

Diagnóstico de instalaciones de transporte de hidromezcla afectadas por cavitación

Jorge Luis Reyes Cruz¹ / jreyes@ismm.edu.cu
Raúl Izquierdo Pupo¹ / rizquierdo@ismm.edu.cu

RESUMEN

Se fundamenta de forma experimental la relación entre niveles de vibración y altura de succión en bombas centrífugas de instalaciones de transporte de hidromezclas en la industria del níquel. Se establecen las etapas del régimen cavitacional y se plantea el procedimiento para el diagnóstico de instalaciones afectadas por la cavitación. La presencia de cavitación se define a partir del conocimiento de los factores hidráulicos que influyen sobre la carga neta de succión de la instalación. Se ofrecen las ecuaciones que rigen la presencia de este fenómeno y se establecen los niveles de vibraciones en los que la instalación debe operar para garantizar los parámetros técnicos y económicos.

PALABRAS CLAVE

Cavitación, hidromezclas, vibraciones, bombas centrífugas.

Diagnostic of hydraulic transport facilities affected by cavitation

ABSTRACT

An experimental research was made in order to find the relation between vibration levels and suction heights in centrifugal pumps of hydro-mixtures transport installations in nickel industry. Cavitation stages were established and it is the procedure to diagnosis facilities with centrifugal pumps affected by cavitation. The presence of cavitation is defined after establishing the hydraulic factors that influence suction net load of the installation. It is also shown the equations that define the presence of the phenomenon, as well as the vibration levels in which the installation should operate keeping technical and economic parameters.

KEY WORDS

Cavitation, hydro-mixtures, vibrations, centrifugal pumps.

INTRODUCCIÓN

La cavitación es un fenómeno universal que afecta el funcionamiento de las turbo-máquinas hidráulicas, ocasionando pérdidas en la potencia de las mismas, dando lugar a la aparición de ruidos y vibraciones y disminuyendo el rendimiento de la instalación. La cavitación y las vibraciones guardan estrecha relación entre sí.

En la industria cubana del níquel es frecuente la destrucción de impelentes por el efecto de la cavitación. La figura 1 muestra el álabe de un impelente dañado. Para evitar las consecuencias de este fenómeno es necesario precisar los factores que influyen en su aparición, así como los regímenes del mismo. Algunas señales como ruido, vibraciones, caída de las curvas de carga, potencia, eficiencia en dependencia del gasto y daños en el impulsor por picaduras, advierten de la presencia del fenómeno. Es oportuna entonces la pregunta. ¿Son suficientes estas señales para diagnosticar el grado de avance de la cavitación? Karassik (1985) las considera inexactas por la existencia de otros factores de los cuales no han sido analizadas sus causas, con lo que coinciden los autores del presente artículo.



Figura 1. Impelente de la bomba centrífuga GRT/160/71 dañado por los efectos de la cavitación.

Teniendo en cuenta las variaciones del nivel del líquido succionado (hs) por las condiciones que demanda el proceso (Manual de Operaciones de la Planta de Recuperación de Amoníaco, 1987; NC, 1983), así como las irregularidades del control de la operación de la instalación y conociendo que estas condiciones favorecen la formación del fenómeno de la cavitación, se analizó la influencia de la energía disponible en la succión de la bomba (H_{dis}).

Se realizó un estudio experimental para determinar la existencia de correlación entre la altura de succión y los niveles de vibraciones de una bomba centrífuga a escala industrial con el objetivo de encontrar un parámetro que permita diagnosticar el fenómeno de cavitación a partir del nivel de vibraciones.

Resulta importante buscar una relación entre el fenómeno de cavitación y la magnitud de las vibraciones para efectuar el diagnóstico de la bomba a través de ese parámetro. Esta relación permitiría conocer la magnitud del fenómeno de cavitación y decidir si la bomba se mantiene en explotación o se detiene.

La decisión de detener la instalación o continuar su explotación en presencia del fenómeno de la cavitación cobra mayor significado por los costos que se derivan de las afectaciones que trae consigo el funcionamiento en régimen cavitacional, dependiendo fundamentalmente de la fase de cavitación en que se encuentre la instalación. De esta forma queda fundamentada la necesidad de encontrar para las bombas centrífugas en régimen de cavitación un método de diagnóstico a partir de las vibraciones. Cisneros (2007) advierte acerca de la escasa información que aportan los manuales y de la existencia de pocos resultados sobre las características de las vibraciones asociadas con la cavitación en las bombas centrífugas.

