

Diseño de una estación de bombeo para el abastecimiento de agua en el organopónico de Maisí

Design of a pumping station for water supply in the Maisí organoponic plant

Yaima Fernández Pérez yaimafernandezperez@gmail.com ⁽¹⁾

Oscarina Barroso Romero oscarinabarroso002@gmail.com ⁽²⁾

Jesús Manuel Viera Callar jviera@ecg.minem.cu ⁽³⁾

Rodney Martínez Rojas rmartinez@ismm.edu.cu ⁽⁴⁾

⁽¹⁾Unidad Básica de Producción Cooperativa Iraelda Marzo García, Cuba

⁽²⁾Empresa Mecánica del Níquel, Cuba

⁽³⁾Empresa Niquelífera Ernesto Che Guevara, Cuba ⁽⁴⁾Universidad de Moa (Cuba)

Resumen: El diseño de una estación de bombeo para el riego del organopónico Iraelda Marzo García en el municipio Maisí demandó la implementación de una metodología de cálculo precisa. Este enfoque permitió determinar los diámetros de las tuberías de PVC, con medidas de 0,200 m para la succión y 0,150 m para la descarga, así como establecer las condiciones de la red para definir la curva característica del sistema. Al combinar este análisis con la curva de la bomba INTERCAL SERIES BISC 100/400/365, se logró identificar el punto de operación del sistema para un caudal de 150 m³/h y una altura de 48 m. Se cumple la condición de ausencia de cavitación establecida, donde el número mínimo de NPSH (Altura Neta Positiva de Aspiración) disponible excede al NPSH requerido ($9,468\ 221 > 3,3$ m), garantizando así la ausencia de cavitación en el sistema.

Palabras claves: bomba centrífuga, transporte de fluido, riego agrícola

Abstract: The design of a pumping station for irrigation of the Iraelda Marzo García organoponic plant in the Maisí municipality required the implementation of a precise calculation methodology. This approach allowed determining the diameters of the PVC pipes, with measurements of 0.200 m for the suction and 0.150 m for the discharge, as well as establishing the network conditions to define the characteristic curve of the system. By combining this analysis with the curve of the INTERCAL SERIES BISC 100/400/365 pump, it was possible to identify the operating point of the system for a flow rate of 150 m³/h and a head of 48 m. The established condition of absence of

cavitation was met, where the minimum number of NPSH (Net Positive Suction Head) available exceeds the required NPSH ($9,468\ 221 > 3.3\ \text{m}$), thus guaranteeing the absence of cavitation in the system.

Keywords: centrifugal pump, fluid transport, agricultural irrigation

Introducción

El bombeo es una actividad esencial en diversos sectores industriales, implicando el desplazamiento de líquidos mediante equipos especialmente diseñados para esta labor. Dentro del ámbito industrial, las estaciones de bombeo desempeñan un papel fundamental, ya que son construidas y equipadas para transportar agua desde un nivel de succión hasta un nivel superior o de salida. están diseñadas para impulsar el flujo de líquidos a través de tuberías, superando obstáculos topográficos y manteniendo la presión adecuada en todo el Sistema (Mercado Bautista *et al.*, 2023).

Las bombas centrífugas son ampliamente utilizadas en aplicaciones industriales debido a su capacidad para manejar grandes volúmenes de líquido con eficiencia. Funcionan mediante la conversión de energía cinética en potencial, permitiendo el transporte del agua a través de tuberías y conductos a distancias considerables. En el diseño de una estación de bombeo de agua, es crucial considerar diversos factores, como la capacidad requerida, la altura de elevación, la distancia a recorrer y las características del fluido.

El agua desempeña un papel crucial en la producción agrícola y tiene un impacto significativo en la seguridad alimentaria. Según Herrera *et al.*, (2011), Bonet *et al.*, (2020) y Ávila *et al.* (2021) la agricultura es un gran consumidor de agua debido a la gran demanda de agua por unidad de producción que tienen los productos agrícolas, y a las eficiencias globales de riego.

