasta máximo **70° C**.

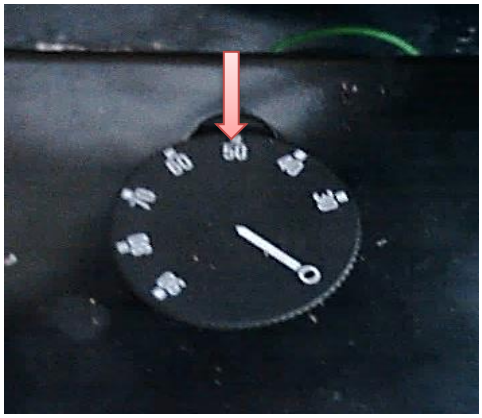


Imagen 20. Selección de temperatura, en este caso 50°C.

xv. Verifique que la aguja del termómetro situado en el tanque comience a aumentar, hasta lograr la temperatura seleccionada. Cierre las válvulas antes de calentar el agua. Para lograr **50°C**, tarda aprox. **35 min**.

xvi. una vez alcanzada la temperatura, repita los pasos del **viii.** al **xiii.**

8.5. TABLA DE DATOS

Temperatura del liquido	°C

Tabla 3. Formato para la primera parte del laboratorio.

Caudal		**Vacuómetro**		**Manómetro**		**Cabeza (H)**	**Cabeza reducida 3 %**
(GPM)	*(m3/min)*	*(Bar)*	*(Kpa)*	*(Bar)*	*(Kpa)*	*(m)*	*(Bar)*
16							
14							
12							
10							
8							
6							

Tabla 4. Formato para la segunda parte del laboratorio.

Caudal		**Vacuómetro**		**Manómetro**		**ΔP**	**NPSHr**
(GPM)	*(m3/min)*	*(Bar)*	*(Kpa)*	*(Bar)*	*(Kpa)*	*(Bar)*	*(m)*
16							
14							
12							
10							
8							
6							

8.6. ACTIVIDADES

8.6.1. Utilizando la Ecuación 5. calcule las velocidades de Succión y descarga para cada caudal. Los diámetros correspondientes de la tubería son:

Diámetro de succión = 1½“

Diámetro de succión = 1“

8.6.2. Luego, calcular la cabeza de la bomba (H_b), utilizando la Ecuación 4.

8.6.3. Para determinar la NPSHR, utilice la Ecuación 6.

8.6.4. Construya la gráfica H_b Vs Q con los datos obtenidos en la Tabla 3.

8.6.5. Identifique en cada uno de los resultados de la Tabla 4. donde la cabeza de la bomba disminuyo según el parámetro de la bomba.

8.6.6. Trazar la curva de NPSH vs Q con los puntos obtenidos en cada caudal, estos serán los puntos los cuales identifican el comienzo de la cavitación de la bomba.

8.7. RECOMENDACIONES

8.7.1. Verificar el estado de los elementos antes de utilizarlos.

8.7.2. Dejar los elementos utilizados en la práctica en completo orden.

8.7.3. Por seguridad realice TODAS LAS CONEXIONES con la bomba apagada y el termostato apagado.

8.7.4. Evite tener contacto con el tanque cuando utilice temperaturas mayores a 40 °C.

9. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Se realizaron pruebas de acuerdo a los estipulado en la guía de laboratorio con los siguientes resultados, los cuales permitieron construir las curvas Carga vs Caudal y NPSHreq vs Caudal.

9.1. TABLAS CON LOS DATOS DE LAS PRUEBAS

Cálculos para un caudal de 16GPM a 20°C.

Para la primera parte de la prueba es necesario calcular la cabeza (H) de acuerdo a las mediciones obtenidas al caudal establecido.

La ecuación de cabeza H

$$HB = \frac{Ps - Pe}{\rho g} + Hz + \frac{Vs^2 - Ve^2}{2g}$$

La expresión que involucra las velocidades es despreciable, por lo que solo queda.

$$HB = \frac{P_S - P_E}{\rho g} + Hz$$

Reemplazando queda.

$$HB = \frac{168Kpa}{(998{,}29\,{}^{kg}/_{m^3})(9{,}81\,{}^{m}/_{s^2})} + 0{,}32m$$

Se multiplica por 1000 para ajustar unidades

$$\boldsymbol{HB} = 17{,}475m$$

Luego de calcular la cabeza para cada caudal, en este caso seguimos realizando la demostración solo con el caudal de 16GPM.

La ecuación de NPSHR es

$$NPSHR = \frac{P_E + Pamb - Pv}{\rho g}$$

Reemplazando

$$NPSHR = \frac{-40Kpa + 74Kpa - 2{,}3388Kpa}{(998{,}29\,{}^{kg}/_{m^3})(9{,}81\,{}^{m}/_{s^2})} * 1000$$

$$\boldsymbol{NPSHR} = 3{,}23m$$

Calculando la NPSHR para cada caudal se puede construir la gráfica Q vs NPSHR.

Los valores de densidad y de presión de saturación varían de acuerdo a la temperatura.