Factores que intervienen en la cavitación

Dentro de los numerosos factores que intervienen en la cavitación se encuentran los que dependen del sistema relacionado con el fluido y aquellos que dependen de la máquina. Entre los primeros se encuentran:

- Las altas temperaturas.
- La densidad del fluido que se transporta.
- La variedad de las propiedades físico-mecánicas de las mezclas compuestas por soluciones amoniacales.
- El fácil desprendimiento del líquido, creando una nueva fase gaseosa que incide en los parámetros de flujos trifásicos (conformadas por una mezcla sólido-líquido-gas).
- Otros factores como la distribución de tamaño de las partículas; composición química y mineralógica del sólido; concentración de la fase sólida y pH.

Entre los segundos:

- Respuesta del material a la velocidad de erosión por cavitación y su acabado superficial.
- Altura de succión H_s de la instalación para un caudal Q y la velocidad específica n_s .
- Altura neta de succión (NPSH).

La cavitación se acompaña de un ruido peculiar y de la disminución del caudal, la carga y el rendimiento. En la práctica, la presencia de cavitación se detecta por el ruido y las vibraciones características del fenómeno que provocan la disminución del caudal en más de 1-3 %. Según avanza la cavitación, el ruido y las vibraciones, aumenta la carga y el caudal desciende llegando a alcanzar valores nulos.

El funcionamiento de las bombas en regímenes de cavitación afecta los parámetros de trabajo, daña el equipo hasta el punto de destruir la instalación, disminuye el rendimiento e incrementa el consumo energético.

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 la velocidad y aceleración suficientes a la entrada del impulsor (Karelin, 1975). Se define entonces el concepto de reserva requerida de cavitación $NPSH_R$. Este parámetro depende de las peculiaridades constructivas de la bomba, siendo mayor para bombas con el rodete en voladizo que para las que tienen el rodete entre apoyos (Pérez, 2004 b).

El concepto de reserva admisible de cavitación $NPSH_A$ es característico para cada sistema en particular. Las reservas requerida y admisible de cavitación son una función del gasto. En una instalación no habrá cavitación cuando $NPSH_A \geq NPSH_R$.

$$NPSH_A = Patm + Hsucc - \Sigma h - Ht ; m \quad (1)$$

Donde:

$Patm$ - Presión atmosférica (m).

$Hsucc$ - Altura de succión (m).

Ht - Presión de vapor (m).

Σh - Pérdidas en la succión (m)

$$NPSH_R = \Delta h_s = 10 \left(\frac{n\sqrt{Q}}{C} \right)^{4/3} ; m \quad (2)$$

Donde:

Q- Gasto (m³/h)

n- Número de revoluciones (rev/min)

C- Coeficiente de velocidad específica

La velocidad específica n_s , según Pérez (2004), se obtiene por:

$$n_s = \frac{n\sqrt{Q}}{\left(\frac{\Delta h_m}{10} \right)^{3/4}} ; \text{ rev/min} \quad (3)$$

Δh_m -carga de succión

MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se realizó en una instalación industrial de transporte de hidromezclas (desechos lixiviados) en la planta de recuperación de amoníaco de la empresa niquelera Ernesto Che Guevara. La figura 2 muestra la instalación (de succión positiva) donde la bomba se encuentra por debajo del nivel del líquido. Esto produce en los técnicos un sentimiento de seguridad de ausencia de la cavitación.

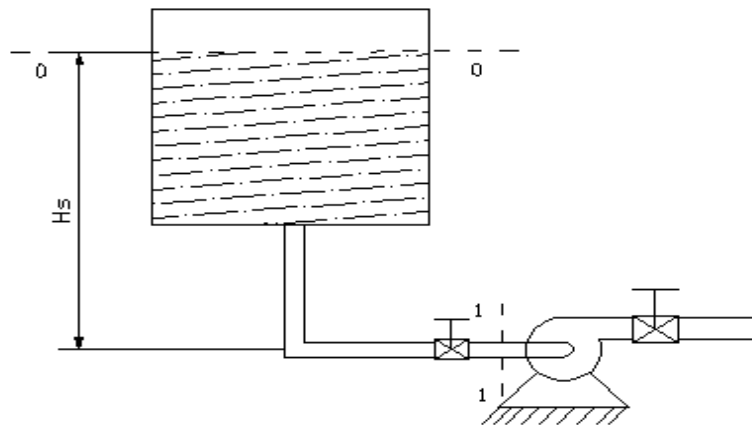


Figura 2. Esquema típico de la instalación utilizada.

