

Comportamiento de empaques en un módulo de torre de enfriamiento para un sistema de refrigeración

Javier Gago^{1,*}, Jamir Herrera², Raúl Palomino³, Nicolás Boujeat⁴, Yuri Hernández¹, Renzo Chan¹, Oscar Baltuano^{1,5}

¹ Instituto Peruano de Energía Nuclear, Dirección de Investigación y Desarrollo. Av. Canadá 1470, Lima 41, Perú.

² Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería, Av. Tupac Amaru 210, Lima 25, Perú.

³ Universidad Nacional Tecnológica de Lima Sur. Villa El Salvador. Lima 42, Perú

⁴ Université Paris-Sud IUT de Cachan. Paris, Francia.

⁵ Facultad de Ciencias Físicas, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Av. Venezuela S/N, Lima 1, Perú.

Resumen

En el presente estudio se determinó la tasa de transferencia de calor de un prototipo de torre de enfriamiento utilizando dos configuraciones de empaques diferentes: la primera usando una configuración con placas ordenadas y la segunda con una distribución de placas desordenadas. El análisis de la eficiencia de ambas configuraciones se realizó mediante un estudio teórico experimental. Para ello, se construyó un prototipo de torre de enfriamiento en pequeña escala buscando replicar, hasta donde fue posible, la distribución de los componentes de una de las torres de enfriamiento del reactor RP-10. Mediante el uso de un medidor de caudal, una red de sensores de temperatura distribuidos a lo largo del circuito de agua y una fuente de calor con temperatura controlada para elevar la temperatura del agua se determinó de forma experimental que un empaque ordenado mejora la transferencia de calor del sistema en un 10.62 % con respecto a un empaque desordenado. Los resultados obtenidos, por extensión, demuestran la conveniencia de utilizar empaques en una configuración ordenada en las torres de enfriamiento del reactor RP-10 mejorando la eficiencia de las mismas.

Palabras clave: Torres de refrigeración; Sistemas de refrigeración; Modelos; Transferencia de calor; Temperatura; Sensores

Packaging behavior in a cooling tower module for a cooling system

Abstract

In the present study, the heat transfer rate of a modification tower prototype was determined using two different packaging configurations: the first one using an ordered plate configuration and the second one with a messy plate distribution. The efficiency analysis of both configurations was carried out by means of an experimental theoretical study. For this, a small-scale cooling tower prototype was built seeking to replicate, as far as possible, the distribution of the components of one of the RP-10 reactor's cooling towers. Using a flowmeter, a network of temperature sensors distributed throughout the water circuit, and a temperature controlled heat source to raise the water temperature, an orderly packaging is experimentally determined to improve the transfer of system heat by 10.62 % over a messy package. The results obtained, by extension, show the convenience of using packing in an ordered configuration in the RP-10 reactor friction towers, improving their efficiency.

Keywords: Cooling towers; Cooling systems; Models; Heat transfer; Temperature; Sensors

1. Introducción

Una torre de enfriamiento cumple la función de reducir la temperatura del refrigerante, generalmente agua, en un proceso que genera

calor a gran escala. Cuando este componente tiene un mal funcionamiento o no se encuentra optimizado se produce una baja eficiencia de transferencia de calor y puede conllevar a un mal funcionamiento del proceso o el

* Correspondencia autor: jgago@ipen.gob.pe
ORCID iD <https://orcid.org/0000-0003-4236-3216>

incremento de los costos de operación. Con la finalidad de evaluar la eficiencia en el uso de dos configuraciones diferentes de los empaques usados en las torres de enfriamiento del reactor RP-10 se llevó a cabo este estudio en el cual de forma teórica y experimental se analizó la conveniencia de usar una configuración ordenada o desordenada de los empaques.