En la despulpadora de café en Casimba del municipio Maisí, el diseño de una estación de bombeo de agua resulta fundamental para asegurar un suministro adecuado para el regadío del organopónico Iraelda Marzo García, el cual se encuentra a 1 km del mismo. La elección de una bomba centrífuga para este propósito se basa en sus características y ventajas específicas.

Materiales y métodos

Características para la instalación del sistema

En la tabla 1 se presentan los valores para el diseño de la estación de bombeo. Se considerarán otros accesorios necesarios para su implementación, como dos codos en las tuberías de succión, cuatro en las tuberías de descarga, un reductor, una válvula de retención, una válvula de compuerta y una válvula de mariposa.

Tabla 1. Parámetros de operación del sistema propuesto

Parámetros	Valor	UM
Longitud de succión	2	m
Longitud de descarga	1030	m
Caudal	140	m ³ /h
Altura de descarga	20	m
Altura de succión	0	m

Propiedades del fluido a transportar

El agua este se encuentra a una temperatura de 25 °C, la densidad de 997 kg/m³ y la viscosidad dinámica que describe su propiedad de resistencia al flujo de 891·10⁻⁶ Pa·s a esa temperatura.

Diámetros de la tubería de succión y descarga

El diámetro de las tuberías de succión afecta la velocidad del líquido entrante, y el diámetro de las tuberías de descarga está relacionado con la presión y la velocidad del flujo saliente. Según la norma ISO 7919-3 (2019) se establecieron las velocidades recomendadas para diferentes tipos de maquinaria y equipos, como bombas, compresores, ventiladores y generadores. Esta se basa en la frecuencia de operación de la máquina y en la velocidad nominal de la misma, donde están en el rango de (0,6–2) y (1–3,5) para succión y descarga respectivamente (Viera *et al.*, 2023).

Velocidad del fluido

Para determinar la velocidad del fluido, que depende del caudal y del área de la tubería se emplea la ecuación:

$$v = \frac{Q}{A}$$

Donde:

Q: caudal o gasto del fluido (m³/s)

A: área de la sección circular de la tubería (m²)

Área de la sección circular de la tubería

Para calcular el área de la tubería se tiene en cuenta el diámetro de la tubería.

$$A = \frac{\pi \cdot d^2}{4}$$

Donde:

d: diámetro de la tubería (m)

Número de Reynolds

Este número de Reynolds es adimensional y depende del diámetro de la tubería, de la velocidad del fluido, de la densidad del agua y del coeficiente μ :

$$Re = \frac{d_{tub} \cdot v \cdot \rho}{\mu}$$

Donde:

μ : viscosidad del fluido (Pa·s)

V: velocidad del fluido (m/s)

ρ : densidad del fluido (kg/m³)

Factor de fricción

El coeficiente de fricción representa la resistencia al flujo generado por la fricción en las paredes internas de la tubería. Esta resistencia se transforma en energía térmica que se disipa a través de la pared de la tubería a medida que el flujo circula. En el caso de corriente laminar en un tubo, la pérdida de carga por rozamiento es proporcional al caudal y a la viscosidad a la primera potencia. Esta relación se conoce como Ley de Poiseuille y se utiliza para calcular las características de tuberías con flujo laminar (Nekrasov, 1908).

-Para laminar $Re \leq 2300$: $\lambda = \frac{64}{Re}$

-Para turbulento $Re \geq 4000$: $\lambda = \frac{0.3164}{\sqrt[4]{Re}}$

Donde:

λ : coeficiente de fricción para la tubería de succión y descarga

Re: número de Reynolds para la tubería de succión y descarga

Cálculo de la longitud equivalente en las tuberías de succión y descarga

La longitud equivalente total es un concepto utilizado para representar el efecto combinado de todas las pérdidas de carga generada por los componentes presentes en una tubería. Esta es una longitud adicional de tubería recta que representa el efecto acumulativo de las pérdidas de carga de los componentes en la tubería.

$$L_{eqT} = L_{tub} + L_{eq}$$

Donde:

L_{eqT} : Longitud equivalente total de las tuberías de succión y descarga (m)

