

Un experimento de enseñanza e investigación sobre el fenómeno de la cavitación en bombas centrífugas



Jorge Luis Reyes De la Cruz¹, Gerardo Ruiz Chavarría², Sergio Hernández Zapata²

¹*Facultad de Metalurgia y Electromecánica, Departamento de Mecánica, Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Holguín, Cuba, Las Coloradas s/n. CP.83329.*

²*Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito exterior S/N de Ciudad Universitaria C.P 04510, Distrito Federal.*

E-mail: jreyes@ismm.edu.cu

(Recibido el 25 de Diciembre de 2009; aceptado el 20 de octubre de 2010)

Resumen

La cavitación un fenómeno recurrente en las bombas centrífugas fundamentalmente. Es un proceso físico muy parecido a la ebullición, la diferencia consiste en que en esta, la formación de burbujas se produce cerca de las superficies sólidas y es debido a una disminución de la presión dinámica por debajo de la presión de vapor del líquido en movimiento. Posteriormente cuando la presión vuelve a aumentar se produce la implosión de las burbujas que generan ondas de choques, que pueden dañar el impulsor de la bomba provocando pérdida de eficiencia. Para estudiar este fenómeno se ha construido una instalación experimental, consistente en un circuito hidráulico alimentado por una bomba centrífuga. Para medir la presión se utilizan transductores piezoeléctricos y su registro con tarjetas de adquisición de datos de 14 y 16 bits de resolución. Se muestra como el surgimiento de la cavitación depende de variables como la temperatura del líquido, el gasto volumétrico y la altura de succión. Se presentan gráficas de la presión en función del tiempo, se muestran también datos de las vibraciones que ocurren al surgir la cavitación y algunas imágenes de la evolución de las burbujas dentro de las tuberías. Finalmente, se hace propuesta para lograr disminuir o eventualmente eliminar la cavitación o sus efectos. Se debe destacar que esta es una alternativa a los túneles de cavitación, que se ha construido con materiales que son fáciles de conseguir.

Palabras clave: Cavitación, bombas centrífugas.

Abstract

Cavitation is a recurrent phenomenon, fundamentally in centrifugal pumps. It is a physical process very similar to boiling. However, in this case the bubbles form near the solid surfaces due to the dynamical pressure falling below the vapor pressure of the flowing liquid. As the pressure increases once again the bubbles implode producing shock waves that may damage the impeller of the pump leading to a smaller efficiency. In order to study this phenomenon, an experimental setup has been built consisting of a hydraulic circuit fed by a centrifugal pump. Piezoelectric transducers are used to measure the pressure. The information is registered in cards of data acquisition with a resolution of 14 or 16 bits. The emergence of cavitation depends on variables such as the liquid temperature, the volumetric flow rate and the suction height. Curves of pressure as a function of time are obtained. Data on vibrations that occur as a result of cavitation as well as images of the bubble evolution inside the pipes are also shown. Finally, a method for decreasing (or, eventually eliminating) cavitation and its effects is proposed. It should be remarked that this is an alternative to the cavitation tunnels requiring only materials that are easy to obtain.

Keywords: Cavitation, Centrifugal pumps.

PACS: 47.85.Dh, 47.55.dp, 47.15.G

ISSN 1870-9095

I. INTRODUCCIÓN

La **cavitación** constituye un fenómeno recurrente de la hidráulica, afecta el funcionamiento de las bombas centrífugas disminuye el rendimiento de la instalación, ésta presenta ruidos y vibraciones que influyen directamente en los costos del mantenimiento. Para estudiar este fenómeno se construyó una instalación experimental (interesante por su sencillez para la enseñanza y la investigación de los aspectos fundamentales del fenómeno). Los objetivos

principales de los ensayos son: estudiar el comportamiento del fluido y su inestabilidad hidrodinámica en un circuito hidráulico, producido en la instalación durante el funcionamiento de una bomba centrífuga; establecer regulaciones del flujo a diferentes gastos en condiciones irregulares que permitan analogías con el comportamiento de los parámetros vinculados con el fenómeno de la cavitación.

Los cambios cualitativos obtenidos en el flujo a causa de la variación del gasto volumétrico, manteniendo las demás

condiciones constantes en el proceso, deben estudiarse con la Teoría de Inestabilidades Hidrodinámicas. Actualmente se utiliza para explicar una gran cantidad de fenómenos (Flujo de Taylor-Couette, Flujos de Rayleigh-Benard, Marangoni y Rompimientos de Simetría de un flujo alrededor de un obstáculo al cambiar el número de Reynolds, por nombrar solamente algunos de los más típicos).

La presente experiencia se llevo a cabo en el Taller de Fluidos-Tlahuizcalpan, Facultad de Ciencias de la UNAM, donde se realizaron ensayos en el circuito hidráulico, seguimiento, registro y procesamiento de datos, con la elaboración de las curvas características; dentro de éstas, la energía de la altura de succión suministrada a la bomba (en metros), las presiones registradas en diferentes puntos de la instalación, el gasto registrado para diferentes regulaciones del flujo a través de las válvulas de regulaciones y la temperatura del fluido.

A. Fenómeno de cavitación

La palabra cavitación proviene del latín “cavus”, que significa espacio hueco o cavidad. En los diccionarios técnicos, se define como: la rápida formación y colapso de cavidades en zonas de muy baja presión en un flujo líquido. Según algunos autores que han trabajado en el tema [1, 2, 8, 6], la cavitación consiste en la formación de vapor de agua a causa del descenso local de la presión por debajo de la presión de saturación del fluido a la temperatura del líquido, la subsiguiente condensación brusca, produciendo golpes hidráulicos. Se puede decir que supone la ebullición del líquido a temperatura ambiente provocado por muy bajas presiones.

Esta zona de vaporización local puede ser estable o pulsante, lo que altera usualmente el campo normal del flujo. Este fenómeno se caracteriza, por la formación de bolsas (de vapor y gas) en el interior, junto a los contornos de una corriente fluida en rápido movimiento.

La condición física fundamental para la aparición de la cavitación es, evidentemente, que la presión en el punto de formación de estas bolsas disminuya hasta la tensión de vapor del fluido en cuestión.

La *cavitación* es una vaporización local del líquido, inducido por una reducción hidrodinámica; en contraste a la ebullición, la cual puede ser causada por la introducción de calor o por la reducción de la presión estática ambiente del líquido representada en la gráfica de la figura No1.

