

DIMENSIONAMIENTO HIDRÁULICO DEL SISTEMA DE BOMBEO PARA EL MOVIMIENTO DEL FLUIDO DE CALENTAMIENTO DEL AGUA EN UNA PISCINA PROTOTIPO

Lucía Rodríguez Trejo

Tecnológico Nacional de México en Celaya

lucalan@yahoo.com

José Martín Medina Flores

Tecnológico Nacional de México en Celaya

martin.medina@itcelaya.edu.mx

Arnoldo Maeda Sánchez

Tecnológico Nacional de México en Celaya

arnoldo.maeda@itcelaya.edu.mx

Álvaro Sánchez Rodríguez

Tecnológico Nacional de México en Celaya

alvaro.sanchez@itcelaya.edu.mx

Pedro Yáñez Contreras

Universidad Politécnica de Guanajuato

pyanez@upgto.edu.mx

Resumen

En el presente trabajo se hace uso de la metodología básica de dimensionamiento hidráulico encontrada en la literatura abierta para determinar la potencia o capacidad de bombeo para el movimiento de un fluido a través de la red hidráulica de tubería de un sistema de climatización del agua de una piscina prototipo, la cual se fabricó a una escala de 1 a 100 con respecto a una piscina semi-olímpica que se encuentra en el Tecnológico Nacional de México en Celaya.

Se consideran las pérdidas principales debidas a la fricción que se genera entre el fluido y el material de la tubería, así como las perdidas secundarias debidas a los diferentes accesorios con los que cuenta la red hidráulica de tubería. No se encontró en la industria una bomba con la capacidad determinada por lo que se procedió a seleccionar la primera inmediata al valor calculado.

Palabra(s) Clave(s): Dimensionamiento Hidráulico, Bombas, Red de Tuberías, Flujo Laminar, Flujo Turbulento.

Abstract

This work makes use of the basic methodology of hydraulic dimensioning found in the open literature to determine the power or pumping capability for the movement of a fluid through the pipe hydraulic network of a system of heating of the water of a prototype swimming pool, which was fabricated on a scale of 1 to 100 with respect to a semi-olympic swimming pool that is in the Technological Institute of Celaya. The main losses due to the friction that is generated between the fluid and the material of the pipe are considered, as well as secondary losses due to the different accessories with which the pipe hydraulic network have. It was not found in the industry a pump with the determined capability, so was selected the first that was found immediately above to the calculated value.

Keywords: *Hydraulic Dimensioning, Pump, Pipe Network, Laminar Flow, Turbulent Flow.*

1. Introducción

En un sistema hidráulico el fluido de trabajo comúnmente es el agua, la cual se hace circular a través de un sistema de tuberías y accesorios utilizando una máquina hidráulica conocida como bomba, la cual proporciona la energía necesaria para que el fluido se desplace desde un punto a otro a partir de cierto nivel de referencia. El objetivo principal de un dimensionamiento hidráulico es la selección óptima de la bomba, Renu et al., (2017) estudiaron el efecto de las condiciones climatológicas sobre la generación de potencia a partir de un panel fotovoltaico para satisfacer la demanda energética de un sistema de bombeo, la

optimización del rendimiento del sistema fotovoltaico-hidráulico se baso en las condiciones hidráulicas de la bomba como son su altura máxima y su punto de operación. Picón *et al.*, (2011) diseñaron sistemas de agua de enfriamiento para alimentación en torres de enfriamiento basándose en costos de tubería y accesorios, costos de intercambiadores y costo del sistema de bombeo. Ma *et al.*, (2017) desarrollaron un modelo de optimización mixto entero-no lineal para disminuir el costo total anual de una red de enfriamiento considerando de forma simultánea la red de enfriadores y la red de bombeo donde para esta última se toma en cuenta la demanda de flujo volumétrico de enfriamiento para reducir el costo de la red de bombeo, por último introdujeron una red de bombeo auxiliar para disminuir el costo de consumo energético global. En este trabajo se hace uso de las reglas básicas de dimensionamiento hidráulico [Mott, 2014] para determinar la capacidad de la bomba que se requiere para elevar el agua una altura de 0.226 m, la cual se hace circular a través de una red hidráulica constituida por tramos de tubería que suman una longitud de 0.90 m, cuatro codos de 90°, un filtro y una válvula de compuerta. El agua que circula a través de la red hidráulica se conduce a un sistema de calentamiento donde se eleva la temperatura del agua utilizando sistemas convencionales y no convencionales de energía para después ser utilizada para climatizar el agua de una piscina prototipo como la que se muestra en la figura 1. El valor obtenido de la capacidad de la bomba teóricamente debe ajustarse a los valores que se encuentran en la industria teniendo que tomar decisiones en base a la experiencia del equipo de trabajo para su óptima selección y puesta en marcha.

