

Temperatura de los fluidos de operación y su efecto en el performance de una torre de enfriamiento de laboratorio

Temperature of operating fluids and their effect on the performance of a laboratory cooling tower

Temperatura de fluidos operacionais e seu efeito no desempenho de uma torre de resfriamento de laboratório

Guevara Chinchayan, Robert Fabián¹, Sosa Sandoval, Jenneviene Janet², Chucuya Huallpachoque, Roberto³

Resumen

Objetivo. La presente investigación determina el efecto de las temperaturas de los fluidos de operación en el performance de una torre de enfriamiento de laboratorio. **Materiales y Métodos.** La investigación es del tipo experimental realizado en el laboratorio de generación termoeléctrica, en la cual se determina el comportamiento del desempeño de la torre de enfriamiento de tiro forzado, tal como el rendimiento térmico, acercamiento y rango. **Resultados.** Se caracterizó los flujos experimentales para poder evaluar el desempeño de la torre de enfriamiento; para ello, se trabajaron con 4 flujos másicos de agua caliente, cada uno de ellos a temperaturas de 30, 40, 50, 60 y 70 °C. Se elaboraron las curvas de comportamiento de los fluidos actuantes en la torre de enfriamiento, evaluándose el desempeño en función a los valores de temperatura de bulbo seco y bulbo húmedo del aire y las temperaturas del agua de enfriamiento. **Conclusión.** Para el caso de un flujo de 0.0047 m³/s y una temperatura de entrada del agua caliente de 30 °C, se alcanzó una eficiencia de 91.67 %, con un flujo másico de aire de 0.00421 m³/s de aire caliente a 30 °C y una humedad relativa de 58.6 %, requiriéndose a la salida del proceso, aire caliente con humedad relativa de 92.8 %, con flujo másico de agua de reposición igual a 0.324 m³/h. Los indicadores de desempeño de las torres de enfriamiento son óptimos para el caso del flujo másico de agua caliente igual a 0.00421 m³/s.

Palabras clave: Torre de enfriamiento, proceso térmico, rendimiento.

Abstract

Objective. The present investigation determines the effect of operating fluid temperatures on the performance of a laboratory cooling tower. **Materials and methods.** The research is of the experimental type carried out in the thermoelectric generation laboratory, in which the performance behavior of the forced draft cooling tower is determined, such as thermal performance, approach and range. **Results.** The experimental flows were characterized to be able to evaluate the performance of the cooling tower, for which they worked with 4 hot water mass flows, each one at temperatures of 30, 40, 50, 60 and 70 °C. The behavior curves of the fluids acting in the cooling tower were elaborated, evaluating the performance based on the dry bulb and wet bulb temperatures of the air and the temperatures of the cooling water. **Conclusion.** For the case of a flow of 0.0047 m³ / s and a hot water inlet temperature of 30 °C, an efficiency of 91.67% was reached, with a mass flow of air of 0.00421 m³ / s of hot air at 30 ° C and a relative humidity of 58.6%, requiring hot air with relative humidity of 92.8% at the exit of the process, with a replacement water mass flow equal to 0.324 m³ / h. The performance indicators of the cooling towers are optimal for the case of the hot water mass flow equal to 0.00421 m³/s.

Keywords: Cooling tower, thermal process, performance

Objetivo. A presente investigação determina o efeito das temperaturas do fluido operacional no desempenho de uma torre de resfriamento de laboratório. **Materiais e métodos.** A pesquisa é do tipo experimental realizada no laboratório de geração termelétrica, em que é determinado o comportamento de desempenho da torre de resfriamento de tiragem forçada, como desempenho térmico, abordagem e alcance. **Resultados.** Os fluxos experimentais foram caracterizados para poderem avaliar o desempenho da torre de resfriamento, para a qual trabalharam com 4 fluxos mássicos de água quente, cada um nas temperaturas de 30, 40, 50, 60 e 70 ° C. Foram elaboradas as curvas de comportamento dos fluidos atuantes na torre de resfriamento, avaliando o desempenho com base nas temperaturas de bulbo seco e úmido do ar e da água de resfriamento. **Conclusão.** Para o caso de uma

¹ Escuela de Ingeniería en Energía. Maestro. Universidad del Santa. Chimbote. Perú. guevara281165@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0002-3579-3771>

² Facultad de Educación y Humanidades. Doctora. Universidad del Santa. jsosa@uns.edu.pe <https://orcid.org/0000-0002-8200-7577>

³ Escuela de Ingeniería Industrial. Maestro. Universidad Cesar Vallejo. Chimbote. rchucuya@ucv.edu.pe <https://orcid.org/0000-0001-9175-5545>

vazão de 0,0047 m³/s e uma temperatura de entrada de água quente de 30 °C, uma eficiência de 91,67% foi alcançada, com uma vazão mássica de ar de 0,00421 m³ / s de ar quente a 30 ° C e umidade relativa de 58,6%, necessitando de ar quente com umidade relativa de 92,8% na saída do processo, com vazão mássica de água de reposição igual a 0,324 m³/ h. Os indicadores de desempenho das torres de resfriamento são ótimos para o caso de vazão mássica de água quente igual a 0,00421 m³/s.