Tabla 5. Datos iniciales

	Área Suc.	*Área Des.*		*Presión de saturación del agua*			*Densidad del agua*		*Presión ambiente*	
	1,5	1	*in*	**20°C**	2,3388	*kpa*	998,29	*Kg/m3*	74	*kpa*
	0,0381	0,0254	*m*	*Gravedad*			*Peso específico del agua*		*Altura nivel*	
Radio	0,01905	0,0127	*m*	9,81			9793,2249	*N/m3*	0,32	m

Tabla 6. Cabeza reducida a 3%

Caudal		**Vacuómetro**		**Manómetro**		**Cabeza (H)**	**Cabeza reducida 3 %**
(GPM)	*(m3/min)*	*(Bar)*	*(Kpa)*	*(Bar)*	*(Kpa)*	*(m)*	*(Bar)*
16	0,061	0,00	0,00	1,68	168	17,475	1,63
14	0,053	0,00	0,00	1,82	182	18,904	1,77
12	0,045	0,00	0,00	1,92	192	19,925	1,86
10	0,038	0,00	0,00	2,02	202	20,947	1,96
8	0,030	0,00	0,00	2,12	212	21,968	2,06
6	0,023	0,00	0,00	2,19	219	22,682	2,12

Tabla 7. NPSHr

Caudal		Vacúómetro		Manómetro		ΔP	NPSHr
(GPM)	*(m3/min)*	*(Bar)*	*(Kpa)*	*(Bar)*	*(Kpa)*	*(Bar)*	*(m)*
16	0,061	-0,40	-40,00	1,20	120	1,60	3,23
14	0,053	-0,34	-34,00	1,40	140	1,74	3,85
12	0,045	-0,42	-42,00	1,40	140	1,82	3,03
10	0,038	-0,44	-44,00	1,50	150	1,94	2,82
8	0,030	-0,44	-44,00	1,60	160	2,04	2,82
6	0,023	-0,58	-58,00	1,50	150	2,08	1,39

Temperatura del liquido	**50°C**

Tabla 8. Datos iniciales

	Área Suc.	*Área Des.*		*Presión de saturación del agua*			*Densidad del agua*		*Presión ambiente*	
	1,5	1	***in***	**50°C**	12.344	***kpa***	988,02	***Kg/m3***	74	***kpa***
	0,0381	0,0254	***m***	*Gravedad*			*Peso específico del agua*		*Altura nivel*	
Radio	0,01905	0,0127	***m***	9,81			9692.4762	***N/m3***	0,32	**m**

Tabla 9. Cabeza reducida a 3%.

Caudal		Vacúómetro		Manómetro		Cabeza (H)	Cabeza reducida 3 %
(GPM)	*(m3/min)*	*(Bar)*	*(Kpa)*	*(Bar)*	*(Kpa)*	*(m)*	*(Bar)*
16	0,061	0,00	0,00	1,65	165	17,344	1,60
14	0,053	0,00	0,00	1,80	180	18,891	1,75
12	0,045	0,00	0,00	1,92	192	20,129	1,86
10	0,038	0,00	0,00	2,02	202	21,161	1,96
8	0,030	0,00	0,00	2,10	210	21,986	2,04
6	0,023	0,00	0,00	2,19	219	22,915	2,12

Tabla 10. NPSHr

Caudal		Vacuómetro		Manómetro		ΔP	NPSHr
(GPM)	*(m3/min)*	*(Bar)*	*(Kpa)*	*(Bar)*	*(Kpa)*	*(Bar)*	*(m)*
16	0,061	-0,20	-20,0	1,40	140	1,60	4,30
14	0,053	-0,30	-30,0	1,40	140	1,70	3,27
12	0,045	-0,32	-32,0	1,50	150	1,82	3,06
10	0,038	-0,40	-40,0	1,50	150	1,90	2,23
8	0,030	-0,42	-42,0	1,60	160	2,02	2,03
6	0,023	-0,22	-22,0	1,90	190	2,12	4,09

Temperatura del liquido	**70 °C**

Tabla 11. Datos iniciales

	Area Suc.	***Area Des.***		***Presión saturación del agua***			***Densidad del agua***		***Presión ambiente***	
	1,5	1	***in***	**70°C**	31,176	***kpa***	977,63	***Kg/m3***	74	***kpa***
	0,0381	0,0254	***m***	***Gravedad***			***Peso específico del agua***		***altura nivel***	
Radio	0,01905	0,0127	***m***	9,81			9590,5503	***N/m3***	0,32	**m**

Tabla 12.

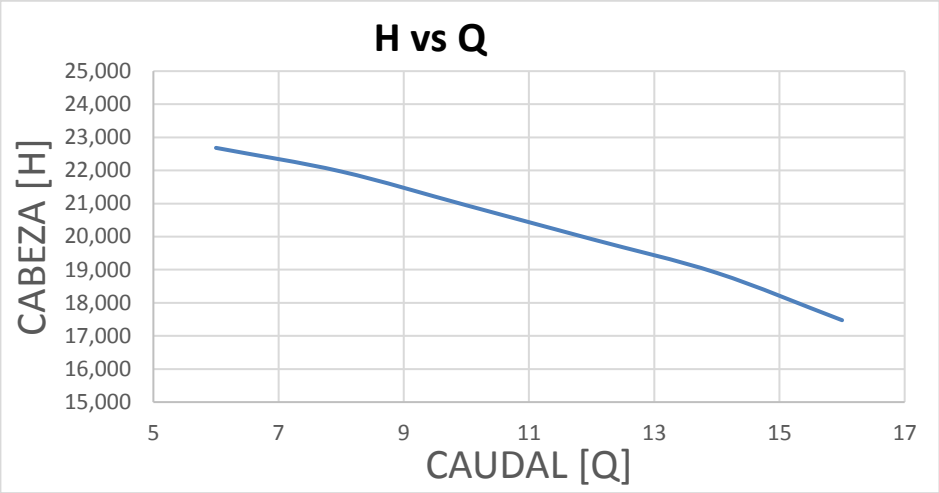
Caudal		Vacuómetro		Manómetro		Cabeza (H)	Cabeza reducida 3 %
(GPM)	*(m3/min)*	*(Bar)*	*(Kpa)*	*(Bar)*	*(Kpa)*	*(m)*	*(Bar)*
16	0,061	0,00	0,00	1,65	165	17,524	1,60
14	0,053	0,00	0,00	1,80	180	19,088	1,75
12	0,045	0,00	0,00	1,90	190	20,131	1,84
10	0,038	0,00	0,00	2,00	200	21,174	1,94
8	0,030	0,00	0,00	2,10	210	22,217	2,04
6	0,023	0,00	0,00	2,18	218	23,051	2,11
Caudal		**Vacuómetro**		**Manómetro**		**ΔP**	**NPSHr**
(GPM)	*(m3/min)*	*(Bar)*	*(Kpa)*	*(Bar)*	*(Kpa)*	*(Bar)*	*(m)*
16	0,061	-0,10	-10,00	1,50	150	1,60	3,42
14	0,053	-0,14	-14,00	1,60	160	1,74	3,01
12	0,045	-0,20	-20,00	1,60	160	1,80	2,38
10	0,038	-0,16	-16,00	1,80	180	1,96	2,80
8	0,030	-0,16	-16,00	1,90	190	2,06	2,80
6	0,023	-0,14	-14,00	2,00	200	2,14	3,01