En un reactor nuclear el sistema de refrigeración permite que el calor generado en el núcleo del mismo, producto de la reacción nuclear, sea transferido al ambiente. En el caso del reactor RP-10 tiene un sistema primario compuesto por tanques de decaimiento, bombas centrífugas, intercambiadores de calor y un sistema secundario compuesto por intercambiadores de calor (entre el sistema primario y secundario), bombas centrífugas y tres torres de enfriamiento [1].

Las torres de enfriamiento del reactor RP-10 son del tipo “tiro mecánico inducido de flujo cruzado” [1,2] y se caracterizan porque el ventilador va situado en la parte superior, para extraer el aire uniformemente a lo largo de las paredes de la torre. En esta sección, el aire frío ascendente se encuentra a contracorriente con el flujo de agua ($1.2 \text{ m}^3/\text{h}$) que cae desde la parte superior a 0.10 m del ventilador e intercambian calor dentro de las cavidades de los empaques. Generalmente, debido a la alta velocidad de descarga, suele presentar pérdidas de agua por gotas que son arrastradas por la corriente de aire y que escapan fuera de la estructura de la torre.

2. Experimental

El desarrollo de este trabajo se ha realizado en dos etapas complementarias. En la primera etapa se ha diseñado y construido un prototipo pequeño de una torre de enfriamiento buscando, en lo posible, replicar los componentes de mayor tamaño utilizados en las torres de enfriamiento del reactor RP-10. Cabe resaltar, que debido a la complejidad de replicar en pequeño tamaño cada uno de los componentes, éste no es un modelo a escala sino un prototipo pequeño en el cual se ha realizado el estudio de la influencia del tipo de empaque utilizado en la capacidad de transferencia de calor del sistema de forma experimental. En una segunda etapa se ha realizado un modelamiento y estudio teórico de las variables físicas involucradas y su posterior

correlación con las mediciones obtenidas en el prototipo.

2.1 Prototipo construido

En la Figura 1 se muestra un esquema con las principales partes que conforman el prototipo de torre de enfriamiento que ha sido construido y evaluado. El punto de inicio de diseño del prototipo ha sido el tamaño del empaque que se fijó en 0.027 m^3 . Los demás componentes han sido adecuados al tamaño de este empaque, el cual puede ser retirado y reemplazado fácilmente con la finalidad de cambiar únicamente esta variable física durante el estudio.

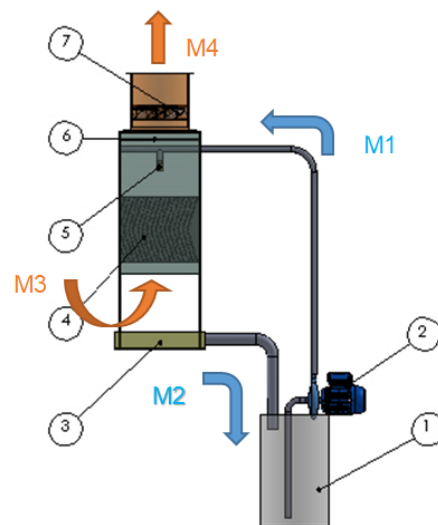


Figura 1. Esquema de la estructura del prototipo construido: (1) tanque de almacenamiento de agua (calentado por una resistencia eléctrica), (2) bomba de circulación. (3) recipiente almacenamiento de descarga de agua, (4) empaque, (5) tobera, (6) atrapa gotas, (7) extractor de aire. M1 representa el ingreso de agua caliente y M2 la salida de agua fría. M3 representa la entrada de aire frío y M4 la dirección de salida del aire caliente.