Características del fluido y de la instalación

La composición de las partículas por tamaños indica que las menores de 44 μm son mayoritarias y constituyen más del 60% del volumen de la fase sólida.

Un estudio de la pulpa realizado con anterioridad encontró que para concentraciones mayores a un 35 % en peso de sólido las curvas de fluido obtenidas se comportan como un plástico ideal (Bingham. Garcell, 2001). El modelo que describe el comportamiento es:

Modelo de Bingham:

$$\tau = \tau_0 + \mu_p \dot{\gamma} \quad (4)$$

Tabla 1. Valores de los parámetros reológicos de los modelos de Oswald de Waele y de Bingham, para la cola a la temperatura de 23°C.

Concentración de sólido (%)	Parámetros reológicos			
	K (Pa·s)	N (adimen)	τ_0 (Pa)	μ_p (Pa·s)
35%	0,1037132	0,63	...	...
40%	...	...	0,477077	0,020144
45%	...	...	0,5269659	0,022396
50%	...	...	1,1104501	0,035627

Donde:

K- Índice de consistencia (Pa·s)

N- Índice de flujo (adimensional)

τ - Esfuerzo cortante (Pa)

τ_0 - Esfuerzo cortante inicial físico (Pa)

μ_p - viscosidad aparente (Pa.s)

$\dot{\gamma}$ - Gradiente de velocidad de deformación

Establecimiento de los puntos de medición

Para la selección de los puntos de medición de las vibraciones se aplicó un procedimiento publicado por Piedra Díaz, et al (2000) y Argulló et al (1986). La figura 3 muestra un esquema del conjunto bomba - motor donde se señalan los puntos de medición de las vibraciones. Las mediciones se realizaron en los ejes:

- Axial – desalineamiento, problemas de rodamiento
- Horizontal – desbalance
- Vertical- flajilidad

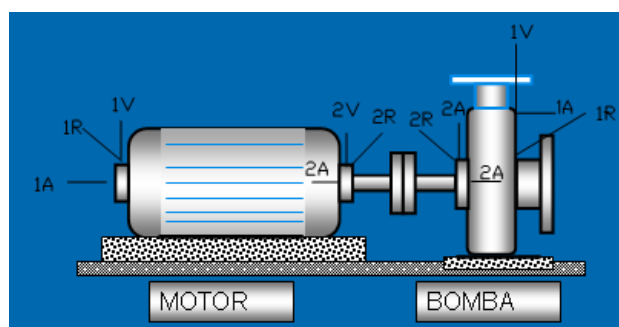


Figura 3. Esquema del conjunto bomba - motor con los puntos de medición de vibraciones.

Se consideró que las vibraciones del motor no ocasionan alteraciones en las vibraciones de la bomba, por lo que los puntos de medición se refieren a la bomba.

Se sometió a variación continua la altura de succión desde 0,5 hasta 2,75 m. Para medir los principales parámetros de las vibraciones se utilizó un equipo marca SKF Vibration Pen plus certificado por las normas ISO 2372, con un nivel de tolerancia de 0,1 mm/s, según catálogo del equipo. La tabla de severidad del vibrómetro se utilizó para valorar los resultados de las mediciones de vibraciones. Se realizaron once mediciones (axiales, verticales y horizontales) en el segundo punto de la bomba.

Cálculo hidráulico

La tabla 2 muestra los parámetros del fluido transportado

Tabla 2. Parámetros del fluido transportado

$V = 1,4m/s$	$d_{tub} = 150mm$	$\rho_{col} = 1650kg/m^3$
$n = 1180rev/min$	$\nu = 0,00000028 \cdot m^2/s$	$\mu_p = 4,2 \cdot 10^{-4} Pa \cdot s$
$A = 0,031 \cdot m^2$	$\rho_{agua} = 1000 \cdot kg/m^3$	

Donde:

d_{tub} - Diámetro de la tubería (mm)

ρ_{cola} -Densidad de la cola (kg/m³)

μ_p - Viscosidad plástica (Pa·s)

ν - Viscosidad (m²/s)

n- es el N⁰ de revoluciones (rev/min)