Palavras-chave: Torre de resfriamento, processo térmico, desempenho

Introducción

La siguiente investigación permite determinar los efectos de la temperatura de los fluidos de proceso en el performance de la torre de enfriamiento de tiro forzado de laboratorio, para la cual se enuncia sus ecuaciones para realizar el balance de materia y energía dentro del equipo térmico, en el cual intercambian materia y energía el agua caliente (a distintos valores de temperatura de ingreso) con el aire a condiciones ambientales caracterizada por sus valores de temperatura de bulbo húmedo, temperatura de bulbo seco, entalpia específica, humedad relativa y humedad absoluta, estas pruebas se realizan para 4 condiciones distintas de valores de flujo del agua caliente. Permite determinar el comportamiento de la torre de enfriamiento, así como de sus indicadores de rendimiento, rango y acercamiento, valores que permitirán conocer cuáles son los límites de operación para la torre de enfriamiento para un buen performance.

Las torres de enfriamiento son dispositivos térmicos a través del cual se enfría el agua a través de la evaporación. Su uso esta masificado en los procesos industriales en los cuales se requiere enfriamiento. Las torres de enfriamiento se emplean para rangos de enfriamiento comprendidos entre 10 y 30 °C. El valor mínimo de temperatura que se alcanza en una torre de enfriamiento es equivalente al valor de la temperatura de bulbo húmedo del aire atmosférico. (Contreras, 2017)

La operación dentro de la torre de enfriamiento, se inicia con el ingreso de agua caliente por la parte superior de la torre a través de distribuidores de agua. El agua caliente es distribuida a lo largo del área de enfriamiento de la torre y desciende a través del relleno, mientras que el flujo de aire impulsado, fluye en contracorriente al agua caliente, intercambiando calor y masa. Se cuenta con otras disposiciones para este proceso de enfriamiento y deshumidificación, así tenemos el flujo cruzado, procurando siempre la existencia de una mayor área de contacto del agua con el aire. El agua sale por la parte inferior de la torre con un valor de temperatura inferior con la cual ingreso, esta es colectada en el depósito de agua fría ubicada en la parte inferior de la torre de enfriamiento. (Fernández y Celestino, 2017)

En una torre de tiro forzado, el ventilador está instalado en la parte inferior de la torre, aspirando el aire y luego lo descarga por la parte superior. El aire circulante es aire frío, el cual se encuentra a una mayor densidad con respecto a la torre de tiro inducido. Como resultado del proceso, el ventilador y componentes tendrán una mayor vida útil con respecto al tiro inducido, debido a que el ventilador opera con aire frío, no saturado y el cual no es corrosivo en comparación al aire caliente y saturado que se encuentra a la salida. (Fernández y Celestino, 2017)

En la investigación de Fernández, S. y Celestino, H (2017), concluyen que la eficiencia de la torre de enfriamiento fluctúa entre 61.12%, 72.11% a 79.26%, con una relación agua /aire (L/G) de 0.48.07, 0.3356 y 0.1303 respectivamente con temperaturas de 30°C, de 66.44%, 77.80% a 85.05%, con una relación L/G de 0.48.07, 0.3356 y 0.1303 respectivamente para la temperatura de 40°C y de 71.82%, 80,81% a 88.23% para una relación L/G de 0.48.07, 0.3356 y 0.1303 respectivamente para la temperatura de 50°C. Los indicadores de desempeño energético de la torre disminuyen con un valor de L/G, debido a que el flujo de agua que ingresa a la torre se incrementa; ya que, para un incremento, sería necesario aumentar la superficie de contacto entre aire y agua. El desempeño de la torre se puede incrementar de muchas maneras, siendo uno de ellas la distribución del agua a lo largo del relleno. Es decir, uno de los aspectos muy importantes para mejorar el desempeño, es la distribución del agua, también puede mejorarse mediante la atomización del agua por la parte superior a través de los difusores, de tal forma que el agua descienda atomizada. Para el rango y el rendimiento que son indicadores de desempeño, estos aumentan con la temperatura, debido a que un aumento de la temperatura del líquido, incrementa el proceso de transferencia de masa y calor desde la fase líquida a la fase vapor, acelerándose la deshumidificación del agua y humidificándose el aire.