Cabeza reducida y npshr

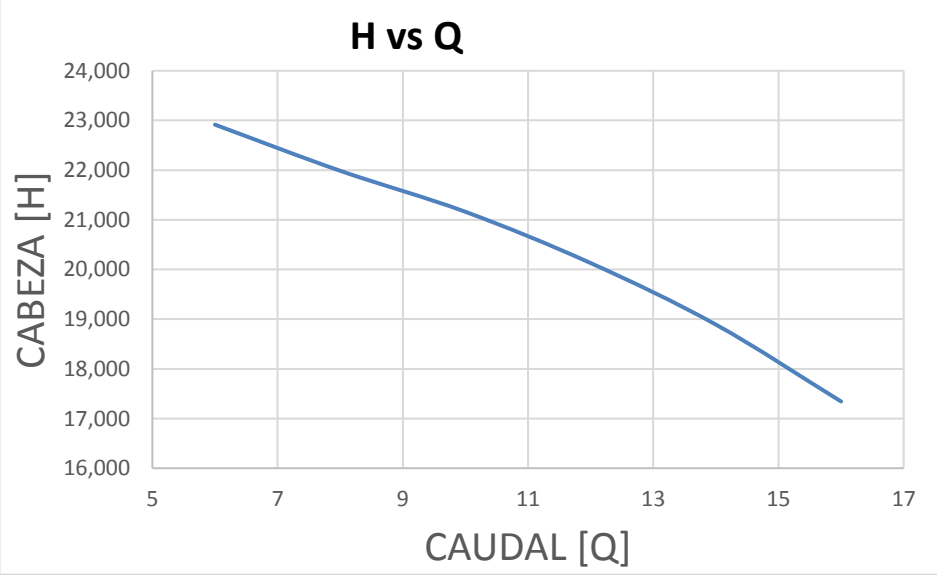
9.1. GRAFICAS

Luego de haber completado las tablas de registro de datos, procedemos a construir la graficas correspondientes a cada temperatura, la de H vs Q y la de NPSH vs Q.

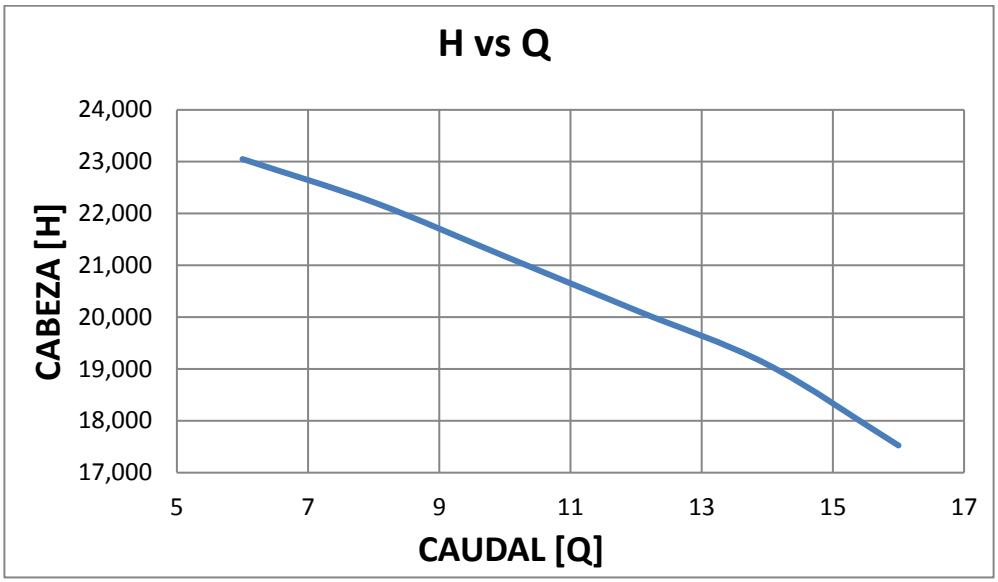
9.2.1. Gráficas para una temperatura de 20°C