L_{eq} : Longitud equivalente por accesorio de las tuberías de succión y descarga (m)

L_{tub} : Longitud de la tubería de succión y descarga (m)

Resistencia de la red

Las pérdidas de carga son el resultado de la fricción del fluido y dependen de diversos factores incluida la longitud equivalente total, el diámetro y el factor de fricción.

$$R = \left(\lambda \cdot \frac{L_{eqT}}{d} \right) \cdot \frac{8}{g \cdot \pi^2 \cdot d^4}$$

Donde:

R: Resistencia de la red de succión y descarga (s^2/m^5)

λ : Coeficiente de fricción para la tubería de succión y descarga

Energía necesaria

El cálculo de la energía necesaria de un sistema de bombeo implica considerar factores como la altura de elevación, el caudal y la resistencia de la red.

$$H_{red} = \Delta Z + R \cdot Q^2$$

Donde:

H_{red} : Energía necesaria que debe alcanzar el fluido (m)

ΔZ : Altura de elevación que debe vencer el sistema (m)

Potencia hidráulica del sistema

La potencia hidráulica es la cantidad de energía transferida o convertida por unidad de tiempo. Se determina con los valores reales con que la bomba operara (Trujillo, 2012).

$$\gamma = \rho \cdot g$$

$$N_h = Q_{op} \cdot H_{op} \cdot \gamma$$

Donde:

N_h : Potencia que se le agrega al fluido (kW)

Q_{op} : Caudal de operación de la bomba (m³/s)

γ : Peso específico del fluido que circula a través de la bomba (N/m³)

H_{op} : Altura de operación (m)

Potencia del motor

Es la cantidad de energía que el motor debe suministrar para impulsar la bomba y mover el fluido a través del sistema, esta tiene en cuenta la eficiencia proporcionada por la bomba y el rendimiento del motor que se puede encontrar en el rango de (90–98 %) según la norma IEC 60034-30-1 (2014).

$$N_m = \frac{N_b}{\eta_m}$$

Donde:

N_m : Potencia del motor (kW)

N_b : Potencia de la bomba (kW)

η_m : Rendimiento del motor (%)

Condición de cavitación

La cavitación ocurre en la sección donde el líquido se acelera hacia el impulsor. Los efectos inmediatos son la pérdida de eficiencia y erosión en el impulsor. El $NPSH_d$ carga de succión neta demandada debe ser mayor que el $NPSH_r$ carga de succión neta requerida (Varela & Monroy, 2018).

$$h_L = \lambda_{succ} \cdot \frac{L_{eqTsuc}}{DN_{succ}} \cdot \frac{v_{succ}^2}{2 \cdot g}$$

Donde:

λ_{succ} : factor de fricción en la succión

DN_{succ} : diámetro nominal en la succión (m)

V_{succ} : velocidad de succión (m/s)

$$NPSH_d = \frac{P_{atm}}{\gamma} \pm h_s - h_L - \frac{P_v}{\gamma}$$

Donde:

El signo de $\pm$ en la altura de succión h_s indica la succión positiva y negativa

P_{atm} : presión estática

P_v : presión de vapor (absoluta) del líquido a temperatura de bombeo (Pa)

h_s : altura de succión (m)

h_L : pérdida local en la succión (m)

$$NPSH_d > NPSH_r + 0,5$$

Costo de bombeo

De acuerdo con Viera *et al.* (2023) el costo de bombeo puede estimarse considerando aspectos específicos como la tarifa eléctrica, el tiempo de trabajo de la bomba para determinar la cantidad total de energía consumida, la potencia hidráulica requerida, el rendimiento del motor y la bomba que influyen en la eficiencia energética

$$C_b = \frac{T_{elec} \cdot t_w \cdot N_h}{\eta_b \cdot \eta_m}$$

Donde:

C_b : Costo de bombeo

t_w : Tiempo de trabajo de la bomba (h/año)

T_{elec} : Tarifa eléctrica de ña UBPC (CUP/kWh)

N_h : Potencia hidráulica (kW)

Costo total de bombeo

El costo total de bombeo tiene en cuenta el costo de transportación, el caudal de operación y la longitud.