Carias, A. (2010) en su trabajo de investigación resume que el gradiente entre la temperatura de agua caliente y la temperatura del agua fría se conoce como “Rango”. Asimismo, a la diferencia de temperaturas entre el agua fría y de bulbo húmedo de ingreso a la torre se le conoce como “Acercamiento”. De estas los dos indicadores de desempeño, el que tiene una mayor significancia en la determinación del dimensionamiento de la amplitud (altura y área transversal) de la torre de enfriamiento es el acercamiento, de tal modo de que si el acercamiento es más grande entonces la torre de enfriamiento es mucho más grande, ya que la función de la torre es permitir el acercamiento de la temperatura de agua fría lo más cercano al valor de la temperatura del bulbo húmedo de ingreso. De forma análoga, un resorte mecánico, para comprimirlo es necesario una fuerza que se incremente progresivamente según se comprime el resorte.

Huaroc, D. y Quispe, E. (2016) en su tesis concluye que la torre de enfriamiento cuyo relleno era de planchas de acero inoxidable separadas una de otra por 2 cm, permitió una mejor distribución del agua a través de películas de agua la cuales fluían a través de las láminas, proporcionando una mejor transferencia de calor y de masa entre la película de agua con la corriente de aire. El rendimiento evaluado a una temperatura de ingreso del agua de 45 °C es de 89 % y a la temperatura de ingreso del agua de 35 °C es de 82 % y a la temperatura de entrada del agua de 25 °C es 78 %. Del mismo modo para una torre de enfriamiento cuyo relleno contiene mallas de polietileno ubicadas de manera aleatoria de forma vertical, el agua caliente en descenso va impactando a las mallas y se va pulverizando en gotas muy pequeñas, en tanto el aire fluye en contracorriente, con el resultado de que la corriente de agua se enfría por vaporización. El rendimiento evaluado a una temperatura de entrada del agua de 45 °C es 79 %, a la temperatura de entrada de agua de 35 °C es 77 % y a la temperatura de entrada del agua de 25 °C es 91 %. En donde el tipo de relleno también tiene un efecto sobre el de la torre de enfriamiento.

Por lo consiguiente, Obregón, L. Pertuz, J. y Domínguez, R. (2017) en su artículo de investigación resumen que se efectuó el diseño, instalación y puesta en operación de una torre de enfriamiento a escala de un laboratorio de 0.15 m de ancho y 1.54 m de alto, el cual contiene empaques del tipo salpicadura fabricados de madera, acrílico, fierro y aluminio, y del tipo película fabricado de acrílico. Se determinó el desempeño de la torre a distintos flujos máxicos L'/G' con rangos de 0.2 a 1.0, y temperaturas de ingreso del agua con rangos entre 48 - 40°C y con diversos materiales de fabricación y geometrías de los empaques. Desarrollándose una correlación no lineal para el coeficiente volumétrico global de transferencia de masa $K_y a$ como una función a partir de un análisis estadístico. Se identificó que el desempeño de la torre de enfriamiento se incrementa para valores altos de $K_y a$ y de rendimiento al realizarse los incrementos de la relación L'/G' que operan con empaques cuyos materiales poseen bajos valores de conductividad térmica, así como la madera y el acrílico y empleando altos valores de temperatura del agua de ingreso. Un incremento del área superficial de los empaques en 350% trae como resultado el aumento del rendimiento hasta un valor igual a 30%, el cual permitió realizar un análisis de los costos de ingeniería.

El proceso de evaporación se presenta en la superficie de agua en contacto con el aire ambiental no saturado. En primer término, “las moléculas del agua próximas a la superficie presentan colisiones que incrementan su energía más de lo necesario, lo cual permite vencer la energía de unión de la superficie. La energía necesaria para la evaporación proviene de la energía interna del agua, la cual experimenta un descenso de temperatura. Sin embargo, de mantenerse las condiciones de estado estable, el calor latente perdido por el líquido debido a la evaporación debe compensarse mediante la transferencia de energía al agua desde el medio ambiente. El aire húmedo recibe vapor y calor latente de vaporización. Este proceso permanece hasta que se alcanza un estado de equilibrio evaluado a la TBH del aire. (Incropera, 2008)

La humidificación es un proceso de intercambio de calor y masa sin la presencia de un agente externo de calor, en una torre de enfriamiento se presenta cuando el aire entra en contacto directo con el agua caliente, el cual se caracteriza por ser insoluble. Este mecanismo nos conduce a diferentes aplicaciones además de la humidificación del aire y su respectivo calentamiento, como son la deshumidificación. Lo común en los procesos industriales es que la fase líquida es el agua, y la fase gaseosa el aire. Sus aplicaciones industriales son muy diversas. (Pulla, 2007)

La humedad relativa, es una propiedad psicrométrica empleado para expresar la cantidad de humedad contenida en una muestra o masa de aire, en relación a la cantidad de humedad del aire, estando en

condición de saturación y con el mismo valor de temperatura de la muestra en análisis. La humedad relativa se representa de manera porcentual así por ejemplo 90 % o 65 %. También es la relación entre la presión parcial del vapor y la tensión de vapor a una determinada temperatura. (Shapiro y Moran, 2012)