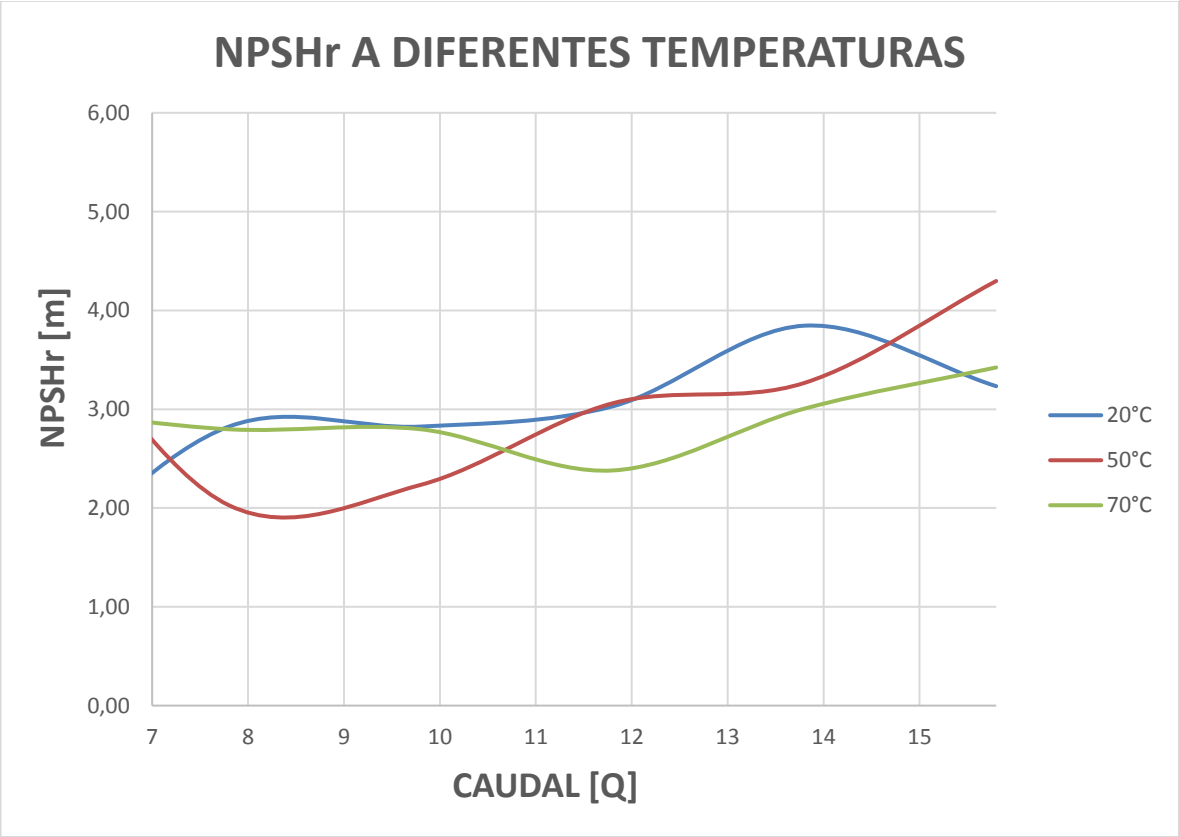


9.2.2 Gráficas para una temperatura de 50°C



9.2.3. Gráfica para una temperatura de 70°C





9.2. ANALISIS DE RESULTADOS

- En las gráficas de H vs Q se ve que el comportamiento de la bomba no varía notablemente a diferentes temperaturas.
- En la gráfica de NPSHr vs Q se toma el valor de caudal desde siete (7) ya que menores a este los resultados eran imprecisos por el bajo caudal y fluctuaban entre las diferentes mediciones.
- A mayor caudal la NPSHr aumenta es decir que son directamente proporcionales.
- Una de las dificultades en el momento de tomar los datos es cuando se busca la caída del 3% debido a que los valores del manómetro y caudalímetro cambian.

10. MANUAL DE OPERACIÓN

En este banco es posible obtener cavitación en la bomba centrifuga instalada, debido a la manipulación de las válvulas de succión y descarga. Su capacidad de almacenamiento es de 35 litros de agua limpia. A continuación, detallaremos el normal procedimiento para la puesta en marcha de la máquina.

10.1. MEDIDAS DE SEGURIDAD ANTES DE PONER EN MARCHA EL BANCO.

10.1.1. Identifique todas las partes del banco.

10.1.2. Verificar que las válvulas de succión y descarga se encuentren completamente abiertas (apertura en sentido anti horario).

10.1.3. Verifique el nivel de agua contenido dentro del tanque.

10.1.4. Compruebe que el tanque no se encuentre presurizado.

10.1.5. Revise que no exista ninguna fuga de fluido en el tanque de almacenamiento de agua, accesorios de tubería CPVC y demás dispositivos conectados a la tubería.

10.1.6. Asegúrese de realizar todas las verificaciones con los dispositivos desenergizados. Una conexión inadecuada al sistema a tierra puede provocar un choque eléctrico.

10.1.7. Nunca permita que el motor de la motobomba se moje, o que sea expuesto a sustancias contaminantes.

10.1.8. Evite forrar el motor de la motobomba con elementos que impidan la circulación de aire a través de el para su enfriamiento.

10.1.9. Coloque el banco en un lugar ventilado.

10.1.10. Verifique que el voltaje requerido para la operación de la motobomba sea el correcto, de lo contrario, ubique una fuente de energía adecuada.

10.1.11. Antes de conectar la corriente asegúrese que el interruptor de la bomba y el termostato estén apagados, y que todos los elementos eléctricos estén completamente aislados.

10.1.12. Asegúrese que la bomba se encuentre cebada. Llene de fluido la tubería de succión.

10.1.13. Evite trabajar con agua a una temperatura mayor a ***80 ºC*** o líquidos diferentes al agua.

10.1.14. Al finalizar la prueba descargue completamente el agua del tanque y la tubería.

Advertencia: Para garantizar la integridad física del estudiante, se señalizaron las partes donde el cuerpo puede estar expuesto, por lo que recomendamos acatar las advertencias del banco.