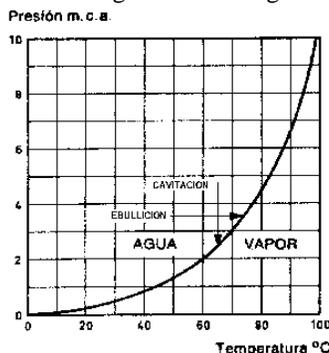


FIGURA 1. Diagrama de Cambios de Fase para el Agua.

En los líquidos es posible obtener una presión muy baja debido al movimiento del fluido. La cavitación se presenta al igualar la presión de fluido con la presión de vapor del líquido, lo anterior, aparece en los pasajes irregulares y estrechos de una bomba. Cuando en un líquido que fluye se forman burbujas de vapor, se dirigen a regiones de mayor presión, donde repentinamente se rompen con intensidad suficiente que provocan un daño estructural grave. La menor presión se localiza en el ojo del impulsor de una bomba y en este lugar se origina el fenómeno de la cavitación.

En nuestro caso definimos *cavitación* como: “Un proceso físico donde la formación de burbujas se produce cerca de las superficies sólidas y es provocado por la disminución de la presión dinámica por debajo de la presión de vapor del líquido en movimiento”. Posteriormente cuando la presión vuelve a aumentar se produce la implosión de las burbujas que generan ondas de choques, las cuales pueden dañar el impulsor de la bomba provocando pérdida de eficiencia.

En la práctica, la cavitación se detecta por el ruido, vibraciones y la disminución del caudal en más de un 3%, con el desarrollo de la cavitación, el ruido y las vibraciones aumentan, la carga y el caudal disminuyen, hasta valores nulos. Estas señales son consideradas como insuficientes e inexactas [4], para diagnosticar la aparición y la intensidad de la cavitación.

En las industrias del Níquel y Química en Cuba frecuentemente se observa impulsores destruidos por efecto de la cavitación como el de la figura 2. Daños similares ocurren en las hélices de los barcos.



FIGURA 2. Impulsor de bomba centrífuga seriamente dañado por los efectos de la cavitación.

B. Factores que intervienen en la cavitación

En la literatura consultada [6, 3], se plantea que existen numerosos factores que intervienen en la presencia del fenómeno como:

Relacionados con el fluido

- La temperatura.
- La densidad del fluido.
- Las propiedades físico-mecánicas.
- Las concentraciones de los gases.
- La composición química.
- Las concentraciones de la fase sólida.
- El pH.

Relacionados con las características de la red

- La altura de succión
- La presión atmosférica
- La altura de la Presión de vapor
- Las pérdidas en la succión

Relacionados con la bomba

- El caudal
- La velocidad de rotación
- El coeficiente de velocidad específica

De los factores señalados relacionados con la red se define por altura de succión a la distancia vertical entre el eje de la maquina y el nivel del fluido o pelo de agua. En los relacionados con la bomba el coeficiente de velocidad específica cuyo símbolo es C , su valor se determinado para Bombas con el rodete en voladizo: $C = 880 \log n_s^{3/4}$.

Las consecuencias que produce la cavitación son:

- 1- Pérdida de sólidos en las superficies límites conocida como erosión por cavitación.
- 2- Ruidos generados sobre un ancho espectro de frecuencias llamada frecuencia de golpeo.
- 3- Pérdidas en el rendimiento de la bomba y alteraciones de las propiedades hidrodinámicas.
- 4- Vibraciones.

Sin embargo, en la literatura consultada no existe instalación de forma didáctica y de investigación, donde se observe el comportamiento del fluido en el interior de las tuberías durante la cavitación, tampoco aparece registrada de forma controlada y precisa el comportamiento de las presiones en el interior de la voluta en bomba centrífuga y su visualización.

C. Características de la instalación

Para el desarrollo del experimento se procedió a diseñar **la instalación para evaluar el comportamiento de la cavitación**, de acuerdo con las normas establecidas para este tipo de ensayos (NTC 4990 y el Código ASME, Performance Test Code, Centrifugal Pumps, 8.2. -1965).

La instalación consiste en un circuito hidráulico alimentado por una bomba centrífuga, con tuberías transparente de acrílico que permite visualizar el flujo del fluido y las formación de burbujas producido en la red ; teniendo además las siguientes ventajas: facilidad del montaje, inmunidad a la corrosión, bajo peso y baja rugosidad; en la succión se empleó tubería de 1,0 pulgada de diámetro y en la descarga tubería de 3/4 pulgada de diámetro ensamblada con uniones universales permitiendo la operatividad en el montaje y desmontaje de la bomba y los accesorio de la instalación.

En el presente artículo también se señalan algunos aspectos poseído en el diseño y montaje de la instalación, fruto de la experiencia laboral obtenida por los autores tanto en las industrias del níquel en Cuba, como en la docencia universitaria en el ISMM y en la UNAM.

Los elementos que conforma la instalación son los siguientes:

- 1- Motor eléctrico.

- 2- Bomba centrífuga.
- 3- Secciones de tuberías.
- 4- Tanque de almacenamiento y alimentación del fluido
- 5- Válvulas de regulación del flujo.
- 6- Manómetros
- 7- Transductores piezoeléctricos
- 8- Medidor volumétrico de flujo

La representación esquematiza de los elementos de la instalación se muestran en la figura No 3

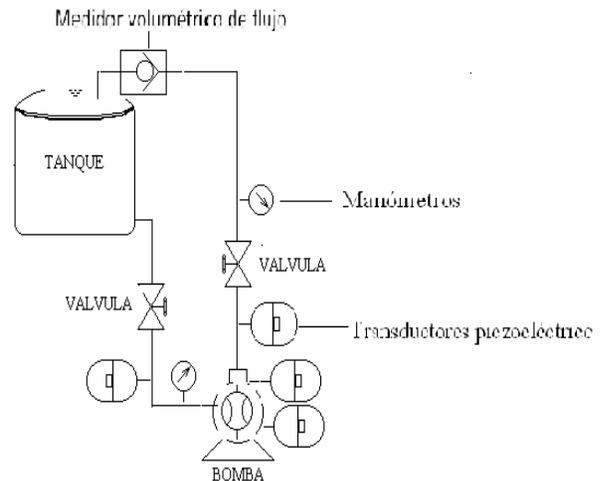


FIGURA 3. Esquema de los Componentes de la instalación.