Eficiencia: El rendimiento térmico, permite evaluar el desempeño energético de la torre de enfriamiento con lo cual se determina el grado de aprovechamiento de la energía a través de un proceso de transferencia de calor y de masa. Para cualquier equipo o maquina térmica el rendimiento es la razón entre la energía útil aprovechable y la energía útil suministrada. (Kenneth Wark, 2003)

De esta forma, la presente investigación determina el efecto de la temperatura de los fluidos de operación en el performance de una torre de enfriamiento del laboratorio de generación termoeléctrica, Escuela de Ingeniería en Energía-UNS, previo a ello se desarrollaron los siguientes objetivos: Caracterizar los parámetros de operación de los fluidos que intercambian calor y masa de la torre de enfriamiento, realizar un balance de masa y energía, determinar las curvas de comportamiento de la torre de enfriamiento en función a sus parámetros de operación y establecer los indicadores de desempeño energético en el comportamiento de la torre de enfriamiento.

Materiales y métodos

La presente investigación es experimental. La población y muestra es única, estuvo conformada por la torre de enfriamiento de tiro forzado del laboratorio de generación termoeléctrica de la Escuela de Ingeniería en Energía - UNS.

La variable independiente “temperatura de fluidos de operación” fue operacionalizado mediante los siguientes indicadores: temperatura de bulbo seco y bulbo húmedo del aire del aire a la entrada y salida de la torre de enfriamiento y la temperatura del agua de a enfriar. La variable dependiente “performance de la torre de enfriamiento” se operacionalizó mediante los indicadores: rendimiento, rango, acercamiento.

La presente investigación se realizó en diferentes fases, según la siguiente secuencia: Se establece un régimen de flujo de agua caliente en función a su capacidad de bombeo, en este caso, a 100 %, 90 %, 80 % y 70 %, el cual se suministra a diversos valores de temperatura hacia la torre de enfriamiento. Los valores de temperatura del agua caliente ingresante a la torre de enfriamiento son: 30°C, 40°C, 50°C, 60°C y 70 °C, sucesivamente.

- Seguidamente se establece las lecturas de medición de los fluidos de procesos procurando que, antes de las tomas de medidas, exista un tiempo de 10 minutos, luego del cual se haya estabilizado las condiciones térmicas del flujo de agua y aire.
- Se elabora el balance de materia y energía.
- Se realiza un análisis de la información elaborándose los gráficos de comportamiento en la torre de enfriamiento y se elaboran los indicadores de desempeño energético.

Se ha utilizado una Computadora Pentium COREL DUO V de 5 TB con software de Microsoft Office: Procesador de Textos: word y hoja electrónica excel para la elaboración de los cálculos técnicos.

Así mismo, para la determinación de los valores de psicrometría se hizo uso de la herramienta informática *diagrama y calculadora de parámetros psicrométricos online* de la empresa Herramientas de Ingeniería, ubicada en el siguiente enlace: <https://www.herramientasingeneria.com/onlinecalc/spa/psicrometricos/psicrometricos.html>

Con el cual teniendo en cuenta los valores de TBS y TBH para el flujo de aire de salida y entrada con el mismo que se determinan los valores de: humedad relativa, humedad absoluta, entalpia específica y densidad.

Para la determinación de las propiedades de la entalpia específica del agua en estado de líquido comprimido se hizo uso del software libre STEAM TABLE 1967IFC de la Empresa FIGENER S/A.

Metodología del cálculo

Figura 1. Esquema general externo de torre de enfriamiento de tiro forzado.

Balance de materia:

$$M_{w1} + (M_a * X_1) = M_{w2} + (M_a * X_2) \dots \dots \dots (1)$$

Balance de energía del volumen de control:

$$(M_{w1} * h_{w1}) + (M_a * h_1) = (M_{w2} * h_{w2}) + (M_a * h_2) \dots \dots \dots (2)$$

Flujo de aire húmedo entrante a la torre de enfriamiento:

$$M_a = \frac{M_{w1} * (h_{w2} - h_{w1})}{(h_1 - h_2) - (h_{w2} * (X_1 - X_2))} \dots \dots \dots (3)$$

Flujo de agua de reposición:

$$M_{wr} = M_{w1} - M_{w2} \dots \dots (4)$$

Rango:

$$R = T_1 - T_2 \dots \dots \dots (5)$$

Acercamiento:

$$A = T_2 - T_{BH} \dots \dots \dots (6)$$

Rendimiento de una torre de enfriamiento:

$$Ef = \frac{R}{R + A} \dots \dots \dots (7)$$

Dónde:

M_a = Flujo másico de aire húmedo

M_{w1} = Flujo másico de agua caliente entrante a la torre de enfriamiento.

M_{w2} = Flujo másico de agua enfriada a la salida de la torre de enfriamiento.

M_{wr} = Flujo másico de agua de reposición.