Imagen 21. Avisos de precaución del banco de pruebas.

10.2. PROCEDIMIENTO PARA PUESTA EN MARCHA.

10.2.1. Con la línea de corriente desconectada gire las válvulas de succión y descarga en sentido anti horario hasta que estén completamente abiertas.

10.2.2. Llene el tanque de almacenamiento con aproximadamente 31 litros de agua fría y limpia hasta llegar al nivel máximo indicado.

10.2.3. Levante sutilmente el banco desde el extremo donde se encuentra el tanque para llenar de líquido la tubería de succión y así cebar la bomba.

10.2.4. Verifique que no exista ninguna fuga de fluido y que le motor no se encuentre mojado.

10.2.5. Conecte la línea de corriente garantizando la requerida por la instalación de la motobomba verificando antes que se encuentre desenclavado el botón ***ON***.

10.2.6. Para uso del termostato, verifique que se encuentre la línea de la perilla, la que está debajo del número cero (0), apuntando directamente hacia usted. Luego energice el dispositivo.

Imagen 22. Posición de apagado del termostato.

10.2.7. Para energizar el sistema active el botón ON del interruptor y la motobomba entrara en funcionamiento, de no ser así verifique la conexión eléctrica y el fusible en la caja de encendido.

10.2.8. Para hacer uso del termostato, seleccione con la perilla la temperatura desea, recuerde que el número de la temperatura debe seleccionada debe quedar en la posición donde se encontraba el cero (0).

10.2.9. Una vez el banco se encuentre en funcionamiento verifique el sonido normal de todos sus elementos y sus mediciones de caudal, presiones, nivel y temperatura.

10.2.10. Manipule únicamente las válvulas de succión y descarga, no ajuste los elementos de medición.

10.2.11. Tome las medidas necearías para la práctica observando el manómetro y vacuómetro respectivamente.

10.2.12. Una vez terminada la práctica, desconecte la bomba y el termostato. Luego de esto descargue completamente el sistema de agua y deje las válvulas completamente abiertas.

11. MANUAL DE MANTENIMIENTO

Los elementos instalados en el banco fueron seleccionados después de haber sido calculado el circuito hidráulico por lo tanto el mantenimiento aquí expuesto está basado en las recomendaciones del fabricante o proveedor de cada elemento.

11.1. MANTENIMIENTO DEL TANQUE PULMON

Este es el único elemento del banco que fue construido de acuerdo a la necesidad es de acero estructural A-36 por lo tanto se encuentra expuesto a desgaste por corrosión debido al ataque del agua, Imagen 23. se recomienda realizar un desmonte del tanque para un lavado interno cada 6 meses.

Imagen 23. Evidencia de corrosión en el tanque.

11.2. VÁLVULAS DE GLOBO Y MANÓMETROS

Las válvulas de succión y descarga son elementos estandarizados por lo tanto no se deben realizar ningún mantenimiento, se les debe realizar una inspección periódica para verificar su ajuste.

11.2.1. Manómetros al igual que en el numeral anterior son elementos estandarizados libres de mantenimiento.

11.2.2. Inspeccionar el caudalimetro y asegurarse de que no se encuentren partículas extrañas entre la parte deslizantes y la cubierta, como se indica en la imagen XXX. En caso de

estar sucio, solicite la ayuda de un experto para soltarlo y limpiarlo agregándole agua en el sentido contrario para sacar dichos cuerpos extraños.

Imagen 24. Lugar donde se aprecia la contaminación del Caudalimetro.

11.3. MANTENIMIENTO BOMBA

Imagen 25. Bomba de succión.

11.3.1. Lubricación

Cojinetes: Los motores se envían con grasa desde la fábrica. Se tendría que hacer una re-lubricación.

Una lubricación apropiada es esencial para la operación de la bomba. No opere la bomba si no hay suficiente lubricante en la carcasa de cojinete o si el lubricante está contaminado con excesiva suciedad o humedad. La operación de la unidad bajo estas condiciones llevará a desempeño deficiente de la bomba, y posible falla del cojinete. No opere la bomba con excesiva cantidad de lubricante. Dicha acción causará que los cojinetes se sobrecalienten.

11.3.2. Caja de Empaquetadura (Prensa-estopas)

El propósito de la caja de empaquetadura es limitar o eliminar la fuga de fluido de la bomba y evitar el ingreso de aire a los espacios de succión a lo largo del eje de la bomba. Las bombas están equipadas con empaquetadura (fuga limitada). Normalmente, el líquido de la bomba se utiliza para lubricar el sello de caja de empaquetadura. Para bombas equipadas con empaquetadura, siempre debe haber una leve fuga a través del casquillo de la caja de empaquetadura.

Es difícil definir la cantidad de fuga, pero recomendamos un goteo estable de líquido a través del casquillo de la caja de empaquetadura. Los casquillos de caja de empaquetadura deben ajustarse después de arrancarse la bomba. Cuando la fuga es excesiva, apriete uniformemente los pernos del casquillo de la caja de empaquetadura, un poco por vez.

Espere un intervalo de tiempo para que la empaquetadura se ajuste a la nueva posición. Nunca apriete el casquillo hasta que no haya fuga, ya que esto causará sobrecalentamiento y desgaste indebido en las camisas del eje.

Reemplace la empaquetadura de la caja de empaquetadura de la siguiente manera:

11.3.2.1. Detenga la bomba.

11.3.2.2. Tome precauciones para evitar que el motor sea arrancado inadvertidamente.

11.3.2.3. Remueva las tuercas de los pernos del casquillo de la caja de empaquetadura y el casquillo.

11.3.2.4. Remueva y deseche los viejos anillos de empaquetadura – observe la ubicación del anillo de cierre hidráulico. Cuando realice el re-empaque de la caja de empaquetadura, el anillo de cierre hidráulico debe colocarse de manera que la conexión de sello de agua quede opuesta al anillo de cierre hidráulico.