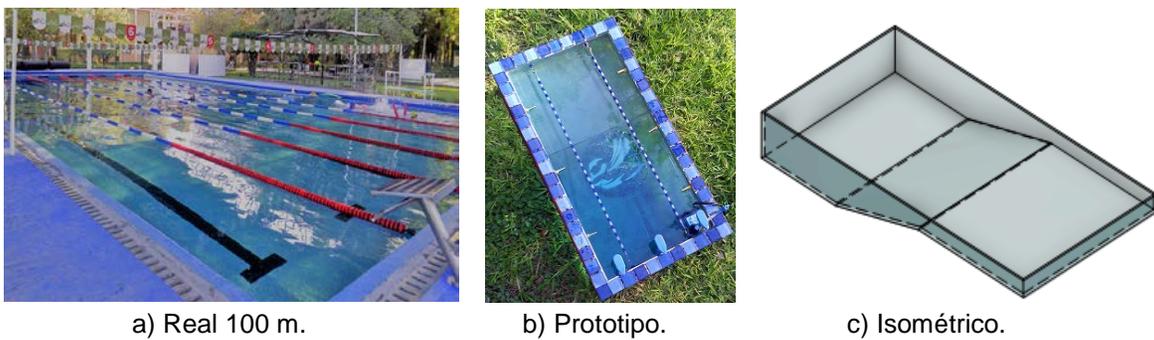


Figura 1 Piscina semi-olímpica.

2. Métodos

Modelo de Simulación del Sistema Hidráulico

El objetivo del dimensionamiento del sistema hidráulico es determinar la capacidad de trabajo ó potencia de la bomba, para el movimiento del fluido desde un punto a otro dentro del sistema. La red hidráulica que se propone para mover el fluido dentro del sistema para la climatización del agua del prototipo de alberca, está compuesta por cuatro codos de 90°, una válvula de compuerta completamente abierta, un filtro y la longitud de la tubería como se muestra en las figuras 2 y 3.

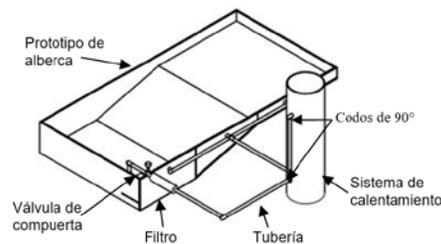


Figura 2 Red hidráulica propuesta.

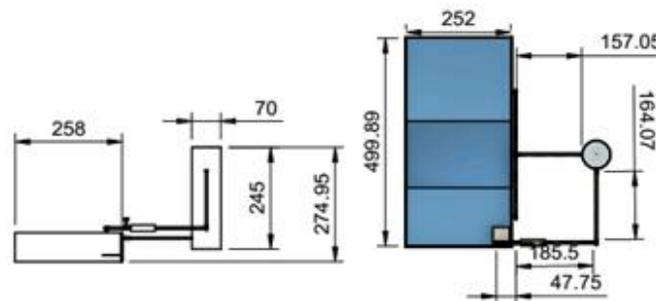


Figura 3 Dimensiones del sistema de calentamiento convencional (mm).