- T_{BH1} = Temperatura de bulbo húmedo del aire a la entrada de la torre de enfriamiento.
 T_{BS1} = Temperatura de bulbo seco del aire a la entrada de la torre de enfriamiento.
 T_{BH2} = Temperatura de bulbo húmedo del aire a la salida de la torre de enfriamiento.
 T_{BS2} = Temperatura de bulbo seco del aire a la salida de la torre de enfriamiento.
 T_2 = Temperatura de salida del agua
 T_1 = Temperatura de entrada del agua
 X_1 = Humedad absoluta del aire húmedo a condiciones de entrada de la torre de enfriamiento.
 X_2 = Humedad absoluta del aire húmedo a condiciones de salida de la torre de enfriamiento.
 h_{w1} = Entalpia específica del aire húmedo a condiciones de entrada a la torre de enfriamiento.
 h_{w2} = Entalpia específica del aire húmedo a condiciones de salida a la torre de enfriamiento.

Resultados

Mediciones realizadas para el balance de masa y energía

Se realizó mediciones de temperaturas y flujo másico de los fluidos de proceso para 4 caudales de bombeo distintos para el agua caliente entrante a la torre de enfriamiento de tiro forzado.

Tabla 1

Mediciones de temperatura de fluidos de operación para caudal de agua 1

	Detalles				
Caudal de agua (m ³ /s)	0.0068	0.0068	0.0068	0.0068	0.0068
TBS (°C) ingreso de aire	20	20	20	20	20
TBH(°C) ingreso de aire	15.2	15	15	15.2	15.5
TBS (°C) salida de aire	35	38	39	40	41
TBH(°C) salida de aire	29	32	33	34	35
Temperatura de entrada de agua (°C)	30	40	50	60	70
Temperatura de salida de agua (°C)	24	25	26	29	31

Tabla 2

Mediciones de temperatura de fluidos de operación para caudal de agua 2

	Detalles				
Caudal de agua (m ³ /s)	0.0061	0.0061	0.0061	0.0061	0.0061
TBS (°C) ingreso de aire	20	20	20	20	20
TBH(°C) ingreso de aire	15.6	15.6	15.6	15.0	15.2
TBS (°C) salida de aire	31	33	34	39	40
TBH(°C) salida de aire	29	29	31	33	35
Temperatura de entrada de agua (°C)	30	40	50	60	70
Temperatura de salida de agua (°C)	22	22.2	22.5	22.5	23.0

Tabla 3

Mediciones de temperatura de fluidos de operación para caudal de agua 3

	Detalles				
Caudal de agua (m ³ /s)	0.0054	0.0054	0.0054	0.0054	0.0054
TBS (°C) ingreso de aire	20	20	20	20	20
TBH(°C) ingreso de aire	15.1	15.2	15.2	15.0	15.2
TBS (°C) salida de aire	34	35	37	42	47
TBH(°C) salida de aire	31	34	35	37	41
Temperatura de entrada de agua (°C)	30	40	50	60	70
Temperatura de salida de agua (°C)	20	20.5	21	21	21.2

Tabla 4*Mediciones de temperatura de fluidos de operación para caudal de agua 4*

	Detalles				
Caudal de agua (m ³ /s)	0.0047	0.0047	0.0047	0.0047	0.0047
TBS (°C) ingreso de aire	20	20	20	20	20
TBH(°C) ingreso de aire	15	15	15	15.2	15
TBS (°C) salida de aire	30	36	38	45	50
TBH(°C) salida de aire	29	33	35	42	47
Temperatura de entrada de agua (°C)	30	40	50	60	70
Temperatura de salida de agua (°C)	19.0	19.2	19.5	20.0	21.5

Balance de masa y energía

Se presenta los valores de humedad y entalpia específica para las condiciones de proceso de la Tabla 1

Tabla 5*Valores de humedad y entalpia especifica par los de fluidos de operación para caudal de agua 1*

Mediciones	1	2	3	4	5
Caudal de agua (m ³ /s)	0.0047	0.0047	0.0047	0.0047	0.0047
TBS (°C) ingreso de aire	20	20	20	20	20
TBH(°C) ingreso de aire	15	15	15	15.2	15
HR1 (%)	58.6	58.6	58.6	60.1	58.6
X1 kg agua/Kg aire seco	0.0085	0.0085	0.0085	0.008	0.0085
h1 (kJ/ kg de aire seco)	41.7	41.7	41.7	42.3	41.7
TBS (°C) salida de aire	30	36	38	45	50
TBH(°C) salida de aire	29	33	35	42	47
HR2 (%)	92.08	81.3	81.8	83.5	84.4
X2 (kg agua/kg aire seco)	0.0252	0.0312	0.0352	0.0534	0.0713
h2 (kJ/ kg de aire seco)	94.5	116.2	128.7	183.1	235.1
Temperatura de entrada de agua (°C)	30	40	50	60	70
Temperatura de salida de agua (°C)	19.0	19.2	19.5	20.0	21.5

Del mismo modo:

Los cálculos se realizan con la toma de mediciones, en el caso donde la temperatura del agua de alimentación es 30 °C.