$$C_T = \left[\frac{G_b}{Q \cdot L} \right]$$

Donde:

C_T : costo de transportación (CUP/m³/ m)

G_b : gasto horario de la bomba (CUP/año)

L: longitud de la línea (m)

Resultados y discusión

Cálculo del diámetro de la tubería

Calcular el diámetro de la tubería requiere considerar varios factores, incluyendo la tasa de flujo de volumen esperada, la velocidad del flujo y las pérdidas de cargas admisibles. El cálculo exacto del diámetro de las tuberías puede variar dependiendo de la aplicación específica, el tipo de líquido y las condiciones operativas. La velocidad recomendada para la succión se escoge 1,5 y para la descarga 2,5, y el caudal de 0,0389 m³/s por lo que se tiene para la succión y descarga un diámetro de 0,182 m y 0,141m respectivamente.

Normalización de los diámetros

Para la normalización de los diámetros se puede utilizar el catálogo de tuberías de PVC rígido para fluidos a presión según la norma ISO 4422 (1996), esta representa los diámetros de tuberías que se han adoptados por diferentes industrias. En la tabla 2, se muestran los valores de los diámetros normalizados.

Tabla 2. Diámetros normalizados

Diámetros de tuberías	
Succión (m)	Descarga (m)
0,200	0,150

Cálculo de las velocidades

Para calcular la velocidad en las tuberías de succión y descarga se tiene en cuenta el caudal que se requiere bombear con un valor de 0,0389 m³/s y los valores de los diámetros normalizados, realizado el cálculo se obtiene que la velocidad para la succión es de 1,238 m/s y para la descarga 2,201 m/s.

Resultado de la metodología de cálculo para determinar la curva característica del sistema

Cálculo de la energía necesaria

Para el cálculo de la energía necesaria se tienen varios factores en cuenta como Reynolds, coeficiente de fricción, las longitudes equivalentes y la resistencia de la red como se muestra en la tabla 3.

Tabla 3. Parámetros para el cálculo de la energía necesaria

Parámetro	Resultados		UM
	Succión	Descarga	
Altura de elevación	22		m
Reynolds	474904,5	593630	-
Coeficiente de fricción	0,01205	0,011399	-
Longitud equivalente	117,5	66,4	m
Longitud equivalente total	121,5	116,4	
Resistencia de la red	123,90	342,6	S ² /m ⁵

Con los valores del cálculo representado en la tabla 3 que relaciona la altura de elevación que debe vencer el sistema, la resistencia de la red y el caudal para 0,0389 m³/s se obtiene 44,94 m como la altura necesaria que debe vencer el sistema.

Curva característica del sistema de bombeo

Las curvas características de un sistema de bombeo son un conjunto de gráfico que representan el comportamiento de la bomba con diferentes variables como el caudal y la altura manométrica (Matsoukas, 2013). Estos puntos se representan con el caudal en el eje X y la altura en el eje Y como se muestra en la figura 1.

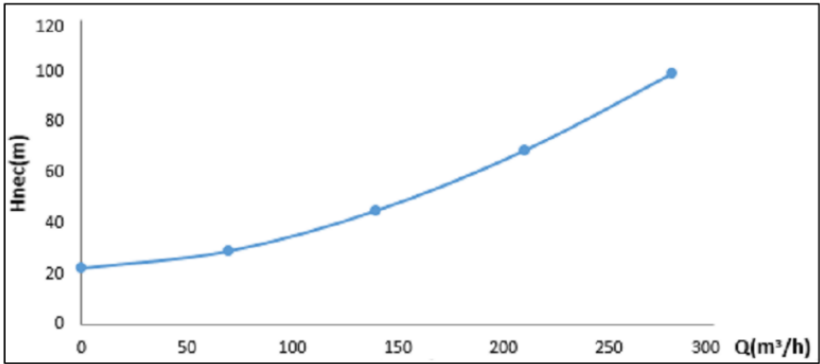


Figura 1. Curva característica de la bomba.