11.3.2.5. Limpie la caja de empaquetadura.

11.3.2.6. Inspeccione la camisa del eje en cuanto a desgaste – si está rayada o con muescas, ésta debe reemplazarse.

11.3.2.7. Asegúrese que el buje de la caja de empaquetadura (si lo tiene) está colocado en el fondo de la caja.

11.3.2.8. Inserte los anillos de empaquetadura y golpee levemente para asentar contra el buje. Asegúrese que los anillos son del tamaño y longitud apropiados y que están

instalados con los cortes en forma escalonada. El anillo de cierre hidráulico debe instalarse opuesto a la conexión de sello de agua.

11.3.2.9. Instale el casquillo de la caja de empaquetadura y apriete a mano. Con la bomba en operación, ajuste el casquillo según se describió anteriormente. Debe tenerse cuidado durante la primera hora de operación para apretar gradualmente la empaquetadura justo lo suficiente para mantener la cantidad de fuga requerida.

11.3.2.10. Si la bomba se opera diariamente, la empaquetadura en la caja de empaquetadura debe renovarse aproximadamente cada dos a tres meses antes de que ésta se endurezca y raye las camisas del eje.

11.3.3. Holgura del Anillo de Desgaste

Los ajustes operativos entre los anillos de desgaste se suministran bajo las especificaciones de la bomba. Cuando estas holguras se duplican, o la capacidad de la bomba se reduce en 5 al 10%, los anillos deben reemplazarse. El propósito de estos anillos es mantener en un mínimo la recirculación interna del líquido que se bombea. Las holguras deben verificarse periódicamente y cuando se abre la carcasa de la bomba. Verifique mediante medición directa. Mida el diámetro interior del anillo de la carcasa y el diámetro exterior del anillo del impulsor, luego calcule la holgura (diámetro interior menos el diámetro exterior).

11.3.4. Recomendaciones

Proteja el motor de la exposición extrema al calor, polvo y humedad. Aléjelo del contacto directo del sol y ubíquelo en un área limpia donde le proporcione buena ventilación.

El sello mecánico de las bombas impide el paso de agua al motor y al exterior. Una falla del sello ocasiona goteo de líquido, imposibilidad de cebar la bomba y posible daño del motor por entrada del líquido. Si observa goteo del líquido al exterior suspenda el funcionamiento de la unidad e investigue la causa, verificando las condiciones del sello.

Verifique periódicamente que los soportes de la tubería y la bomba estén cumpliendo su función.

Verifique con regularidad que la coladera esté libre de obstrucciones.

Desenrosque el tapón de drenaje periódicamente si el líquido que trasporta la bomba tiene muchos sólidos en suspensión, con el objeto de extraer los sedimentos acumulados utilizando el mismo líquido bombeado para ello.

Debido a que los motores eléctricos se refrigeran a través de sus superficies exteriores, estas deben estar libres de polvo o mugre. Vigile las condiciones de la corriente para que la unidad trabaje adecuadamente.

Revise y apriete periódicamente los tornillos de las conexiones eléctricas. Si el arrancador o sistema de protección del motor opera y desconecta la unidad, investigue la causa antes de poner la bomba nuevamente en funcionamiento.

Siga las instrucciones dadas sobre la puesta en marcha y mantenimiento periódico.

12. CONCLUSIONES

- A partir del diagnóstico previo a la modificación del banco, fue posible determinar los elementos adecuados que se lograron acoplar con éxito al banco original. Obteniendo así un banco de pruebas mejorado, y con mayores posibilidades para el estudio de la cavitación de bombas centrifugas.

- Se encontró una relación directa entre la NPSHr y el caudal, de acuerdo a los resultados graficados, se comprobó que el aumento de caudal, aumenta la NPSHr. Es decir, a medida que se aumenta el caudal se requiere un mayor NPSHd del sistema.

- Durante la prueba se observó mayor dificultad para la realización de las mediciones a mayor temperatura del fluido, debido al rango de los instrumentos y su sensibilidad a la apertura y cierre de las válvulas.

- Gracias a la retroalimentación generada por esta propuesta, fue posible la construcción de una guía de laboratorio más entendible, donde se explica paso por paso el procedimiento adecuado para la ejecución del laboratorio, y se brinda más claramente las formulas y demás información necesaria para poder terminar con éxito este laboratorio sobre cavitación.

- Se obtuvo mediciones en diferentes rangos de caudal, exponiendo el banco a funcionamiento en condiciones extremas, en todas ellas se realizó el análisis de cabeza y de altura neta se succión positiva, esto para hallar el valor del parámetro expuesto en la norma.

- Gracias a este trabajo se pudo realizar una mejora detallada de la guía para el laboratorio de este banco, donde los estudiantes podrán tener una ejecución más rápida, y sobre todo más fácil de entender.

- Para los ingenieros mecánicos es de gran interés el conocimiento y estudio de fenómenos presentados por cavitación en máquinas hidráulicas, pues con esto se puede garantizar al sector industrial un ahorro de costos en la maquinaria gracias a su detección a tiempo.