Para los valores de la entalpia de agua a la entrada y a la salida se toman en cuenta las siguientes condiciones de operación:

Entrada de agua:

Presión de bombeo = 3 bar.

Temperatura de agua= 30 °C (Según Tabla 5)

Entalpia del agua (h_{w1}) = 125.9 kJ/kg

Salida de agua:

Presión de retorno = 1.55 bar (Equivalente a los 6 metros de altura de la torre de enfriamiento)

Temperatura de agua= 19 °C (Según Tabla 5)

Entalpia del agua (h_{w2}) = 79.8 kJ/kg

Reemplazando valores tenemos el siguiente resultado par el flujo másico de aire húmedo.

$$M_a = 15.15 \frac{m^3}{h} = 0.00421 \frac{m^3}{s}$$

Seguidamente, calculamos el flujo de agua de aportación, debido al arrastre de partículas que se originan debido al proceso de humidificación del aire que entra en contacto directo con el agua caliente a enfriar.

$$M_{w2} = 0.00461 \frac{m^3}{s}$$

$$M_{wr} = 0.0047 - 0.00461 = 0.00009 \frac{m^3}{s}$$

Potencia eléctrica utilizada de la bomba de agua.

$$P_h = \frac{Q * g * H_B * \rho}{1000} (kW)$$

Donde:

Q = Caudal (m^3/s) = $180/3600 = 0.05 m^3/s$

g = Gravedad ($9.81 m/s^2$)

P = Densidad del agua ($1000 kg/m^3$)

H_B = Altura de bombeo (12 m)

$$P_h = \frac{0.0047 * 9.81 * 12 * 1000}{1000} = 0.55 (kW)$$

Eficiencia de la Bomba hidráulica = 0.8

Eficiencia del motor eléctrico = 0.9

Se tiene un valor de la potencia eléctrica del motor igual a:

$$P_{ME} = \frac{P_H}{0.8 * 0.9} = 0.76 KW = 1 HP$$

Factor de carga del motor eléctrico.

$$FC = \frac{P_{ME}}{P_{Nominal ME}} * 100\% = \frac{0.76}{1} * 100\% = 76 \%$$

Tabla 6

Flujos característicos e indicadores de desempeño energético según condiciones de la Tabla 1

Resultados	1	2	3	4	5
Flujo másico de aire (m^3/s)	0.00421	0.00563	0.00707	0.0045	0.00508
Flujo másico de aire (m^3/h)	15.16	20.27	25.45	16.2	18.29
Flujo másico inicial agua(m^3/s)	0.0047	0.0047	0.0047	0.0047	0.0047
Flujo másico final a agua(m^3/s)	0.00461	0.00455	0.00447	0.00445	0.00431
Flujo másico final a agua(m^3/h)	16.596	16.38	16.092	16.02	15.516
Flujo másico de agua de aportación (m^3/s)	0.00009	0.00015	0.00023	0.00025	0.00039
Flujo másico de agua de aportación (m^3/h)	0.324	0.54	0.828	0.9	1.404
Rango	11	20.8	30.5	40	48.5
Acercamiento	1	7	15	18	23
Eficiencia	91.67%	74.82%	67.03%	68.97%	67.83%
Relación L/G	1.11	0.834	0.664	1.04	0.925

De la tabla anterior, se puede comentar que la eficiencia de la torre de enfriamiento se hace máxima cuando el acercamiento es mínimo, así mismo ocurre con el rango. Asimismo, el agua de aportación se incrementa conforme se acrecienta la temperatura del agua caliente que ingresa a la torre de enfriamiento. Del mismo modo, el flujo másico de aire es el menor para el caso en el cual la temperatura del agua caliente es la mínima de la serie de datos analizados.

Seguidamente, se presentan resultados del comportamiento de los fluidos hallados en función a la temperatura de al agua caliente entrante a la torre de enfriamiento:

Figura 1. Comportamiento del acercamiento y de la eficiencia vs Temperatura del agua caliente

Figura 2. Comportamiento del flujo másico de agua de reposición y del flujo de aire de Enfriamiento vs Temperatura del agua caliente

Seguidamente se representan los gráficos de comportamiento de las mediciones realizadas con los 4 caudales tomados en cuenta en la toma de medidas. En el grafico N° 3 se puede observar el comportamiento de la eficiencia, para lo cual este parámetro alcanzó su máximo valor cuando el caudal es igual a $0.0047 \text{ m}^3/\text{s}$ con un valor de 91.67 % mientras que, la máxima eficiencia alcanzada para un caudal de $0.0068 \text{ m}^3/\text{s}$ es de 85.71 %