La pérdida irreversible de carga debido al contacto existente entre el fluido y la tubería, el cual genera fricción y la pérdida irreversible de carga debido a la presencia de válvulas, cambios en la dirección del flujo, ensanchamientos, reducciones, accesorios como codos, coples, etc., puede calcularse utilizando la ecuación 1 [Saldarriaga, 2014].

$$h_L = \left(f \frac{L}{D} + \sum K_L \right) \frac{\bar{V}_{prom}^2}{2g} \quad (1)$$

Donde en la ecuación 1, L es la longitud total de la tubería en metros, D es el diámetro de la tubería en metros, \bar{V}_{prom} es la velocidad promedio del fluido que circula a través de la tubería en m/s, g es el valor de la aceleración con la que un cuerpo cae en el vacío, con un valor de 9.81 m/s^2 , f es el factor de fricción de Darcy, el cual se determina utilizando la ecuación 2 conocida como la Ecuación de Coolebrock (1939).

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{\varepsilon}{3.7D} + \frac{2.51}{Re\sqrt{f}} \right) \quad (2)$$

En la ecuación 2, ε es el valor de la rugosidad de la superficie interna del material de la tubería en metros, Re es el número de Reynolds, el cual se calcula a partir de la ecuación 3 [White, 2002].

$$Re = \frac{D\rho\bar{V}_{prom}}{\mu} \quad (3)$$

En la ecuación 3, ρ y μ son la densidad y la viscosidad dinámica del fluido respectivamente evaluadas a la temperatura de estabilidad del agua del prototipo, \bar{V}_{prom} (velocidad promedio) se obtiene utilizando la ecuación 4 [Crowe, 2008].

$$\bar{V}_{prom} = \frac{\dot{V}}{A_t} \quad (4)$$

Donde \dot{V} es el flujo volumétrico en m^3/s , A_t es el área transversal de la tubería, la cual se calcula con la ecuación 5.

$$A_t = \frac{\pi D^2}{4} \quad (5)$$

El término $\sum K_L$ expresado en la ecuación 1, representa la sumatoria de los coeficientes de resistencia debido a la presencia de válvulas, cambios en la dirección del flujo, ensanchamientos, reducciones, accesorios como codos, coples, etc., los valores considerados de los coeficientes de resistencia en el presente estudio se muestran en la tabla 1 [Mott, 2014].

Tabla 1 Coeficientes de resistencia [Mott, 2014].

Tipo	Cantidad	Coeficiente de resistencia K_L
Codo Estándar de 90°	4	$30f$
Válvula de compuerta completamente abierta	1	$8f$
Filtro	1	12
Salida de la tubería	1	1
Entrada a la tubería	1	0.5

La ecuación de la energía aplicada entre el punto 1 (superficie del agua en el prototipo de alberca) y el punto de entrada al sistema de calentamiento convencional (punto 2) como se muestra en la figura 4 se establece como la ecuación 6 [Mataix, 1986].

$$\frac{P_1}{\rho g} + \alpha_1 \frac{\bar{V}_1}{2g} + Z_1 + h_B = \frac{P_2}{\rho g} + \alpha_2 \frac{\bar{V}_2}{2g} + Z_2 + h_L \quad (6)$$

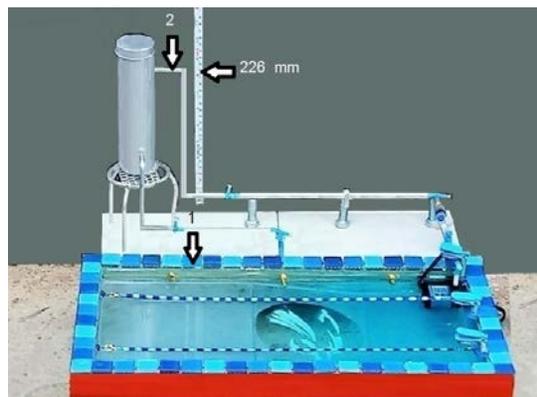


Figura 4 Punto inicial y final para el uso de la Ecuación de Energía.