Selección de la bomba

La selección de la bomba es un proceso crítico en el diseño y operación del sistema de bombeo. Los catálogos de fabricantes de bombas contienen información detallada sobre las bombas disponibles, incluyendo sus especificaciones técnicas, curvas de rendimiento y características de diseño. Se toma la bomba que queda por encima del punto quedando seleccionada la bomba Intercal BISC 100/400 ya que esta cumple las condiciones para el sistema.

Selección de la curva de la bomba

La curva de la bomba muestra la relación entre el caudal (flujo) y la altura total (carga) de la bomba. La selección de es un proceso crucial en el diseño de sistemas de bombeo, esta. En la figura 2, se muestra el punto de operación del sistema donde se escoge la curva de la bomba que viene con el diámetro del impelente.



Figura 2. Curva de la bomba modelo BISC 100/400.

En este caso se escoge el diámetro de impelente 365 mm por lo que la bomba seleccionada es la INTERCAL SERIES BISC 100/400/365.

Punto de operación de la bomba

El punto de operación de la bomba centrífuga es la intersección entre las curvas característica y la de la bomba. Este punto se determina para tener una mayor eficiencia en el funcionamiento de la misma. En la figura 3, se muestra el punto de trabajo de la

bomba según los valores de la tabla 4, que ofrece el caudal de operación y la altura de operación de la curva de la bomba.

Tabla 4. Datos de la curva de la bomba INTERCAL SERIES BISC 100/400/365

Q(m³/h)	0	100	200	300	330
Hnec(m)	51	49	44	34	26

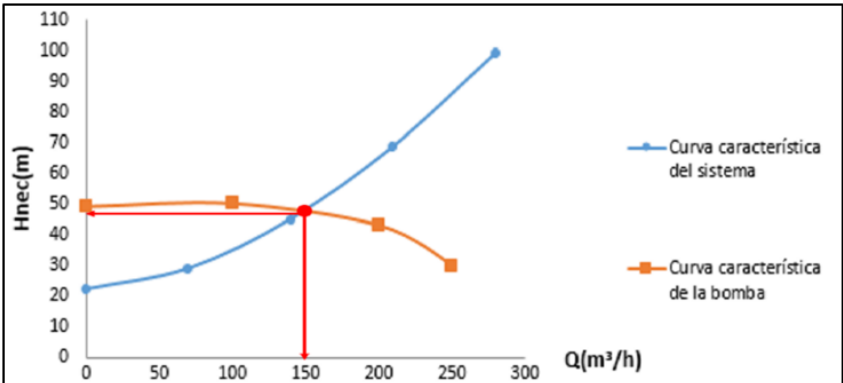


Figura 3. Punto de operación del sistema.

De acuerdo con el punto de operación la bomba trabaja a 150 m³/h de caudal de operación y 48 m de altura de operación, extraídos de la figura 3. Luego de la hoja de especificaciones de la bomba (Figura 4) se selecciona de la potencia, el *NPSHr* y el rendimiento como se muestra en la tabla 5, de acuerdo a las condiciones de operación.

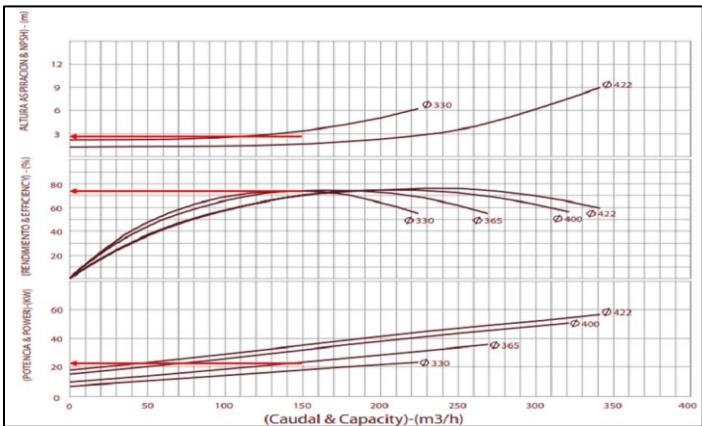


Figura 4. Características de la bomba INTERCAL SERIES BISC 100/400/365.