D. Características de la bomba

La bomba utilizada en la instalación es centrífuga, aproximadamente el 70% de la producción total de las bombas corresponden a este tipo. Generalmente se usan en aplicaciones mineras (por su eficiencia en el manejo de sólidos), acueductos, industrias metalúrgica, químicas, oleoductos y aplicaciones domésticas. Las ventajas que presentan son varias de acuerdo a su aplicación, sin embargo, se debe seleccionar, instalar y utilizar con cuidado, considerando el tipo de fluido y los requisitos pertinentes en la instalación. De no ser así, trabajara de forma deficiente con perdidas mecánicas en sus componentes de trabajo y con un rendimiento bajo.

Una bomba centrífuga está formada básicamente por dos elementos:

- Impulsor o rodete, que es la parte móvil que gira y que incluye a los álabes, es el elemento más importante en el intercambio energético de la máquina y es donde se produce mayor incremento de energía del líquido.

- Voluta o parte fija, donde se produce la difusión del flujo (disminución de la velocidad, por aumento de sección), recuperándose cierto nivel de presión, la parte más estrecha de la voluta recibe el nombre de lengüeta o corta-aguas y da lugar a un punto de estancamiento, al separar la corriente en dos partes, una que continua girando con el impulsor y otra que sale hacía el conducto de impulsión.

La bomba utilizada posee las siguientes características, según datos del fabricante: 3480 rpm, caudal de 6,4 galones/minuto, 100 ft (30,5 m) de altura de presión y un diámetro de rodete de 10 cm con 6 álabes.

E. Materiales utilizados en la instalación de la red

Tubería en la succión o entrada

Tubo de acrílico de: 1,0 pulgada de diámetro, roscados en los extremos

Válvula de regulación de globo para el control de flujo de 1,0 pulgada

Tubería en la descarga o salida

Tubo de acrílico de: 3/4 pulgada de diámetro, roscados en los extremos

Válvula de regulación de globo para el control de flujo de 3/4 pulgada

La tubería de succión es de un diámetro mayor que el de la conexión de la tubería de impulsión lo que disminuye las pérdidas de energía a la entrada de la bomba.

F. Depósito o tanque de almacenamiento y de alimentación

Un tanque construido de lámina de acero de un espesor de 3 mm, que resiste la presión de trabajo y a las temperaturas de los ensayos, provisto de una tapa desmontable, con un sistema de cierre que garantiza su hermeticidad, con capacidad para almacenar 85,0 litros de volumen.

Para medir la presión se utilizaron transductores piezoeléctricos con las siguientes características:

Dos transductores que tienen integrada una etapa de amplificación, uno de 50 PSI y otro de 150 PSI, ubicado en la entrada y salida de la voluta de la bomba y dos captosres de 50 PSI que proporcionan voltajes de salida máximos de 100 mV aproximadamente, ubicados en las tuberías de succión y en la de impulsión o descarga. Las señales producidas fueron registradas en con tarjeta de adquisición de datos de 4 canales con 14 bits de resolución, con una frecuencia de muestreo de 200 Hz. La alimentación de los captosres fue con una fuente de corriente directa con un voltaje de 10 volt; 0,1 A; Para amplificar las señales y para filtrarlas se utilizó un filtro modelo SR630, de Stanford Research Systems.

Para monitorear la temperatura del líquido dentro del tanque de almacenamiento se colocó un termopar de contacto en el interior del tanque, dentro de la masa del líquido.

II METODOLOGÍA

A. Método Experimental

Existen dos formas para disminuir la presión de succión durante el funcionamiento de una instalación hidráulica:

- 1- Por medio de la evacuación del fluido contenido en un tanque en la tubería de succión.
- 2- Por el estrangulamiento de la válvula de succión que conduce el flujo a la bomba.

En nuestro experimento se utilizó la segunda forma, ya que se apega a la realidad de las instalaciones de campo; la prueba consiste en cambiar gradualmente el caudal obtenido, registrando este gasto en el medidor volumétrico y

las presiones medidas por los captosres de presión ubicada en cuatros puntos. La prueba se repite para varios caudales de operación, manipulando la válvula de control de flujo.

Durante el estrangulamiento de la válvula en la tubería de succión que conduce el flujo de la bomba, se somete a regulaciones (disminución del orificio que controla la salida del flujo por la válvula) observando cómo las curvas indican los valores de la presiones en los canales de la tarjeta de adquisición de datos, en el caso específico el transductor piezoeléctrico que transmite la presión en la salida del impulsor cae por debajo de los valores de la curva de presión que presentaba anteriormente, este descenso de la presión en este punto llega a ser menor que la presión que existe en la entrada del impulsor, provocando además sacudidas o vibraciones perceptibles en las tuberías y estructura de la instalación. Esto es una muestra que la presión en la salida del impulsor cae por debajo de la presión de vapor o de saturación del agua a dicha temperatura, obteniéndose una mezcla de líquido y burbujas de vapor en la tubería de impulsión formando un oscilador de burbuja, la cual justifica la presencia del fenómeno de cavitación en esos instantes. Hay que recordar que el volumen específico del vapor es mayor que el volumen específico del líquido, y al estar las dos fases presentes, el caudal suministrado por la bomba disminuye dramáticamente.

La experiencia, como fue señalado en párrafos anteriores, consistió en realizar mediciones de:

- a. El caudal: Mediante un caudalímetro (medidor de flujo volumétrico).
- b. Las presiones a la entrada y a la salida de la voluta de la bomba mediante transductores piezoeléctricos de presión.
- c Las presiones a la entrada y a la salida de la tubería de la bomba mediante transductores piezoeléctricos de presión.
- d. Temperatura del líquido mediante termopar acoplado a un multímetro.

En los ensayos realizados al producirse la cavitación se hace visible y confirma, la dependencia que tiene esta de su intensidad y secuencia de ocurrencia de las variables como la temperatura del líquido, el gasto volumétrico, la altura de succión y el número de revoluciones por minuto del impulsor.

Para ello fue necesario variar el caudal mediante la válvula de regulación dispuesta a la salida de la tubería de succión que está conectado al tanque de almacenamiento del fluido, de forma que se realizaran las mediciones del caudal pasando desde la válvula completamente abierta hasta cerrada la misma. Se esperaba que la variación del caudal provocara un cambio en los valores de las presiones a la entrada, a la salida de la voluta de la bomba y de las tuberías de succión e impulsión, así como el registro y control de las temperaturas.