13. BIBLIOGRAFÍA

1. Bardi, J. S. (Agosto de 2014). *http://saludestetica.org/*. Obtenido de http://saludestetica.org/2014/08/obtencion-de-burbujas-sin-combustible-bombas-16.html

2. Cruz, I. M. (03 de Octubre de 2013). *instituto politecnico Nacional*. Obtenido de http://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/12302/balcazarcruz.pdf?sequence=1

3. Diaz F., L. E., Mustafá I., Y., & Rios A., L. G. (Mayo de 2006). *Universidad Tecnológica de Pereira Facultad* . Obtenido de http://revistas.utp.edu.co/index.php/revistaciencia/article/view/6499/3803

4. González, J. F. (Noviembre de 2013). *CÁLCULO PARA EVITAR LA CAVITACIÓN EN UN SISTEMA DE BOMBEO MEDIANTE EL USO DE NPSHA Y NPSHR.* Obtenido de http://www2.udec.cl/~josefcastillo/informe-final.pdf

5. GROUP, S. F. (2003). *Principios Básicos para el Diseño de Instalaciones de Bombas Centrifugas.* Sterling SIHI.

6. Ingenieros2011. (sabado de Eenero de 2008). *MECANICA DE FLUIDOS.* Obtenido de CAVITACION: http://ingenieros2011unefa.blogspot.com.co/2008/01/cavitacion.html

7. Muñoz, H. B. (04 de Enero de 2008). *http://www.utpl.edu.ec/ucg*. Obtenido de https://rmluna.files.wordpress.com/2010/04/08_cavitacion.pdf

14. ANEXOS

Conversión de unidades.

Longitud

1 pie = 0.3048 m
1 pulg = 25.4 mm
1 mi = 5280 pie
1 mi = 1.609 km

1 km = 1000 m
1 cm = 10 mm
1 m = 1000 mm

Área

1 pie^2 = 0.0929 m^2
1 pulg^2 = 645.2 mm^2

1 m^2 = 10.76 pies^2
1 m^2 = 10^6 mm^2

Volumen

1 pie^3 = 7.48 gal
1 pie^3 = 1728 pulg^3
1 pie^3 = 0.0283 m^3

1 gal = 0.003 79 m^3
1 gal = 3.785 L
1 m^3 = 1000 L
1 galón imperial = 1.201 gal (EUA)

Velocidad de flujo de volumen

1 pie^3/s = 449 gal/min
1 pie^3/s = 0.0283 m^3/s
1 gal/min = 6.309×10^{-5} m^3/s

1 gal/min = 3.785 L/min
1 L/min = 16.67×10^{-6} m^3/s
1 m^3/s = 60 000 L/min

Temperatura

$T(°C) = [T(°F) - 32]\frac{5}{9}$
$T(°F) = \frac{9}{5}[T(°C)] + 32$

Densidad

1 slug/pie^3 = 515.4 kg/m^3

Peso específico

1 lb/pie^3 = 157.1 N/m^3

Potencia

1 hp = 550 lb-pie/s
1 hp = 745.7 W

Presión

1 bar = 100 kPa
1 bar = 14.50 lb/pulg^2

Energía

1 lb-pie = 1.356 J
1 Btu = 1.055 kJ
1 W-h = 3.600 kJ

1 lb-pie/s = 1.356 W
1 Btu/h = 0.293 W

STERLING

Sterling Fluid Systems (Colombia) S.A.

ANEXO 1. UNIDADES DE PRESION SEGUN EL CUADRO DE REFERENCIA	Código I-CC-215	
	Rev. 1/04	Pág. 18/25

psi	atms.	" H_2O	mmH_2O	cmH_2O	oz/in^2	Kg/cm^2	" Hg	mmHg (Torr)	cmHg	mbar	bar	Pa (N/m^2)	kPa	MPa
1	0.0681	27.71	703.8	70.38	16	0.0704	2.036	51.715	5.17	68.95	0.0689	6895	6.895	0.0069
14.7	1	407.2	10,343	1,034.3	235.1	1.033	29.92	760	76	1013	1.013	101,325	101.3	0.1013
0.0361	0.00246	1	25.4	2.54	0.5775	0.00254	0.0735	1.866	0.187	2.488	0.00249	248.8	0.249	0.00025
0.001421	0.000097	0.0394	1	0.1	0.0227	0.0001	0.00289	0.0735	0.00735	0.098	0.000098	9.8	0.0098	0.00001
0.01421	0.000967	0.3937	10	1	0.227	0.001	0.0289	0.735	0.0735	0.98	0.00098	98	0.098	0.0001
0.0625	0.00425	1.732	43.986	4.40	1	0.0044	0.1273	3.232	0.323	4.31	0.00431	431	0.431	0.00043
14.22	0.968	394.1	100,010	1,001	227.6	1	28.96	735.6	73.56	980.7	0.981	98,067	98.07	0.0981
0.4912	0.03342	13.61	345.7	34.57	7.858	0.0345	1	25.4	2.54	33.86	0.0339	3386	3.386	0.00339
0.01934	0.001316	0.536	13.61	1.361	0.310	0.00136	0.0394	1	0.1	1.333	0.001333	133.3	0.1333	0.000133
0.1934	0.01316	5.358	136.1	13.61	3.10	0.0136	0.394	10	1	13.33	0.01333	1333	1.333	0.00133
0.0145	0.000987	0.4012	10.21	1.021	0.2321	0.00102	0.0295	0.75	0.075	1	0.001	100	0.1	0.0001
14.504	0.987	401.9	10.210	1021	232.1	1.02	29.53	750	75	1000	1	100,000	100	0.1
0.000145	0.00001	0.00402	0.102	0.0102	0.00232	0.00001	0.000295	0.0075	0.00075	0.01	0.00001	1	0.001	0.000001
0.14504	0.00987	4.019	102.07	10.207	2.321	0.0102	0.295	7.5	0.75	10	0.01	1,000	1	0.001
145.04	9.869	4019	102,074	10,207	2321	10.2	295.3	7500	750	10,000	10	1,000,000	1,000	1