A- Área de la sección transversal (m²)

ρ_{agua} -Densidad de la cola (kg/m³)

V- Velocidad del fluido (m/s)

Característica de la red

La característica de la red se obtuvo mediante la ecuación de Alexandro (1986)

$$H_{red} = \Delta Z + R_c \cdot Q^2 + R_g \cdot Q \tag{5}$$

Donde:

ΔZ - Carga estática total (m)

R_c - Coeficiente de resistencia de la instalación

R_g - Coeficiente de resistencia del componente sólido de la cola

Conocida la ecuación de la red (Ec.5) se determinó el punto de trabajo de operación de la instalación de bombeo (figura 4) en condiciones normales de trabajo y la característica de la red al aumentar la resistencia hasta llegar al caudal deseado. Esto se debe a que las bombas de esta instalación están sobredimensionadas y se hace necesario un proceso de regulación o variación de las resistencias hidráulicas en la descarga hasta llevar el gasto desde 130 m³/h (punto de trabajo sin regulación) hasta 85 m³/h. La tabla 3 muestra los parámetros del cálculo hidráulico y el balance energético.

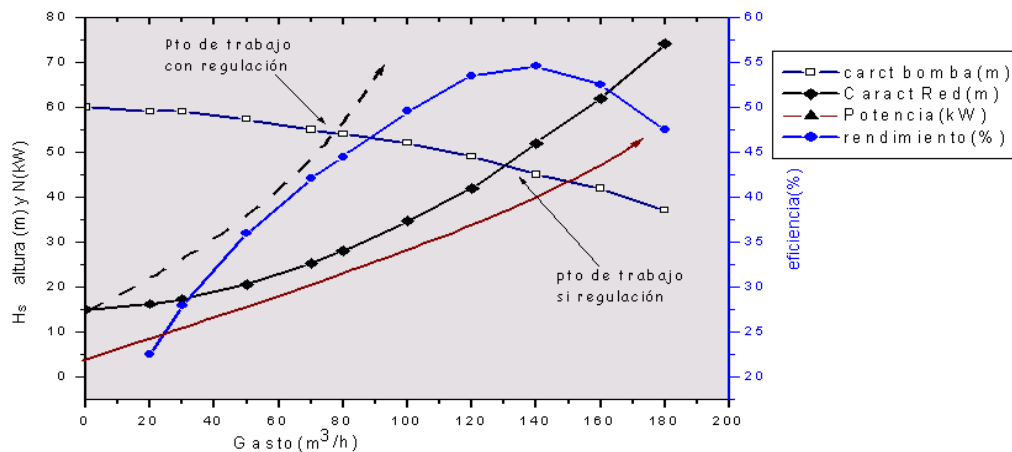


Figura 4. Curvas características de trabajo en condiciones normales y luego de aplicada la regulación de la instalación de bombeo.

Tabla 3. Valores de los parámetros fundamentales del cálculo hidráulico y balance energético.

Parámetros de cálculo en la instalación	Resultados	Unidad	Ecuación	Parámetros nominales
Coeficiente resistencia de la red exterior de la instalación; R_c	2559	Adimensional	5	...
Coeficiente adicional de resistencia de la red exterior, R_g	35,137	Adimensional	5	...
Carga de la red; H_{red}	50,889	m	5	...
Velocidad específica; n_s	579,816	rev/min	3	...
Altura neta positiva en la aspiración requerida; $(NPSH)_r$	4,62	m	2	5
Pérdidas en la succión; Σh	2,104	m	1	...
Altura neta positiva en la aspiración disponible; $(NPSH)_d$	2,797	m	1	...
Gasto que debe entregar el impulsor; Q_{calc}	90	m ³ /h	2,3,5	160
Presión de vapor; H_t	9,65	m	1	-
Coeficiente de velocidad específica; C	$800 \log n_s^{3/4}$	Adimensional	2	...
Altura de succión; H_{succ}	1,875	m	1	...
Presión atmosférica; P_{atm}	8,637	m	1	...
Carga estática total; ΔZ	27	m	5	...

RESULTADOS

A partir de los valores de vibración medidos (tabla 4) se obtienen las curvas de las alturas disponibles para diferentes niveles de succión (figura 5).