Tabla 5. Especificaciones de la bomba INTERCAL SERIES BISC 100/400/365

Parámetro	Valor	UM
Potencia	22	kW
NPSHr	2,8	m
Rendimiento	72	%

Potencia hidráulica del sistema

El peso específico, donde la densidad del agua es de 997 kg/m^3 a una temperatura de 25°C , tiene valor de 9781 N/m^3 . Se calcula la potencia hidráulica del sistema donde el caudal de operación de $150 \text{ m}^3/\text{h}$ llevado a $0,042 \text{ m}^3/\text{s}$ y la altura de operación de 48 m (figura 3), se obtiene un valor de $19,561 \text{ kW}$.

Selección del motor de la bomba

Para la bomba serie BISC 1 00/400/365 aparece varios motores eléctricos según el número de revoluciones y se escogen de acuerdo a la potencia del motor. Para ello se tiene en cuenta la potencia de la bomba de 22 kW y la eficiencia del motor. Se escoge un 90% según la norma IEC 60034-30-1, teniendo un valor de $24,44 \text{ kW}$ pero este valor no aparece dentro de las especificaciones por ende se escoge el valor superior a este normalizado dentro del rango de potencia, en este caso 37 kW (figura 5). El motor que se seleccionó para la bomba centrífuga serie INTERCAL BISC 1 00/400/365 es el IEC 225M, de 1500 rpm y una potencia de trabajo de 37 kW .

Cálculo de la condición de cavitación

La cavitación es un fenómeno hidráulico que puede ocurrir en sistemas de fluidos cuando la presión del líquido cae por debajo de su presión de vapor (Kumar& Saini, 2010; Barona-Mejía, 2021). Esto puede causar la formación de burbujas de vapor en el líquido, que pueden colapsar violentamente cuando se mueven a una zona de mayor presión. Este colapso repentino de las burbujas de vapor genera ondas de choque y altas presiones locales que pueden causar daños en las superficies de las piezas del sistema hidráulico, como el impelente de una bomba. La cavitación también puede provocar una disminución en el rendimiento del sistema hidráulico, ya que puede reducir la capacidad de la bomba y aumentar la vibración y el ruido en el sistema.

La carga de succión neta demandada se calcula tomando los valores de la tabla 6, obteniéndose un valor de $9,468 \text{ 221 m}$.

Tabla 6. Datos para el cálculo de la ausencia de cavitación

Parámetro	Valor	UM
Presión atmosférica	101300	Pa
Peso específico	9781	N/m ³
Altura de succión	0	m
Pérdidas hidráulicas locales	0,654414	m
Presión de vapor	3290,5	Pa

Con valores de la carga de succión neta requerida ($NPSH_r$) de 2,8 m de acuerdo con la tabla 6 y la succión neta demandada de 9,468 221 m, se aprecia que se cumple la condición de ausencia de cavitación para $9,468\ 221\ m > 3,3\ m$.

Cálculo del costo de bombeo

El costo de bombeo es un factor importante a considerar en cualquier proceso que involucre el movimiento de líquido a través de tuberías. Para calcular el costo de bombeo es necesario tener en cuenta varios factores como la potencia hidráulica, el tiempo de operación y la tarifa eléctrica. La eficiencia de la bomba también es un factor clave en el cálculo del costo de bombeo (Tabla 7).

Tabla 7. Valores para calcular el costo de bombeo

Parámetro	Valor
Potencia hidráulica	19,561 kW
Rendimiento de la bomba	72 %
Rendimiento del motor	90 %
Tiempo de operación	2160 h/año
Tarifa eléctrica	0,33 CUP/kWh
Caudal de operación	0,042 m ³ /s

El costo de bombeo asciende a un valor de 21 517,1 CUP/año, para un costo total de bombeo por metro de tubería de 58,483 CUP/m³. Los resultados del costo de bombeo permiten ver el comportamiento del transporte del fluido, para el funcionamiento de las bombas en las distintas condiciones, lo que permitirá tener un control de dichos costos a partir de la demanda existente.