Para utilizar este cuadro :

1. Busque la columna con las unidades de origen.
2. Baje en esa columna hasta cuando encuentre el "1".
3. Permaneciendo en la misma hilera, muévase horizontalmente hasta la columna con las unidades a las cuales quiere convertir.
4. Multiplique el número de esa casilla por la cantidad de la cual está cambiando para obtener el valor convertido

Factor de fricción en la zona de turbulencia

Tamaño de conducto nominal (pulg)	Factor de fricción, f_T	Tamaño de conducto nominal (pulg)	Factor de fricción, f_T
½	0.027	4	0.017
¾	0.025	5	0.016
1	0.023	6	0.015
1¼	0.022	8–10	0.014
1½	0.021	12–16	0.013
2	0.019	18–24	0.012
2½, 3	0.018		

Rugosidad de conductos.

Material	Rugosidad, ϵ (m)	Rugosidad, ϵ (pie)
Vidrio, plástico	Suavidad	Suavidad
Cobre, latón, plomo (tubería)	1.5×10^{-6}	5×10^{-6}
Hierro fundido: sin revestir	2.4×10^{-4}	8×10^{-4}
Hierro fundido: revestido de asfalto	1.2×10^{-4}	4×10^{-4}
Acero comercial o acero soldado	4.6×10^{-5}	1.5×10^{-4}
Hierro forjado	4.6×10^{-5}	1.5×10^{-4}
Acero remachado	1.8×10^{-3}	6×10^{-3}
Concreto	1.2×10^{-3}	4×10^{-3}

Presiones de saturación a distintas temperaturas.

t_s (°C)	p_s (bar)	t_s (°C)	p_s (bar)
0,00	0,006108	31	0,04491
0,01	0,006112	32	0,04753
		33	0,05029
1	0,006566	34	0,05318
2	0,007055	35	0,05622
3	0,007575		
4	0,008129	36	0,05940
5	0,008718	37	0,06274
		38	0,06624
6	0,009345	39	0,06991
7	0,010012	40	0,07375
8	0,010720		
9	0,011472	41	0,07777
10	0,012270	42	0,08198
		43	0,08639
11	0,013116	44	0,09100
12	0,014014	45	0,09582
13	0,014965		
14	0,015973	46	0,10086
15	0,017039	47	0,10612
		40	0,11162
16	0,018168	49	0,11736
17	0,019362	50	0,12335
18	0,02062		
19	0,02196	51	0,12961
20	0,02337	52	0,13613
		53	0,14293
21	0,02485	54	0,15002
22	0,02642		
23	0,02808	55	0,15741
24	0,02982	56	0,16511
25	0,03166	57	0,17313
		58	0,18147
26	0,03360	59	0,19016
27	0,03564		
28	0,03778	60	0,19920
29	0,04004	61	0,2086
30	0,04241	62	0,2184

(Continúa)

t_s (°C)	p_s (bar)	t_s (°C)	p_s (bar)
63	0,2286	85	0,5780
64	0,2391	86	0,6011
65	0,2501	87	0,6249
66	0,2615	88	0,6495
67	0,2733	89	0,6749
68	0,2856	90	0,7011
69	0,2984	91	0,7281
70	0,3116	92	0,7561
71	0,3253	93	0,7849
72	0,3396	94	0,8146
73	0,3543	95	0,8453
74	0,3696	96	0,8769
75	0,3855	97	0,9094
76	0,4019	98	0,9430
77	0,4189	99	0,9776
78	0,4365	100	1,0133
79	0,4547	101	1,0500
80	0,4736	102	1,0878
81	0,4931	103	1,1267
82	0,5133	104	1,1668
83	0,5342	105	1,2080
84	0,5557		

Densidad del agua líquida entre 0 °C y 100°C

www.vaxasoftware.com

Presión externa: 1 atm = 101 325 Pa

Temperatura °C	Densidad kg / m^3	Temperatura °C	Densidad kg / m^3	Temperatura °C	Densidad kg / m^3
0 (hielo)	917,00	33	994,76	67	979,34
0	999,82	34	994,43	68	978,78
1	999,89	35	994,08	69	978,21
2	999,94	36	993,73	70	977,63
3	999,98	37	993,37	71	977,05
4	1000,00	38	993,00	72	976,47
5	1000,00	39	992,63	73	975,88
6	999,99	40	992,25	74	975,28
7	999,96	41	991,86	75	974,68
8	999,91	42	991,46	76	974,08
9	999,85	43	991,05	77	973,46
10	999,77	44	990,64	78	972,85
11	999,68	45	990,22	79	972,23
12	999,58	46	989,80	80	971,60
13	999,46	47	989,36	81	970,97
14	999,33	48	988,92	82	970,33
15	999,19	49	988,47	83	969,69
16	999,03	50	988,02	84	969,04
17	998,86	51	987,56	85	968,39
18	998,68	52	987,09	86	967,73
19	998,49	53	986,62	87	967,07
20	998,29	54	986,14	88	966,41
21	998,08	55	985,65	89	965,74
22	997,86	56	985,16	90	965,06
23	997,62	57	984,66	91	964,38
24	997,38	58	984,16	92	963,70
25	997,13	59	983,64	93	963,01
26	996,86	60	983,13	94	962,31
27	996,59	61	982,60	95	961,62
28	996,31	62	982,07	96	960,91
29	996,02	63	981,54	97	960,20
30	995,71	64	981,00	98	959,49
31	995,41	65	980,45	99	958,78
32	995,09	66	979,90	100	958,05