En la ecuación 6, $Z_2 - Z_1$ es la diferencia de altura entre un punto en la superficie de la alberca y el punto de entrada al sistema de calentamiento convencional (figura 4). La diferencia de presiones entre el punto inicial y final se considera que es despreciable debido a que su valor es aproximadamente igual, la velocidad inicial en la superficie del agua de la alberca se considera aproximadamente cero ($\bar{V}_1 = 0$), y la velocidad en el punto de entrada al sistema de calentamiento convencional es la velocidad promedio con la que el fluido se desplaza en el interior de la tubería ($\bar{V}_2 = \bar{V}_{prom}$); por lo tanto, para determinar la carga útil entregada al fluido (h_B) se tiene la ecuación 7.

$$h_B = (Z_2 - Z_1) + \alpha_2 \frac{\bar{V}_2^2}{2g} + h_L \quad (7)$$

Donde α_2 es el factor de corrección de la energía cinética, el cual tiene un valor de 2 para flujo laminar completamente desarrollado y de 1.05 para flujo turbulento completamente desarrollado [Cengel, 2013]. Para determinar si el fluido que circula a través de la tubería es completamente desarrollado se debe calcular el valor de la longitud de entrada hidrodinámica (L_h), la cual para un flujo laminar se calcula utilizando la ecuación 8 y para flujo turbulento se considera la ecuación 9 [Cengel, 2013].

$$L_{h,laminar} \cong 0.05(Re)(D) \quad (8)$$

$$L_{h,turbulento} = 1.359(Re^{1/4})(D) \quad (9)$$

Por último para dimensionar la capacidad de la bomba se utiliza la ecuación 10 [Mataix, 1986].

$$\dot{W}_B = \frac{h_B \dot{V} \rho g}{\eta_B} \quad (10)$$

En la ecuación 10, η_B es la eficiencia de la bomba, la cual se considera del 50% [Mott, 2014]. La tabla 2, muestra los parámetros utilizados para el dimensionamiento de la capacidad necesaria de la bomba a utilizar, donde el flujo volumétrico de 0.000008609 m³/s, se determina tomando el tiempo que le toma a la bomba descargar el fluido en un recipiente de dos litros antes de llegar al filtro.

Tabla 2 Parámetros para el dimensionamiento de la bomba.

Parámetro	Unidades	Valor
Longitud de la tubería, L	m	0.90
Diámetro de la tubería, D	m	0.004
Rugosidad de la tubería, ε	m	3.07X10 ⁻⁷
Densidad, ρ	kg/m ³	997.6
Viscosidad dinámica, μ	N.s/m ²	0.0009415
Diferencia de altura, $Z_2 - Z_1$	m	0.226
Flujo volumétrico, \dot{V}	m ³ /kg	0.000008609

3. Resultados y Discusión

El modelo de simulación presentado en la sección 2, se implementó en el software “Engineering Equation Solver” (EES) (figura 5), considerando los datos de la tabla 2, obteniéndose los resultados que se muestran en la tabla 3.