El circuito de circulación de agua es accionado por una bomba de $\frac{1}{2}$ HP desde el tanque de almacenamiento de agua caliente hasta la tobera de salida en la parte superior de la torre. El resto del circuito se completa a través de la caída de agua por gravedad. La tobera a escala fue diseñada y construida utilizando tecnología de fabricación aditiva (Impresión 3D), esta permite dispersar el agua uniformemente sobre toda la sección del empaque y en gotas pequeñas para una mejor transferencia de calor. El ventilador extractor de aire está ubicado en la parte superior y se encarga de direccionar el flujo de aire a contracorriente

con el sentido de recorrido de agua según el diseño de tiro mecánico inducido de flujo cruzado. El empaque cumple la función de retardar la caída las gotas de agua con la finalidad que permanezcan el mayor tiempo posible en contacto con el aire frío y lograr que se transfiera la mayor cantidad de calor. Para el

estudio de la influencia del empaque en la transferencia de calor, se construyeron dos bloques de empaque. Uno de ellos con una geometría de distribución uniforme y homogénea en sus láminas internas y el segundo en una distribución desordenada (Figura 2).

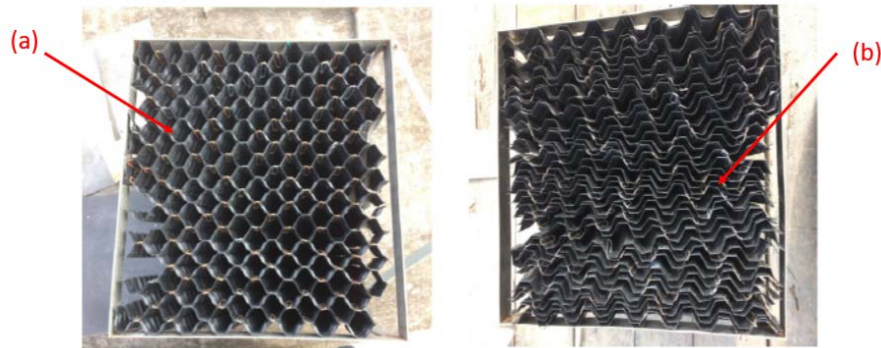


Figura 2. Preparación de los empaques: (a) con láminas ordenadas en una distribución homogénea y (b) con láminas puestas en forma desordenada.

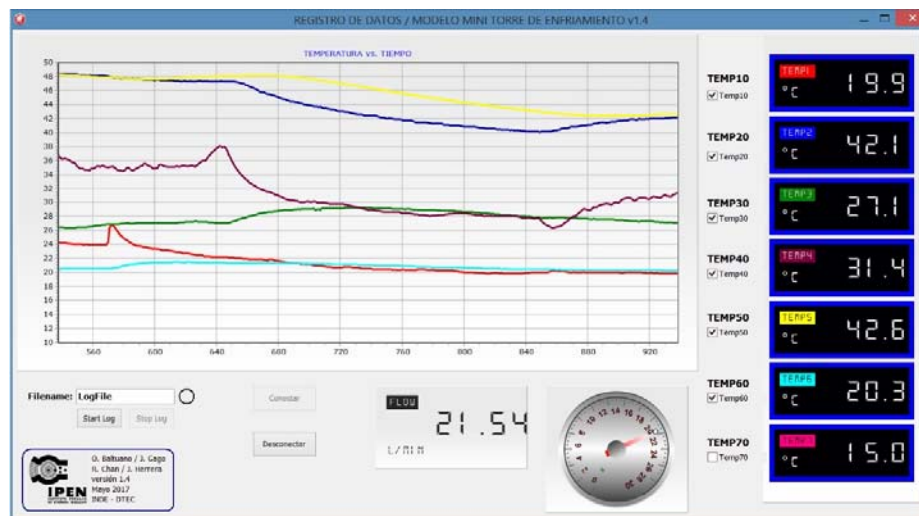


Figura 3. Captura de pantalla del software de adquisición de datos que fue desarrollado para las mediciones experimentales.

Durante la puesta en operación del prototipo se realizaron mediciones de diferentes parámetros del mismo a intervalos de tiempo regulares. Para ello, fue necesario implementar y ensamblar con el prototipo una red de 6 sensores de temperatura digitales DS18B20, un medidor de flujo de agua YF-S201, un calefactor con control de temperatura y un sensor PT100 para ajustar la temperatura del tanque de agua, con el objeto de simular la elevación de temperatura del núcleo del reactor. Todo el proceso de control y adquisición de datos se realizó utilizando una tarjeta Arduino UNO y un software de

adquisición de datos escrito, específicamente para esta aplicación, en Delphi XE7 usando controles gráficos TeeChart (Figura 3).