B. Caracterización de los factores que intervienen en la ocurrencia de la cavitación

Las propiedades y características del fluido, la red y la bomba que se usaron en los experimentos se listan a continuación:

Fluido

- La temperatura: 8 – 64 °C
- La densidad del fluido: 1000 Kg/ m³ (Agua desionizada para evitar la conductividad hacia los transductores piezoeléctricos de los iones y sales producto del tratamiento químico).

Características de la red:

- Altura de succión: 1,25-1,50 m
- Presión atmosférica: 7,74 m (altitud de 2200 MSNM)
- Altura de la Presión de vapor: 3,80 m
- Perdidas en la succión: Tuberías y accesorio con superficie pulida (sin rugosidad)

Bomba centrífuga:

- Caudal (Q): (6,4- 0,07) G/min
- Velocidad de rotación (η): 3480 rpm
- Coeficiente de velocidad específica(C): 1130,3

C. Velocidad específica de aspiración

El término “Velocidad específica representado con la simbología η_s ”, establece la relación de las características de funcionamiento de la velocidad de diseño, es decir, es el que relaciona los factores principales señalados que dependen de la máquina (bomba centrífuga) y agrupa a las características de rendimiento, capacidad, carga y velocidad de rotación, en un sólo término.

La velocidad específica en cualquier condición dada de carga y capacidad, supone que la carga y capacidad utilizadas son para la máxima eficiencia de la bomba representando una medida cuantitativa del mejor funcionamiento a ese rendimiento máximo. Un mismo valor de la velocidad específica puede obtenerse con diferentes velocidades de rotación a la que funciona la bomba, realizando ajuste en los valores del gasto y la altura de succión. La velocidad específica η_s , [6], está dada por la ecuación (1):

$$\eta_s = \frac{\eta \sqrt{Q}}{H_s^{3/4}} \text{ rev/min.} \quad (1)$$

D. Altura neta positiva en la aspiración

El término más común para describir las condiciones de succión de una bomba es la altura de succión positiva neta (*NPSH por la sigla en inglés*), definida por el Hydraulic Institute (U.S.A.). El **NPSH** (altura neta positiva en la aspiración) es la diferencia entre la presión del líquido a bombear referida al eje del impulsor y la tensión de vapor del líquido a la temperatura de bombeo (es la presión del líquido, que a esa temperatura, se encuentra en equilibrio con su vapor en un depósito cerrado). Debemos por tanto conocer y combinar en cada caso el NPSH disponible en la instalación y el NPSH requerido por la bomba.

Para calcular la NPSH de la bomba, se realizaron mediciones de las siguientes variables: presiones de succión y descarga, el caudal y la temperatura.

E. Condición de mejoras para disminuir la presencia y efectos de la cavitación

De acuerdo a las referencias consultadas, los cálculos teóricos deben cumplir la condición para que los parámetros analizados en una instalación disminuyan en la presencia de la cavitación, esta condición es:

$$NPSH_d \geq NPSH_r$$

La reserva requerida y admisible de cavitación es una función del gasto. En una instalación la ocurrencia de la cavitación será mínima cuando se cumpla la condición

$$NPSH_A \geq NPSH_R$$

NPSH disponible o admisible: Están en función de la instalación e independiente del tipo de bomba y relaciona concepto de reserva admisible de cavitación NPSAd y se define a partir de la ecuación:

$$(NPSH)_d = Patm + Hsucc - \Sigma h - Ht ; m \quad (2)$$

Donde:

Patm - Altura de la Presión atmosférica [m].

Hsucc - Altura de succión o nivel del líquido [m].

Σh - Pérdidas en la altura de succión [m]

Ht - Altura de la Presión de vapor [m].

El NPSH requerido: Dato básico y característico de cada bomba, varía según el modelo, tamaño y condiciones de servicio, recomendada en los datos que facilita el fabricante.

En la succión de una bomba debe garantizarse una cantidad de energía crítica (carga efectiva, Δh_s , por encima de la tensión de vapor), para vencer las resistencias hidráulicas en el tramo hasta los álabes del rodete y garantizar que la velocidad y aceleración sean suficientes a la entrada del impulsor [5].

Es conveniente diferenciar la NPSH requerida, NPSHR, de la NPSH disponible, NPSHD; la primera se refiere a las condiciones de succión necesarias para el funcionamiento correcto de la bomba con la menor posibilidad de ocurrencia de la cavitación, mientras que la segunda expresa la forma en la cual opera la instalación.

F. Diseño de los ensayos a realizar en la instalación experimental.

En el diseño de los ensayos a realizar en la instalación experimental y conociendo los factores que influyen en la ocurrencia de la cavitación se seleccionaron, determinaron y calcularon las variables de mayor incidencia involucradas en la aparición del fenómeno, los cuales son:

- Altura total de succión de la instalación H_s
- caudal Q
- velocidad específica η_s
- Temperatura del fluido T_f

Estos factores con los niveles determinado y obtenido durante los ensayos experimentales se expone en la tabla No 3, en el desarrollo de las pruebas se seleccionaron varias posiciones de apertura de la válvula de control de flujo (1/4, 1/2, 3/4), mediante el giros del globo de la válvula de regulación de flujo.

III RESULTADOS

A. Datos procesados

Del diseño de los ensayos realizados en la instalación se realizó el cálculo de los parámetros de entrada y salida resumiéndose sus valores representado en la tabla No II.

TABLA I. Datos calculados de los Parámetros de entrada y salida del experimento.

Parámetros	Símbolo	Rangos de abertura principales de la válvula de succión			
		Abierta totalmente 1	Mín Cerrada 1/4	Medio Cerrada 1/2	Máx Cerrada 3/4
Altura de succión (m)	Hs	1,5	1,25	1,35	1,50
Caudal (G/min)	Q	6,4-6,3	5,2-4,5	2,5-1,50	0,07-0,1
Velocidad específica (rev/min)	n_s	51,6	51,1	39,4-26,4	6,3-5,2
Temperatura del fluido (°C)	Tf	52-64	8-12	27- 48	52-64

B. Datos Experimentales

Durante los ensayos se obtuvo el comportamiento de la presión a través de los registrados por los captosres piezoeléctricos en las tuberías de succión e impulsión así como los de la entrada y salida en la voluta datos descrito anteriormente y presentado en la tabla No III.