Conclusiones

Se determinaron los diámetros de las tuberías PVC para la succión y descarga, siendo de 0,200 m para la succión y 0,150 m para la descarga.

Se seleccionó la bomba centrífuga serie INTERCAL BISC 100/400/365 y el motor el IEC 225M, de 1500 rpm para la estación de bombeo.

Se analizó tras el cálculo realizado para determinar la condición de cavitación que el sistema presenta ausencia de cavitación al cumplirse que la succión neta demandada es mayor que la succión neta requerida con $(9,468\ 221 > 3,3)$.

Se calculó el costo de bombeo para el que se obtuvo un valor de 21 517,1 CUP/año y un costo total de 58,483 CUP/m³.

Referencias bibliográficas

- Ávila, E., Ríos, A., Morejón, Y. & Campos, B. (2021). Evolución histórica de las fuentes energéticas empleadas en el abasto de agua y riego agrícolas. *Revista Ingeniería Agrícola*, 11(1), 47-57. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=586269368008>
- Barona-Mejía, A., Gómez-Díaz, S., Aguilar-Bedoya, J. Rubio-Clemente, A. Chica-Arrieta, E. (2021). Cavitación en perfiles hidrodinámicos para turbinas hidrocínéticas, *Revista UIS Ingenieras*, 20(2), 85-96. <https://doi.org/10.18273/revuin.v20n2-2021008>
- Bonet, C., Rodríguez, D., Guerrero, P., Mola, B., Martínez, C., Machado, M. A. & Avilés, G. (2020). Aprovechamiento de la energía empleada en el riego por aspersión. *Revista Ingeniería Agrícola*, 10(2), 15-20. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=586263256003>
- Herrera, J., López, T., & González, F. (2011). El uso del agua en la agricultura en Cuba. *Revista Ingeniería Agrícola*, 1(2), 1-7. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=586262033008>
- IEC. IEC 60034-30-1. (2014). Standard of efficiency classes for single-speed electric motors. <https://www.iecee.org/certification/iec-standards/iec-60034-30-12014>
- ISO International Organization. (2019). Norma 7919-3:2019 *Mechanical vibration. Evaluation of machine vibration by measurements on rotating shafts* <https://www.iso.org/standard/50527.html>
- ISO International Organization. (1996). Norma 4422:1996. *Tubería (transporte de fluidos)* <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/iso?c-022384>

Kumar, P., & Saini, R. P. (2010). Study of cavitation in hydro turbines. A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(1), 374-383. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.07.024>

Matsoukas, T. (2013). *Fundamentals of Chemical Engineering Thermodynamics: with applications to chemical processes*. Pearson Education.

Mercado-Bautista, J.D., Quiñonez-Alava, M.S., Angulo-Quíñonez, A.Á., Reyes-Vera, C.H., & Cevallos-Mina, M.G. (2023). Estaciones de bombeo, anti-golpe de ariete y control de fugas, válvulas y sistemas automáticos. *Ibero-American Journal of Engineering & Technology Studies*, 3(1), 433-439. <https://doi.org/10.56183/iberotecs.v3i1.617>

Nekrasov, B. (1986). *Hidráulica*. Pueblo y Educación.

Trujillo, Á. U., (2012). Método práctico de obtención de potencia y eficiencias de unidades de bombeo en operación. *Ingeniería hidráulica y ambiental*, 33(3), 86-97. <https://riha.cujae.edu.cu/index.php/riha/article/view/121>

Varela, A. M., & Monroy, M. F. (2018). Cavitación en los sistemas de bombas. *Letras ConCiencia Tecnológica*, (13), 54-59. <https://revistas.itc.edu.co/index.php/letras/article/view/123>

Viera, J.M., Texidor, C.A., Martínez, R., Cervantes, N. & Guzmán, E.E. (2023). Sistema de bombeo de agua del Hospital Pediátrico de Guantánamo. *Ciencia & Futuro*, 13(4), 623-639. <https://revista.ismm.edu.cu/index.php/revistacyf/article/view/2426>