2.2 Mediciones durante la puesta en operación

Las mediciones realizadas durante la puesta en operación del prototipo permitieron determinar la eficiencia de transferencia de calor para las dos configuraciones de empaque. El agua previamente calentada hasta los 47.5 °C en el tanque de agua mediante el calefactor es hecha circular hacia el empaque, lo que produce la disminución de la temperatura de la misma al

ponerse en contacto con el flujo de aire circulando dentro del empaque a la temperatura ambiente de 20 °C. En la región del empaque se establecen dos mecanismos de transferencia de calor: el primero, la transferencia de calor sensible del agua hacia el aire y la segunda por

la evaporación del agua hacia al flujo de aire [3]. En la Figura 4 puede observarse una imagen de la disposición y ensamblaje de cada una de las etapas del prototipo de la torre de enfriamiento y la posición en la cual fueron instalados algunos de los sensores.

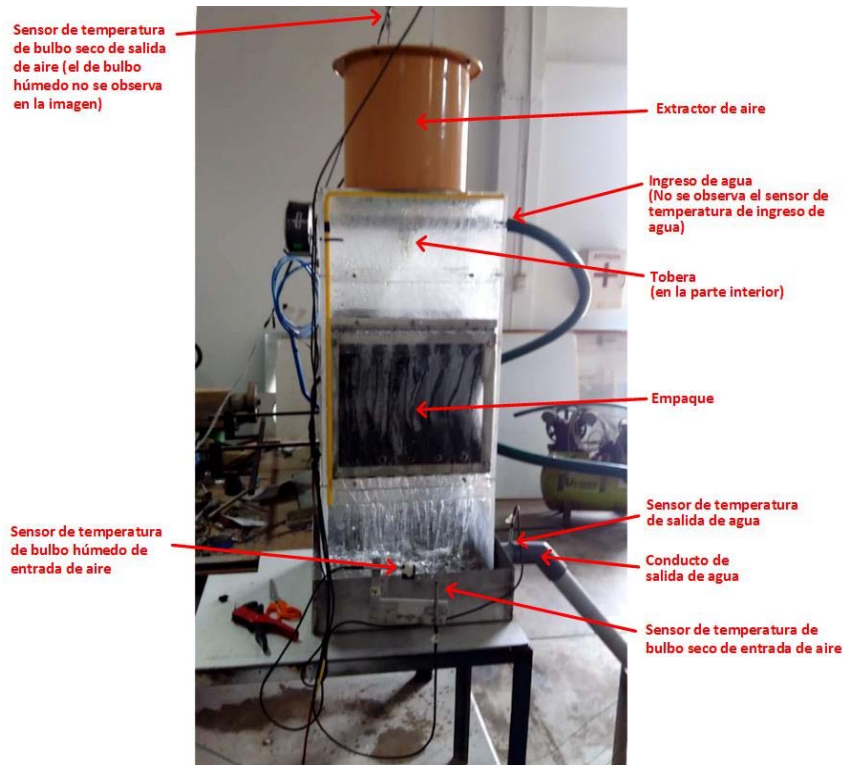


Figura 4. Prototipo de torre de enfriamiento ensamblada.

Tabla 1: Valores obtenidos para cada uno de sensores en diferentes configuraciones de empaques.