Figura 3. Comportamiento de la eficiencia vs Temperatura del agua caliente para diversos flujos entrantes de agua caliente

Asimismo, se presenta el comportamiento del flujo másico de agua de aportación, el cual refleja la cantidad de agua que es retirada con el aire de enfriamiento, durante el paso del agua caliente por la torre de enfriamiento. Se demuestra que a mayor temperatura del agua caliente ingresante a la torre de enfriamiento se consigue una mayor cantidad de agua de aportación, alcanzando un mejor desempeño cuando el flujo másico de agua caliente es $0.0047 \text{ m}^3/\text{s}$. Del mismo modo, cuando el flujo de agua caliente se incrementa a un valor de $0.0068 \text{ m}^3/\text{s}$, el agua de aportación decrece con lo cual el proceso de enfriamiento es más ineficiente.

Figura 4. Comportamiento del flujo másico de agua de aportación vs Temperatura del agua caliente

Discusión

En el informe de tesis de Fernández, S. y Celestino, H (2017) los valores de rendimiento son mayores a medida que la relación L/G es menor incrementándose progresivamente en función a la temperatura del agua caliente, alcanzándose el máximo rendimiento a un valor de $50 \text{ }^\circ\text{C}$. En nuestra investigación se difiere con el anterior investigador con la diferencia de que se alcanza el máximo rendimiento a una temperatura de ingreso de agua de alimentación a $30 \text{ }^\circ\text{C}$ con un valor de 91.67% , pero con un valor de

L/G de 1.11, pero alcanza una eficiencia de 67.03% para un valor de L/G de 0.664, valor en el cual se demuestra que se necesita menos masa de aire en relación a la masa de agua caliente entrante.

Según Carias, A. (2010) manifiesta que el acercamiento y el rango son los parámetros más relevantes del proceso en la torre de enfriamiento e influyen en el rendimiento. Se coincide con el investigador en el sentido de que los valores de rango y acercamiento al ser valores pequeños permite alcanzar los mayores rendimientos en una torre de enfriamiento, así tenemos que para una máxima eficiencia de 91.67 % el rango es igual a 11 y el acercamiento igual a 1 para un aflujo másico de agua caliente entrante de 0.0047 m³/s, estos valores de rango y acercamiento se incrementan reduciéndose el valor del rendimiento del sistema de enfriamiento.

Se demuestra que la torre de enfriamiento alcanza un mejor desempeño cuando el flujo másico de agua caliente es el menor de los 4 valores analizados, en este caso 0.0047 m³/s, con eficiencias entre 91.67% a 67.83 %, en función a la temperatura de ingreso del agua caliente a la torre de enfriamiento, mientras que con un caudal de 0.0068 m³/s se tiene eficiencias del orden 85.71 % a 53.95 %.

Del mismo modo, se demuestra que teniendo un menor valor del acercamiento y del rango se consiguen mejores desempeños de la torre de enfriamiento, de tal modo que cuando se incrementa la temperatura del agua caliente de ingreso, entonces el rango y el acercamiento se incrementan con la consiguiente disminución de la eficiencia o rendimiento térmico de la torre de enfriamiento.

El flujo másico de agua de aportación aumenta cuando es menor el flujo másico de agua caliente entrante en la torre de enfriamiento, con el cual se consigue enfriar el agua y también de cierto modo la pérdida de agua se traduce en un incremento de la humedad relativa del aire caliente saliente de la torre de enfriamiento. Mientras que a mayores flujos de agua caliente se tiene un efecto contrario, más aún el flujo másico de agua de aportación se reduce, lo cual es un efecto de la reducción de la eficiencia o desempeño de la torre de enfriamiento debido a tener una mayor cantidad de caliente a enfriar.

Conclusiones

Se caracterizó los flujos experimentales para poder evaluar el desempeño de la torre de enfriamiento para lo cual se trabajaron con 4 flujos másicos de agua caliente y del mismo modo cada uno de los flujos se evaluó a temperaturas de 30, 40, 50, 60 y 70 °C.

Luego de realizado el balance de masa y energía en la torre de enfriamiento del laboratorio de generación termoeléctrica para el caso de un flujo de 0.0047 m³/s y una temperatura de ingreso del agua caliente a la torre de enfriamiento de 30 °C, se alcanzó un eficiencia de 91.67 % , con un flujo másico de aire necesario de 0.00421 m³/s de aire caliente a 30 °C y una humedad relativa de 58.6 % , alcanzo a la salida del proceso un aire caliente de mayor humedad relativa de 92.8 % , con flujo másico de agua de reposición igual a 0.324 m³/h.

Se elaboraron las curvas de comportamiento de los fluidos actuantes en la torre de enfriamiento, superponiendo los v4 flujos en análisis obteniéndose un mejor desempeño e indicadores, el flujo de caliente igual a de 0.00421 m³/s de agua caliente.