TABLA II. Presiones registradas en los puntos de instalación de captosres piezoeléctrico en relación al caudal y la abertura de la válvula de regulación.

Caudal [GAL/min]	Pe en la voluta Canal 0 [PSI]	Ps en la voluta Canal 2 [PSI]	Pe en la tubería de succión Canal 1 [PSI]	Ps en la tubería impulsión Canal 3 [PSI]	Posición de la palanca reguladora de la válvula de globo [Ang]
0.0	19.33	15.75	17.09	24.2	Cerrado el sistema
0.0	-0.66	-2.00	8.90	23.9	Cerrada entrada
6.28	12.66	11.62	14.07	25.16	Abierta total
5.32	8.66	6.62	12.94	22.54	Cerrada 1/4
4.36	11.0	1.75	11.4	20.40	Cerrada 1/2
1.20	0.0	-2.87	9.54	20.06	Cerrada 3/4

Para determinar la influencia que produce la variación de la velocidad específica (velocidad de rotación, caudal) en relación a la regulación del voltaje del accionamiento de la bomba, se sometió a variaciones la válvula de regulación obteniendo los valores presentados en la tabla No IV.

TABLA III: Datos registrados durante la regulación del voltaje de alimentación al motor de la bomba.

Regulación de válvula	Caudal g/min	Pts(Psi) Canal 1	Pvs(Psi) Canal 0	Pvd(Psi) Canal 2	Ptd(Psi) Canal 3	Voltaje (Volt)	Temp (°C)
Cierre de la vál 3/4	0,07	9.54	0.33	-2.87	20.6	127	8
Cierre de la vál 3/4	0,07	9.54	1.00	-2.87	20.6	120	9
Cierre de la vál 3/4	0,07	9.54	0.33	-2.87	20.6	110	9
Cierre de la vál 3/4	0,07	9.54	0.33	-2.75	20.8	100	10
Cierre Válv 3/4	0,07	9.73	1,00	-2.50	20.8	90	10
Cierre val 3/4	0,07	9.73	1.33	-2.37	20.6	80	10
Cierre vál 3/4	0,07	9.16	2.00	0.12	22.7	70	10

C. Cálculo de los valores de los parámetros fundamentales de la instalación

El resultado de los valores de los parámetros hidráulicos de la instalación se realizó por las ecuaciones desarrolladas en epígrafe anteriores, representado en la tabla No. IV.

Tabla IV Valores de los parámetros fundamentales del cálculo hidráulico.

Parámetros de cálculo en la instalación	Resultados	Unidad
Velocidad específica; $[n_s]$	6,30	rev/min
Altura neta positiva en la aspiración requerida; $[NPSH_R]$	5,29	m
Altura neta positiva en la aspiración disponible; $[NPSH_A]$	1,09	m

D. Obtención de las curvas del comportamiento de presión en el interior de la voluta

El comportamiento de la presión en varias condiciones se muestra en la figura 4, donde se ha graficado presión vs tiempo. En la figura No 4A se puede observar como en un primer momento la presión en la salida de la voluta, expresada en (Psi) representada por la línea roja es mayor que la presión en la entrada de la voluta, representada por la línea azul, en ese instante el comportamiento es de la bomba sin cavitatar; luego al disminuir el gasto a través de la válvula de regulación estas líneas se cruzan significando que existe un descenso de la presiones con valores similares al existente a la presión a la entrada de la voluta, comenzando a cavitatar la bomba, como aparece representada en la figura 4B y luego al producirse la caída de presión expresada (Psi) más intensa en la salida de la voluta cavitando a su máxima intensidad con valores menores que lo existente en la presión a la entrada de la voluta como aparece representado en la figura 5.

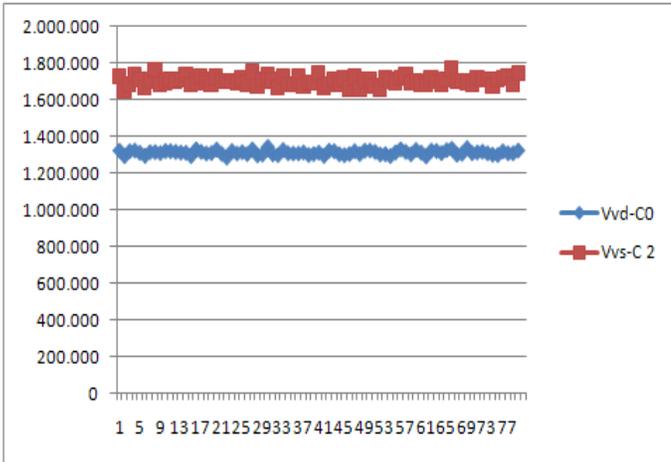


FIGURA 4A Comportamiento de la presión sin cavitación (P vs t).

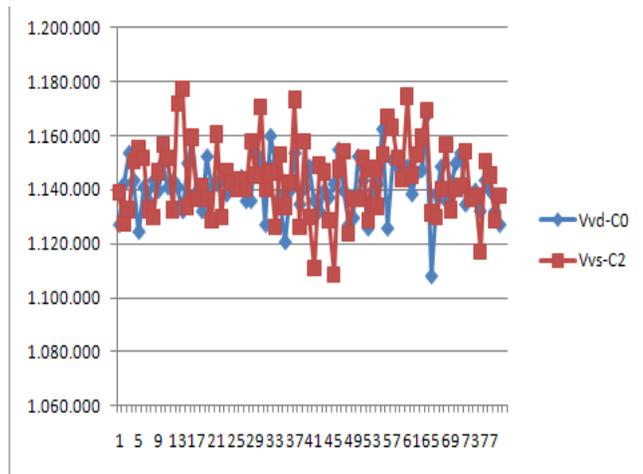


FIGURA No 4B Comportamiento de la caída de cuando comienza a cavitación (P vs t).

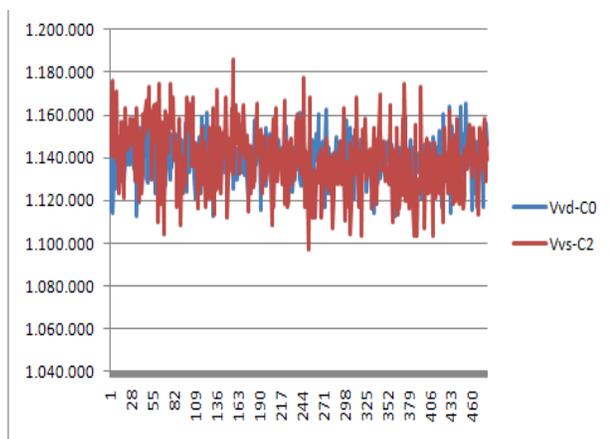


FIGURA 5 Comportamiento de la presión cavitando (P vs t).