<i>Sensor</i>			<i>Empaque ordenado</i>	<i>Empaque desordenado</i>
Temperatura de ingreso de agua	T_{L1}	°C	47.56	47.02
Temperatura de salida del agua	T_{L2}	°C	43.59	43.6
Temperatura bulbo húmedo de ingreso de aire	T_{bh1}	°C	20.47	19.06
Temperatura bulbo seco de entrada de aire	T_{bs1}	°C	21.28	19.85
Temperatura de salida del aire	T_{a2}	°C	34.74	34.2
Caudal de agua	C	m ³ /h	1.2	1.26

En tiempo real se registraron todas las variables listadas en la Tabla 1 durante un período de 10 minutos. Luego, se observó la estabilización de las lecturas y los valores obtenidos en ese instante fueron utilizados como valores de entrada para el cálculo de los

valores teóricos. La Tabla 1 muestra las lecturas obtenidas en cada sensor luego del periodo de estabilización para ambas configuraciones de empaques utilizadas (en el caso de los sensores de temperatura de salida de aire, debido a que éste se encuentra saturado

se consideraron las mismas lecturas para ambos, por lo cual sólo se tomó en cuenta la lectura de uno de ellos).

2.3 Calor transferido por el agua

El calor transferido por la masa del agua que recorre en la torre es absorbido por la masa de aire que circula en sentido contrario, estudio desarrollado [2,3] establece el balance de energía en la siguiente ecuación:

$$L \cdot C_L (T_2 - T_1) = G (H_{G2} - H_{G1}) \dots (1)$$

Donde:

L : Flujo másico de agua (kg/s)
 C_L : Calor específico del agua (4.186 kJ/kg °C)
 Q : Calor (kJ/s)
 G : Flujo másico de aire (kg/s)
 H_{G1} : Entalpia de entrada de la mezcla aire – vapor a T_{bh1} , (kJ/kg)
 H_{G2} : Entalpia de salida de la mezcla aire – vapor a T_{a2} , (kJ/kg)

Con los registros del caudal y temperatura del agua a su ingreso al prototipo (Tabla 1) se determinó la densidad del agua ($d_{\text{agua}}=988.92 \text{ kg/m}^3$) en el empaque ordenado, también para el empaque desordenado se obtuvo una densidad $d_{\text{agua}}=989.36 \text{ kg/m}^3$. Las densidades del agua varían en función de la temperatura [4]; por lo tanto, el flujo másico de agua (L) es el producto de la densidad del agua (d_{agua}) por el caudal (C), obteniéndose:

$$L_{\text{ordenado}} = 0.33 \text{ kg/s} \dots (2)$$

$$L_{\text{desordenado}} = 0.35 \text{ kg/s} \dots (3)$$

Reemplazando estos valores en la ecuación (1) con los datos de la tabla 1 se obtiene el calor transferido para cada caso:

$$Q_{\text{ordenado}} = 5.48 \text{ kW} \dots (4)$$

$$Q_{\text{desordenado}} = 4.98 \text{ kW} \dots (5)$$

Para aplicación de la ecuación (1) se consideró que el proceso de transferencia de calor en la torre de enfriamiento es adiabático, que no hay pérdidas de calor hacia las paredes del prototipo [5] además las pérdidas de agua por arrastre no se consideran significativas en el cálculo.

2.4 Cálculo de la humedad absoluta del aire que ingresa

En la Tabla 1 se muestra los valores de temperatura de bulbo seco y húmedo correspondiente al ingreso del aire al prototipo para determinar la humedad absoluta “ Y ”,

mediante la carta psicrométrica, para nuestro caso se usó carta psicrométrica interactiva [6] y se puede comparar con otra referencia impresa [7] que difieren en un orden de 3 a 4 unidades. En los datos obtenidos se considera una presión atmosférica de 1 Bar.

$$Y'_{1\text{ordenado}} = 0.0148 \text{ kg de vapor de agua/kg de aire seco} \dots (6)$$

$$Y'_{1\text{desordenado}} = 0.0135 \text{ kg de vapor de agua/kg de aire seco} \dots (7)$$