Los indicadores de desempeño de las torres de enfriamiento son mejores para el caso del flujo másico de agua caliente igual a 0.00421 m³/s, en el cual tanto el rango como el acercamiento alcanzan los menores valores.

Recomendaciones

Las mediciones de temperatura de bulbo húmedo y temperatura de bulbo seco deben realizarse de tal manera que no se produzcan errores en las lecturas de medición, teniendo en cuenta que las mediciones estuvieron cerca de puntos de difusión, salpicaduras de agua fría y caliente y en alturas. Para ello, es recomendable tomar las precauciones durante la medición de tal manera que no se presenten datos erróneos.

Es necesario una caracterización mensual de la operación de las torres de enfriamiento, debido a que los valores de TBH y TBS del aire varían mensualmente en función a las estaciones del año, es un trabajo

pendiente para la empresa, esto no se pudo realizar debido a que el periodo de evaluación fue solo de 6 meses.

Se recomienda la realización de trabajos de investigación comparativos entre torres de enfriamiento de tiro forzado y de tiro inducido, con diversos tipos de relleno. Del mismo modo, evaluar el efecto del tratamiento químico del agua.

Referencias

- Aguilar, H. (2017). *Diseño y optimización de una torre de enfriamiento de tiro inducido*. (Tesis para optar el título de Ingeniero Químico del Instituto Politécnico Superior de México). Recuperado de:
<https://tesis.ipn.mx/jspui/bitstream/123456789/24234/1/Tesis%20Dise%C3%B1o%20y%20optimizaci%C3%B3n%20de%20una%20torre%20de%20enfriamiento%20de%20tiro%20inducido..pdf>
- Alean, J, Gutiérrez: G, Chejne: F y Bastidas M. (2009). *Simulación de una Torre de Enfriamiento Mecánica Comparada con Curvas Experimentales*. Revista Scielo Inf. tecnol. v.20 n.3 La Serena. Recuperado de:
https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?pid=S0718-07642009000300003&script=sci_arttext&tlng=p
- Carias, A. (2010). *Análisis termodinámico y propuesta de mejora de eficiencia de torre de enfriamiento, en el área de cogeneración, ingenio Tululá*. (Tesis para optar el título de Ingeniero Mecánico en la Universidad San Carlos de Guatemala). Recuperado de:
http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_0637_M.pdf
- Celestino, S. y Fernández, H. (2017). *Rendimiento térmico de una torre de enfriamiento de tiro forzado en contracorriente*. (Tesis para optar el Título de Ingeniero Químico en la Universidad Nacional del Centro en Perú). Recuperado de:
<http://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/UNCP/3765/Celestino%20Porras-Fernandez%20Paucar.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Geankoplis, Christie. (2013). *Procesos de transporte y principios de separación*. 4ª Ed. México.: Editorial Pearson Educación. 982 pp. ISBN 9781292026022
- Guevara, R. (2020). Informe final de Investigación 2019 : Desempeño de una torre de enfriamiento del laboratorio de generación termoeléctrica de la Universidad Nacional del Santa. 89 pp.
- Hernández, D. y Villareal, R. (2008). *Evaluación del desempeño térmico de la torre de enfriamiento CT-502*. (Tesis para optar el título de Ingeniero Mecánico en la Universidad Autónoma de México). Recuperado de:
<http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/jspui/bitstream/132.248.52.100/8893/1/>
- Huaroc, D. y Quispe, E. (2016). *Análisis y comparación del rendimiento térmico de los rellenos de tipo película y por salpicadura de una torre de enfriamiento de tiro forzado*. Tesis para optar el Título de Ingeniero Químico en la Universidad Nacional del Centro en Perú). Recuperado de:
<http://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/UNCP/3755/Huaroc%20Daniel%20-Quispe%20Oncebay.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Lara, Leonardo. (2016) Ahorro de energía en torres de enfriamiento. Instituto Tecnológico de Zapotecas. México. Recuperado de:
<https://es.scribd.com/doc/226875362/Ahorro-de-Energia-en-Torres-de-Enfriamiento>
- Monsalvo, R. (2014). *Balances de materia y energía. Procesos industriales*. 1ª Ed. Grupo Editorial Patria. 400pp. ISBN 6074388954
- Obregón, L., Pertuz, J. y Domínguez, R. (2017). *Análisis del desempeño de una torre de enfriamiento a escala de laboratorio para diversos materiales de empaque, temperatura de entrada de agua y relación másica de flujo agua-aire*. Revista Prospectiva, Vol. 15, N° 1, 42-52. Recuperado de:
<http://www.scielo.org.co/pdf/prosp/v15n1/1692-8261-prosp-15-01-00042.pdf>
- Shapiro, H. y Moran, M. (2010). *Fundamentos de ingeniería termodinámica*. 7ª Ed. John Wiley Sons. 1024pp. ISBN 9780470495902