Tabla 4. Datos experimentales de las mediciones

H(m)	NPSH discrítico	Vibraciones V-2	Vibraciones H-2	Vibraciones Axiales
3	2,73	2	2,5	1,87
2,75	2,45	2,2	2,8	1,94
2,5	2,27	2,3	3	2,1
2,25	2,21	2,6	2,9	3,5
2	1,78	3,5	3,9	4,6
1,75	1,51	5,3	4,7	7,5
1,5	1,25	5,9	4,9	8,3
1,25	1,03	6,4	5,3	9
1,2	0,92	6,5	5,4	9,3
1	0,78	7,4	5,7	9,5
0,8	0,25	7,5	5,8	9,6

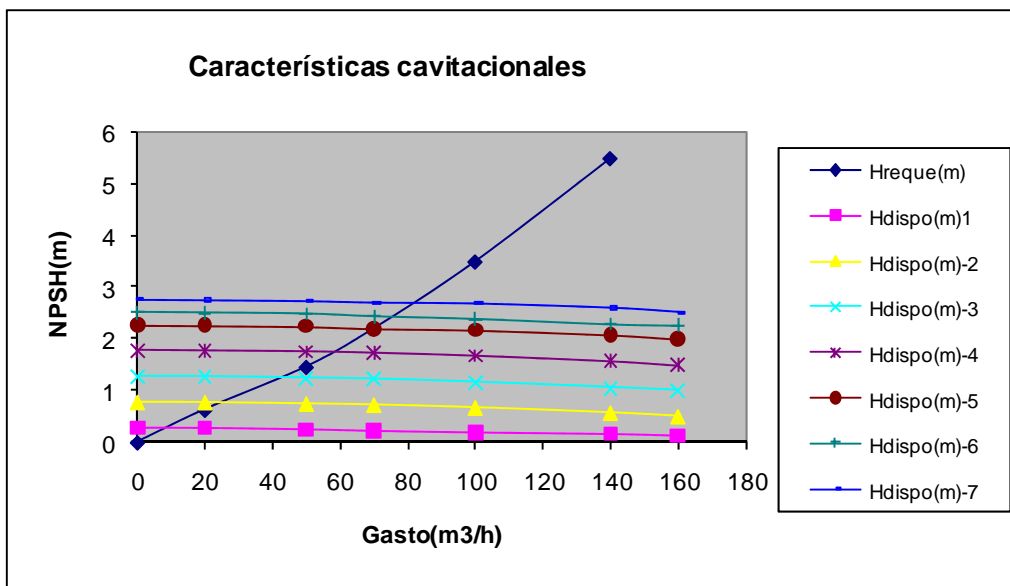


Figura 5. Características cavitacionales de la instalación para diferentes niveles de succión.

Las intercepciones de las alturas disponibles con la curva de altura requerida permiten obtener la altura disponible crítica. Se encontró que para un gasto de 85 m³/h, el valor de altura de

succión crítico es 2,75 m, por debajo del cual la bomba comienza a cavititar.