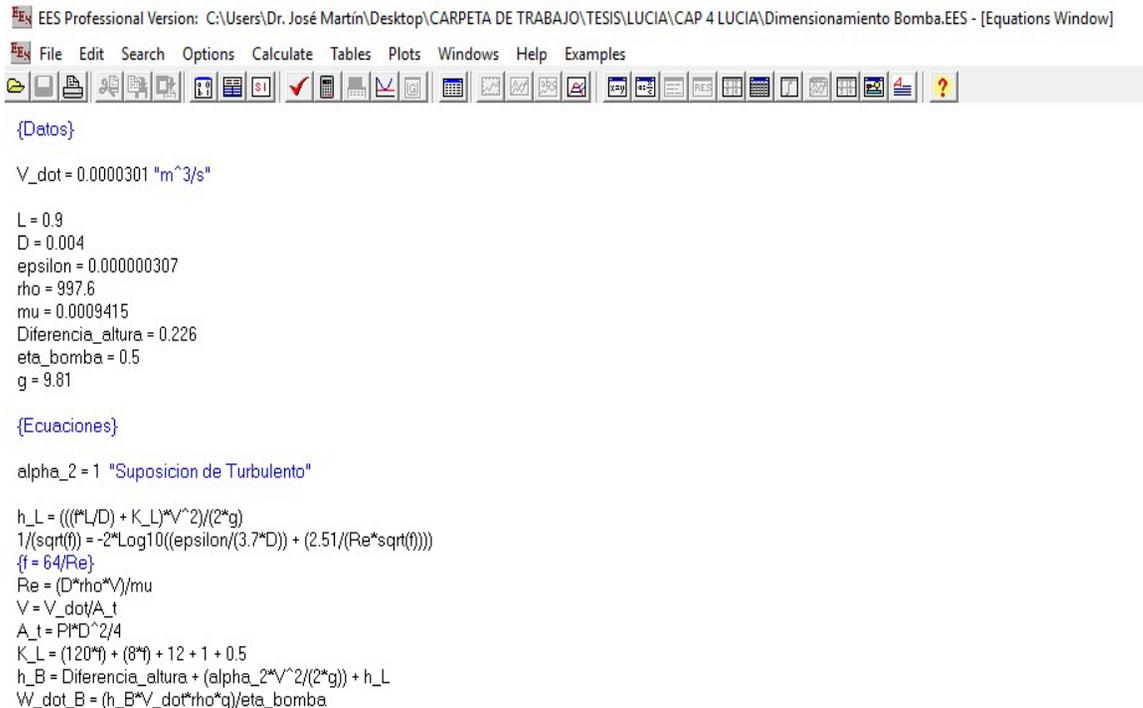


Figura 5 Implementación de modelo en el software EES.

Tabla 3 Parámetros obtenidos de la simulación.

Parámetro	Unidades	Valor
Factor de fricción, f	---	0.04403
Reynolds, Re Flujo laminar	---	2904
Longitud de entrada hidrodinámica, $L_{h, \text{laminar}}$	m	0.5808
Potencia de la bomba, \dot{W}_B	Watt	0.1632

De la tabla 3, se aprecia que para las condiciones de entrada al simulador que se consideran en la tabla 2, se necesita que al menos la capacidad de la bomba sea de 0.1632 Watt para desplazar el fluido desde la superficie de la alberca prototipo hasta el sistema de calentamiento como se muestra en la figura 4. Sin embargo, en la industria no se encontró una bomba con la capacidad mencionada, por lo

que se procedió a seleccionar la de menor capacidad encontrada, la cual fue una bomba Aquasub 4203 (figura 6) cuyas características se muestran en la tabla 4.



Figura 6 Bomba seleccionada para el estudio.

Tabla 4 Característica de la bomba seleccionada¹.

Parámetro	Unidades	Valor
Flujo volumétrico, \dot{V}	lpm	4.67
Potencia, \dot{W}_B	Watts	4.50
Altura máxima	m	0.70
Frecuencia	HZ	50/60
Volts	V	110/120

¹<http://aquasub.info/4203/>

Considerando la potencia de la bomba real como un valor conocido de 4.5 Watt (tabla 4) y las condiciones de la tabla 2, excepto el flujo volumétrico, los resultados obtenidos del simulador se presentan en la tabla 5.

Tabla 5 Parámetros obtenidos de la simulación.

Parámetro	Unidades	Valor
Factor de fricción, f	---	0.03088
Reynolds, Re Flujo turbulento	---	10152
Longitud de entrada hidrodinámica, $L_{h,turbulento}$	m	0.04
Flujo volumétrico, \dot{V}	m ³ /s	0.0000301