E. Comportamiento gráfico de la caída de presión durante la cavitación

Durante la regulación del caudal mediante la válvula de regulación de flujo se captaron los valores de la presión en *Lat. Am. J. Phys. Educ. Vol. 4, Suppl. 1, Nov. 2010*

el instante en que variaba su estabilidad registrándose a través de la tarjeta de adquisición de datos, que permite la discretización de los valores de presión de forma discontinua y para registrar los datos, utiliza un convertidor A/D, NI- 6009 creado por National Instruments, este dispositivo transforma la señal voltaje en cadena de 14 bit, esta se almacena en un archivo de PC, además tiene la finalidad cuantificar y registrar el número de datos adquirido, el tiempo de muestreo y la resolución del convertidor, posee gran capacidad de almacenaje, su conexión se realiza de manera directa en un puerto USB y permite un rápido acceso a la información generada en los cuatros canales simultáneamente.

En el almacenamiento de la PC posee un Software identificado como LabVIEW, El lenguaje que usa se llama lenguaje G, donde la G simboliza que es lenguaje Gráfico; es una herramienta gráfica para pruebas, control y diseño mediante la programación, su principal característica es la facilidad de uso, válido para programadores profesionales como para personas con pocos conocimientos en programación pueden hacer (programas) relativamente complejos una herramienta gráfica de programación, esto significa que los programas no se escriben, sino que se dibujan, facilitando su comprensión.

A través del Software con la tarjeta de adquisición y programa scilab- 5.1.1 es posible obtener el comportamiento gráfico de la frecuencia de giro del impulsor de la bomba y la señal periódica de la caída de presión producto de la cavitación.

La elección de la frecuencia de muestreo en 200 Hz se ha hecho para poder determinar la frecuencia de giro del impulsor. De acuerdo al teorema de Nyquist, con esta frecuencia de muestreo es posible detectar en la señal frecuencias de hasta 100 Hz. Se ha utilizado el paquete Scilab para aplicar la transformada rápida de Fourier a las señales de presión. Esto se muestra en la figura 6A. Se puede observar un pico a 60 Hz, que corresponde al ruido del sector eléctrico y un poco a su izquierda a un pico en 58.5 Hz, que corresponde a la frecuencia de giro de la bomba.

Hay que explicar la segunda grafica, que muestra las caídas de presión cuando cambia el gasto volumétrico.

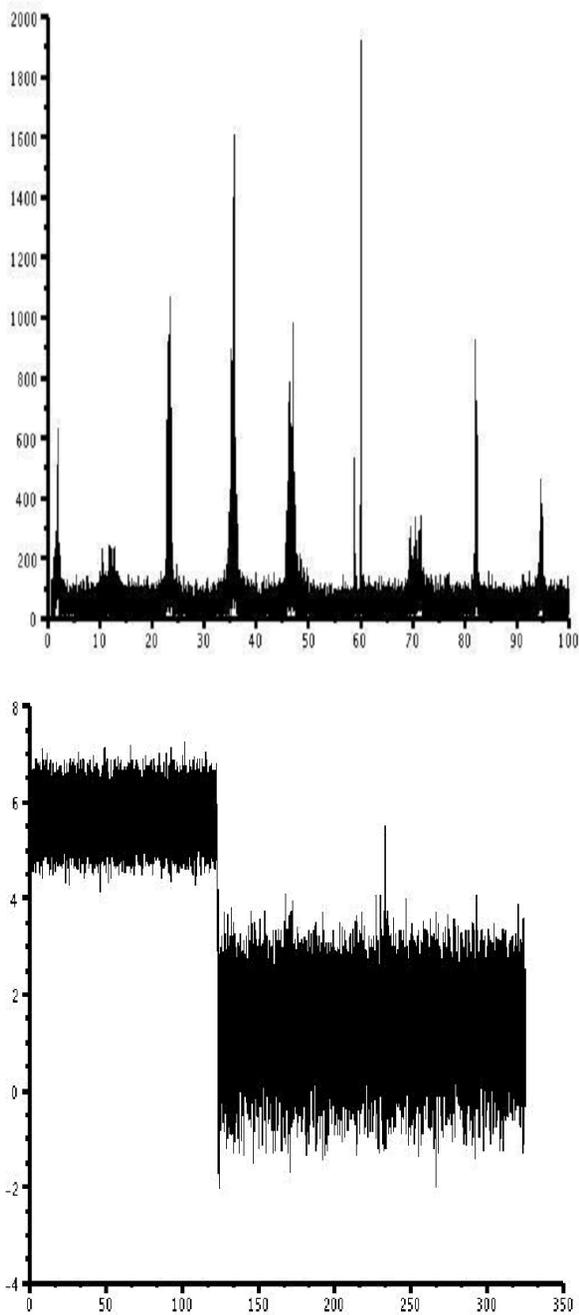


FIGURA 6A. Transformada de Fourier de señal de presión con el pico de 60 Hz y un pico menos pronunciado que corresponde a la frecuencia de giro de la bomba y señal periódica que refleja la caída de presión.

La figura 6B, se observa un cambio del valor de la presión produciéndose caídas de presión al cambiar el gasto, en la imagen adquirida por el captor de presión de 50 PSI en el canal 2, se observa durante la regulación del flujo un comportamiento oscilatorio, coincidiendo con el oscilador formado en la tubería de impulsión o descarga y la salida fuera de la voluta de la bomba las burbujas de vapor producida por la cavitación.

Con el empleo de los captores piezoeléctrico del tipo PMP de 150 PSI y 50 PSI, instalado en la salida y entrada de la voluta de la bomba ubicado en los canales 0 y 2 de la

tarjeta de adquisición permiten observar el comportamiento de la caída de presión durante la cavitación como aparece representado en la figura No 6B.