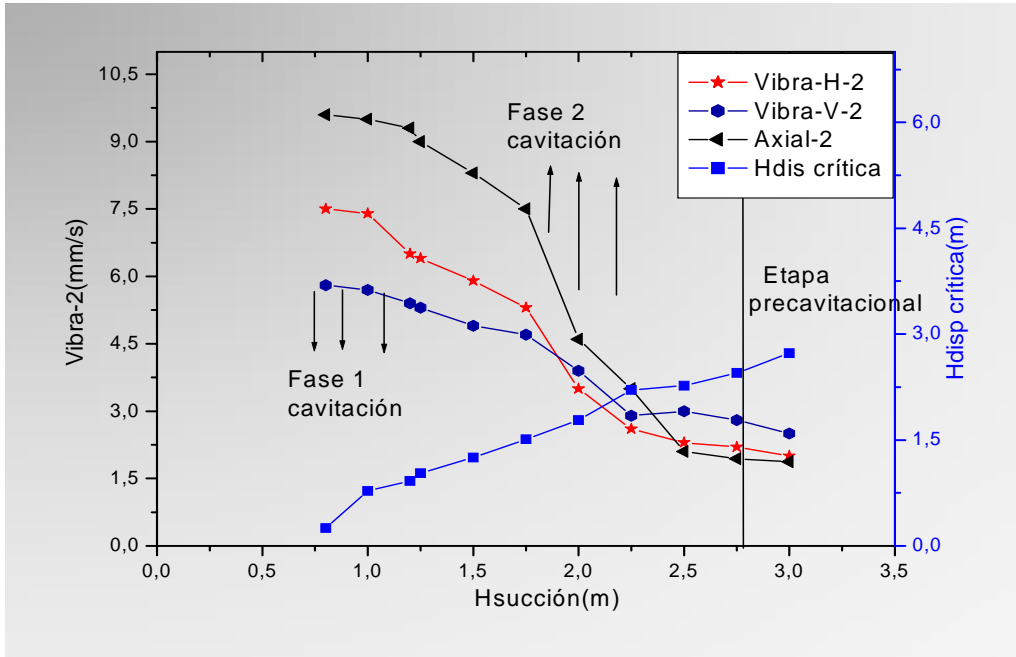


Figura 6. Niveles de vibraciones pertenecientes al punto 2 y las fases de cavitación en correspondencia con la altura de succión.

La figura 6 muestra el comportamiento de la altura disponible crítica y los correspondientes niveles de vibración en las posiciones horizontal, vertical y axial. El gráfico refleja las dos fases de cavitación que tienen lugar durante el funcionamiento de la bomba.

Se encontró que para valores de altura de succión por debajo de 2,75 m y niveles de vibración inferiores a 6,0 mm/s se presenta la Fase 1 de cavitación. Durante esta fase se pudo constatar la disminución de los parámetros gasto, carga, eficiencia y una disminución de la potencia, sin embargo la bomba no sufre afectaciones significativas por lo que puede mantenerse funcionando.

Para niveles de vibración superiores a 6,0 mm/s y altura de succión por debajo de 2,0 m aparece la Fase 2, causante de daños severos en el impelente o impulsor. Durante esta fase el

gasto, la carga y la eficiencia comienzan a caer bruscamente y tiene lugar un aumento de la potencia. Si se aumenta la altura de succión es posible disminuir las vibraciones, pero cuando éstas alcanzan valores de 9,5 mm/s la bomba colapsa si no se detiene.

CONCLUSIONES

1. Se identifican dos fases de cavitación para las bombas centrífugas utilizadas en el transporte de hidromezclas en la industria del níquel.
2. Cuando la altura de succión es menor que 2,75 m aumentan considerablemente los niveles de cavitación y las vibraciones pueden llegar a niveles inadmisibles para este tipo de máquinas.
3. Los niveles de vibración no deben exceder los 6 mm/s. Para valores mayores de 9,5 mm/s la bomba colapsa.
4. La fase 1 de cavitación se encuentra por debajo de la curva de vibraciones y la fase 2 por encima de ella, esto se cumple cuando el gasto entregado por la bomba es aproximadamente de 85 m³/h y la altura de succión menor de 2,75 m.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CISNEROS, H B. 2007 [en línea] Cavitación, un ataque al corazón de las Bombas Centrífugas . Disponible en (<http://www.mch.cl/documentos/pdf/cavita.pdf>). [28 de marzo de 2007].
- GARCELL, L. 2001. *Flujo por tubería de suspensiones no newtonianos. Apuntes para una monografía*, (2): Universidad de Oriente. Santiago de Cuba 40 p.
- Manual de Operaciones Planta de Recuperación de Amoniaco. Panel de control de la planta. 1987. Fábrica Ernesto Che Guevara. Moa.
- NC 19 - 01 - 07:1983. Vibración. Métodos de Medición.
- NC 19 - 01 - 08:1983. SNPHT. Máquinas manuales. Niveles admisibles de vibraciones
- KARASSIK, J.I. 1985. *Factores hidráulicos del sistema*. Ediciones Revolución. La Habana. 527 p.
- KARELIN. B. I. 1975. *Fenómeno de cavitación en bombas centrífugas y axiales*. Moscú. Construcción de Máquinas. 541 p.
- PÉREZ, R. 2004. Procedimiento para evaluar y seleccionar bombas centrífugas. *Minería y Geología*. 20(1-2) :84-88.

- PÉREZ, R. 2004. Cavitación y materiales de construcción en las bombas centrífugas. *Minería y Geología*. 20 (3-4) :114-118
- PIEDRA DÍAZ M, LIMA ÁLVAREZ M, REYES RODRÍGUEZ R, PÉREZ CASTAÑEDA R. 2000. *Procedimientos para la aplicación de las vibraciones mecánicas en el diagnóstico de máquinas* Memorias del evento MAPORO (septiembre de 2000). Ciudad de La Habana. 335 p.