Se aprecia en la Tabla 5 que para un valor de potencia de la bomba de 4.5 Watt y una eficiencia del 50% se necesita una razón de flujo volumétrico de 0.0000301 m³/s, mientras que en el experimento físico del sistema hidráulico se obtiene una

razón experimental de flujo volumétrico de 0.000008609 m³/s, los cuales se encuentran por debajo del límite que maneja la bomba real, el cual es de 0.00007783 m³/s (4.67 lpm); por lo tanto, consideramos que la eficiencia de la bomba no es del 50% como originalmente se supuso. Tomando en cuenta los valores de la tabla 2 y una potencia de la bomba de 4.5 Watt se obtiene del simulador una eficiencia del 1.77%, el cual es un valor demasiado pequeño comparándolo con el valor del 50%. Sin embargo, como es una bomba demasiado pequeña es probable que sea correcto el valor de eficiencia calculado, además se comprueba experimentalmente que el fluido caliente que circula a través del sistema hidráulico alcanza a incrementar la temperatura del agua que se encuentra en la piscina prototipo al valor deseado.

4. Conclusiones

El dimensionamiento de la capacidad de la red de bombeo que forma parte de un sistema hidráulico es de suma importancia para el movimiento del fluido que circula a través de éste. A pesar de que existen ecuaciones teóricas desarrolladas a lo largo de los años que nos orientan cómo determinar la capacidad de la bomba y la selección óptima de la misma, siempre habrá una discrepancia con lo que existe en la vida ordinaria. En el presente trabajo se concluye lo mencionado con anterioridad teniendo dos posibles caminos de selección de la bomba. El primero y el más común es el de sobredimensionar la potencia del sistema de bombeo, y el otro, menos común y del cual no existen referencias prácticas de selección, es la suposición de un valor de eficiencia de la bomba. En este trabajo se encontró que para satisfacer la potencia del fabricante de la bomba se debe tener una eficiencia de alrededor del 2%, la cual se nos hace demasiado pequeña; sin embargo al tener una bomba pequeña es probable que sea correcto.

5. Agradecimientos

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada a la Ing. Lucía Rodríguez Trejo para llevar a cabo sus estudios de posgrado en la Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecánica

perteneciente al Departamento de Ingeniería Mecánica en el Tecnológico Nacional de México en Celaya. Así mismo, también se agradece al programa PRODEP (Programa para el Desarrollo Profesional Docente) por el financiamiento para este proyecto bajo la partida de Incorporación de Nuevos PTC, ITCEL-PTC-024.

6. Bibliografía y Referencias

- [1] Cengel, Y. A., Cimbala, J., M., Fluid Mechanics, McGraw-Hill, Third Edition, 2013.
- [2] Colebrook, C., F., Turbulent Flow in Pipes with Particular Reference to the Transition Region between the Smooth and Rough Pipe Laws, Journal of the Institution of Civil Engineers (London), vol. 11 (4), pp. 133–156, 1939.
- [3] Crowe, C., T., Elger, D., F., Williams, B., C., Roberson, J., A., Engineering Fluid Mechanics, 9th Edition, Wiley, 2008.
- [4] Ma, J., Wang, Y., Feng, X., Simultaneous Optimization of Pump and Cooler Networks in a Cooling Water System, Applied Thermal Engineering, vol. 125, pp. 377 – 385, 2017.
- [5] Mataix, C., Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas, 2^{da} Edición, Alfaomega grupo editor, 1986.
- [6] Mott, R., L., Untener, J., A., Applied Fluid Mechanics, Seventh Edition, Pearson, 2014.
- [7] Picón, Núñez, M., Polley, G., T., Canizalez, Dávalos, L., Medina, Flores, J., M., Short Cut Performance, Method for the Design of Flexible Cooling Systems, Energy, vol. 36, pp. 4646 – 4653, 2011.
- [8] Renu, Bora, B., Prasad, B., Sastry, O., S., Kumar, A., Bangar, M., Optimum Sizing and Performance Modeling of Solar Photovoltaic (SPV) Water Pumps for Different Climatic Conditions, Solar Energy, vol. 155, pp. 1326 – 1338, 2017.
- [9] Saldarriaga, J., Hidráulica de Tuberías (Abastecimiento de Agua, Redes, Riegos), Alfaomega, 2014
- [10] White, F., M., Fluid Mechanics, Fifth Edition, McGraw-Hill, 2002.