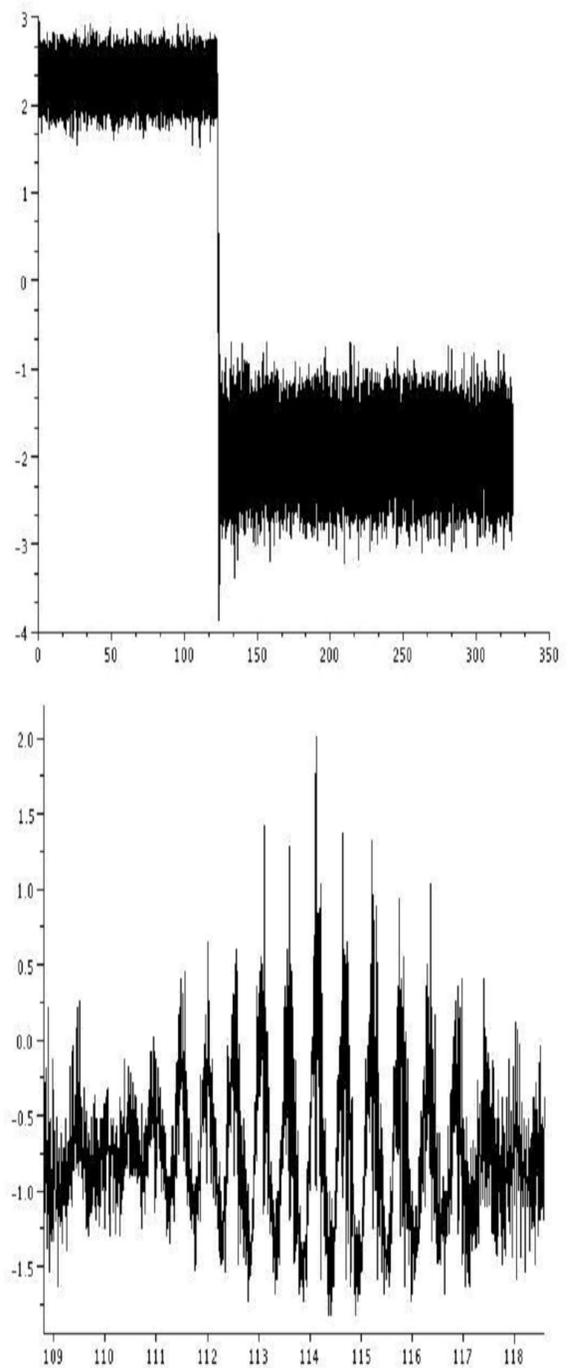


FIGURA 6B. Señal de presión del captor PMP de 150 psi (Se observa la caída de presión adquirida por canal 0) y señal de presión de captor PMP de 50 psi (adquirida por canal 2). Se observa la caída de presión.

F. Imágenes tomadas de la cámara rápida

El comportamiento de la presión registrada por la tarjeta de adquisición de datos y programa dan un reflejo de la inestabilidad hidrodinámica del fluido al circular por el

interior de la tubería y la bomba sin embargo será posible el conocimiento de las personas de como circula un fluido por el interior de una tubería, en el que se forman perturbaciones y turbulencia en el interior de la tubería de succión durante la regulación del flujo, así como el oscilador formado en la tubería de descarga durante la regulación del gasto durante la cavitación.

En la planificación y fabricación de la instalación se proyecta a realizar su construcción con tuberías de acrílico con las especificaciones señaladas en subtópico 1.4, la cual permite visualizar de manera muy clara el comportamiento del fluido al circular por las secciones de tuberías. Mediante la utilización de una cámara rápida utilizando una velocidad de 500 cuadros/segundo, fue posible captar este comportamiento como aparecen en las imágenes de la figura No7; mostrando de forma clara el oscilador que forma el fluido durante la cavitación, que además se hace más inestable en dependencia de la abertura de la válvula de regulación y el caudal producido.

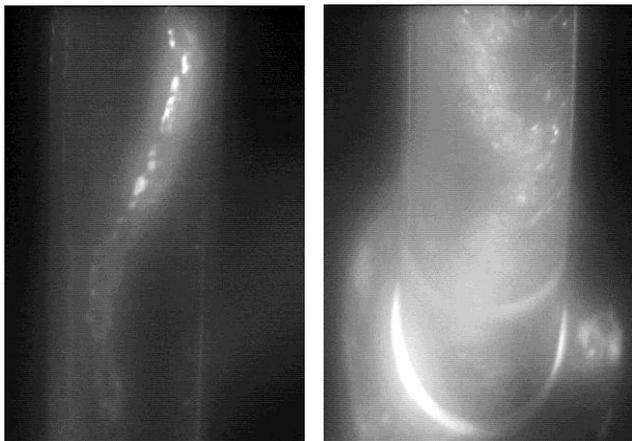


FIGURA 7 Imagen del fluido en la tubería de descarga y el oscilador que forman las burbujas durante la cavitación y el cambio de las burbujas al variar el caudal.

IV. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

A. Resultados

En los ensayos realizados en la instalación se muestra un acercamiento empírico que puede usarse para obtener un cuadro útil de la agresividad del flujo durante la ocurrencia de la cavitación, cuando la turbulencia asociada a la cavitación es grave. Además, presentamos adelantos en la comprensión de mecanismos y parámetros de regulación, para lograr disminuir o eventualmente eliminar la cavitación y sus efectos. Se debe destacar que se han construido, con materiales que son fáciles de conseguir.

De la Condición de mejoras para disminuir la presencia y efectos de la cavitación desarrollada en el subtópico 2.6 y los resultados del cálculo de los parámetros hidráulicos presentados en la tabla No 2 queda demostrado que en la instalación experimental no cumple con la condición de ausencia de la cavitación al NPSHr requerido ser mayor que el NPSHd disponible.

Se pudo observar la cavitación por la regulación del gasto a la entrada de la tubería de succión y con el aumento de la temperatura.

Se observó con claridad la turbulencia que se genera en la tubería de succión durante la regulación y algunas imágenes de la evolución de las burbujas dentro de las tuberías, el oscilador de burbujas en la tubería de descarga que escapan de la bomba cuando se producía la cavitación, así como la instalación al someterse a regulación del flujo mediante la válvula de succión no cumple con la condición de ausencia de cavitación provocando fluctuaciones en el fluido, tuberías y en la estructura de la instalación (Vibraciones).

La captura de datos se realizó mediante la lectura directa de los instrumentos de medición usados como en el caso del caudalímetro en el registro del caudal y la temperatura registrada en el milímetro con el termopar.

B. Interpretación de los resultados obtenidos

Se analizaron el comportamiento de las curvas obtenidas a través de los datos registrados y procesado por **LabVIEW** y el programa computacional **SCILAB-5.1.1**, mostrando con precisión los valores de la caída de presión durante la ocurrencia de la cavitación, vista en simulaciones realizadas anteriormente cuyos resultados obtenidos concuerdan con la teoría acerca del funcionamiento de las bombas centrífugas.

El aumento de la turbulencia en la tubería de succión y permanencia del oscilador en la tubería de impulsión durante la regulación, son muestra que la instalación experimental trabaja en régimen cavitacional.

Se pudo registrar el comportamiento de las variaciones de presión en los diferentes puntos del circuito, quedando enmarcado los valores a los cuales ocurre la caída de presión en la salida del impulsor producto de la ocurrencia de la cavitación.

La teoría expuesta en pláticas y seminarios impartidos con el objetivo de la exposición de los conocimientos acerca del funcionamiento de las bombas centrífugas y la cavitación es totalmente aplicable a la instalación experimental con un acercamiento al funcionamiento en la práctica de instalaciones hidráulicas.

C. Análisis de los errores

Las discrepancias observadas pueden ser posibles a múltiples factores entre los que podemos enumerar:

- Una posible imprecisión en los instrumentos para medir el volumen másico del caudal y la temperatura, ya que estos oscilaban o cambiaban de valor en rango muy pequeños.
- La estabilidad del flujo solo se realizó con la regulación del voltaje, sin tomar en cuenta las variaciones del tamaño del rodete, que puede influir, aunque en menor grado en la eficiencia de la bomba.
- La posible cavitación que pudo sufrir la bomba, pudo producir pérdidas, bajando la eficiencia de esta.
- El tiempo de funcionamiento sin la aplicación de un mantenimiento previo, pudo llevar consigo al desgaste de

los componentes de la bomba centrífuga, lo que pudo en alguna medida bajar el rendimiento de la misma.

- No se midió las oscilaciones de vibraciones provocada en la instalación durante la ocurrencia de la cavitación, siendo solamente visible la intensidad de la misma.

V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se obtuvo con precisión el comportamiento de la presión en las diferentes secciones de la instalación evidenciando la caída de presión que ocurre en el impulsor de la bomba centrífuga al establecer regulaciones del caudal que circulaba por la instalación producto al fenómeno de la cavitación

La instalación posee características semejante a la utilizada en la comprobación por los fabricantes de bomba centrífugas en función de las normativas los modelos de diseño con la entrega de un caudal $Q = 1 \text{ m}^3/\text{s}$, para la carga de 1 metro de la columna de agua.

La instalación experimental constituye un experimento viable para la enseñanza e investigación del fenómeno de la cavitación en bombas centrífugas pequeñas, representando una buena herramienta de trabajo para los estudiantes de la licenciatura en física e Ingenierías que lleven a cabo sus prácticas en el Laboratorio de Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas para visualizar y entender las inestabilidades hidrodinámica que presenta el fluido al circular por la tuberías de un sistema hidráulico.

La instalación propuesta puede ser utilizado con fines docentes e investigativo para visualizar, identificar y registrar los cambios de presiones provocado en paso del fluido por las diferentes zonas de la red y en el interior de la bomba, permitiendo variar los parámetros que ocasionan inestabilidad hidráulica en la tubería.

Quedo demostrado de forma experimental, visual y a través de los cálculos que la instalación no cumple la condición de ausencia de cavitación por lo que es una buena herramienta para ser utilizada como práctica de laboratorio con la docencia y la investigación acerca del fenómeno de la cavitación.

Se debe destacar que la instalación constituye una alternativa para comprender, investigar y establecer regulaciones de los parámetros de funcionamiento de los sistemas hidráulico, siendo esta una solución en la interpretación de la ocurrencia de los túneles de cavitación, que se ha construido con materiales que son fáciles de conseguir.

Para mejorar la operación del banco de cavitación se recomienda instalar en el tanque de alimentación y almacenamiento, un dispositivo indicador de nivel que

refleje el volumen de masa del fluido utilizado por el sistema (tubería y bomba). Tal dispositivos permitirán observar el comportamiento de la masa de agua en la superficie libre del líquido así como el volumen consumido por la tubería y la bomba durante el funcionamiento.

Se recomienda además equipar a la instalación con dispositivo tecnológico avanzado que permitan identificar el comportamiento de la temperatura en el interior de la voluta de la bomba centrífuga, de manera que sea posible el registro y control de esta, para cuantificar de manera precisa el cambio de fase de las burbujas de vapor de forma sofisticada como se realiza el control de la variación de la presión en esta zona del impulsor.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Secretaría de Educación Pública (SEP), programa PRONABES, por la beca otorgada a uno de los autores (Jorge Luis Reyes De la Cruz) para la realización de una estancia de investigación en el Taller de Fluidos-Tlahuizcalpan, Facultad de Ciencias de la UNAM.

REFERENCIAS

- [1] González, V., *Hidráulica, Bombas y Compresores*, (Editorial Pueblo y Educación, Ciudad de la Habana, 1983).
- [2] De Souza, Z., *Dimensionamiento de máquinas de flujo, Turbinas, Bombas e Ventiladores*, (Editorial E. Blucher; San Pablo, (1991).
- [3] Reyes, D. J., *Diagnóstico de instalaciones de transporte de hidromezcla afectadas por cavitación*, Revista Minería y Geología **3**, 5 (2007).
- [4] Karassik., J. I., *Factores Hidráulicos del sistema*, (Hydraulic Institute Standards, New York, 1981).
- [5] Karelin, B. I., *Fenómeno de Cavitación en Bombas Centrífugas y Axiales*, (Mashinostroenve, Moscú, 1975).
- [6] Pérez, B. R., *Procedimiento para evaluar y seleccionar Bombas Centrífugas*, Revista Minería y Geología. **20**, 86 (2004).
- [7] Pérez, B. R., *Cavitación y materiales de construcción en las Bombas Centrífugas*, Revista Minería y Geología **20**, 116 (2004).
- [8] Ramos, N., *Bombas, Ventiladores y Compresores*, (Editora ISPJAE, Ciudad de la Habana, 1994).
- [9] Normas Técnicas Brasileira ABNT/NBR-10131, *Bombas hidráulicas de flujo*, (Terminología, Rio de Janeiro, 1987), p. 25.