2.5 Entalpia de ingreso del aire

La entalpia total del aire húmedo es igual a la suma de la entalpia del aire seco más la entalpia de vapor de agua [3]. La entalpia del aire seco se denomina también “calor sensible” del aire y a la entalpia del vapor de agua contenido en la mezcla es multiplicada por la cantidad de vapor total del vapor de agua o “calor latente”. La entalpia total de ingreso de aire se representa por la siguiente ecuación.

$$H = (1005 + 1884 \cdot Y) \cdot t + 2502300 \cdot Y \dots (8)$$

Donde:

H : Entalpia (J/kg)

t : temperatura (°C)

$$H'_{1\text{ordenado}} = 54.24 \text{ kJ/kg} \dots (9)$$

$$H'_{1\text{desordenado}} = 58.99 \text{ kJ/kg} \dots (10)$$

2.6 Humedad y entalpia de la salida del aire Y'_2

Se considera que la salida de aire del prototipo está totalmente saturada por humedad; por lo tanto, con los valores correspondientes a la temperatura de salida obtenidos en la tabla 1 se procede a determinar la humedad absoluta Y'_2 en la carta psicrométrica [6].

$$Y'_{2\text{ordenado}} = 0.0359 \text{ g humedad/kg aire seco} \dots (11)$$

$$Y'_{2\text{desordenado}} = 0.0349 \text{ g humedad/kg aire seco} \dots (12)$$

Los datos obtenidos en las ecuaciones (12) y (13) de humedad absoluta de la salida del aire se reemplazan en la ecuación (9):

$$H'_{2\text{ordenado}} = 127.33 \text{ kJ/kg} \dots (13)$$

$$H'_{2\text{desordenado}} = 123.88 \text{ kJ/kg} \dots (14)$$

2.7 Determinación de la tasa transferencia de masa

La tasa de transferencia de masa es el indicador de los cambios de estado del agua (de líquido a

gaseoso) [2, 8] que se produce en el empaque del prototipo. Este factor está asociado al proceso de transferencia de calor, estudio desarrollado por Merkel (1925) y se expresa en la siguiente ecuación:

$$K_{ya} = \frac{L}{Z \cdot A} \int_{T_{L1}}^{T_{L2}} \frac{C_p \cdot dT_L}{H^* - H'} \dots (15)$$

Donde:

K_{ya} : Tasa de Transferencia de masa ($\text{kg}/\text{h} \cdot \text{m}^3$)

L: Flujo másico de agua (kg/h)

Z: Altura del empaque (m)

A: Área Transversal del empaque (m^2)

T_{L1} , T_{L2} : Temperatura de ingreso y salida del agua respectivamente (K)

C_p : Calor específico del agua ($\text{KJ}/\text{kg} \cdot \text{K}$)

H^* : Entalpia de saturación del aire (KJ/kg)

H' : Entalpia del aire (KJ/kg)

$$K_{ya \text{ ordenado}} = 5557 \frac{\text{kg de agua}}{\text{h} \cdot \text{m}^3} \dots (16)$$

$$K_{ya \text{ desordenado}} = 5051 \frac{\text{kg de agua}}{\text{h} \cdot \text{m}^3} \dots (17)$$

3. Resultados y discusión

Mediante los cálculos teóricos realizados determinamos que la tasa de transferencia de masa del empaque ordenado es mayor al del empaque desordenado en un 10 % considerando todas las variables constantes. A partir de este resultado se hace evidente la influencia que tiene la forma o disposición geométrica de los empaques en el proceso de transferencia de calor (energía) para reducir la temperatura del agua.

Nuestro hallazgo también queda reafirmado con los resultados de mediciones experimentales, como se puede observar en la Figura 5, en donde se muestra la variación en el tiempo del gradiente de temperatura que existe entre la temperatura de entrada y salida del agua en el prototipo de la torre de enfriamiento. En este gráfico se observa desde el inicio un gradiente de temperatura mayor en el empaque ordenado que llega a tener un máximo de más de 4 °C, respecto al empaque desordenado que muestra un máximo de algo más de 3.5 °C después de unos minutos de iniciado la prueba.

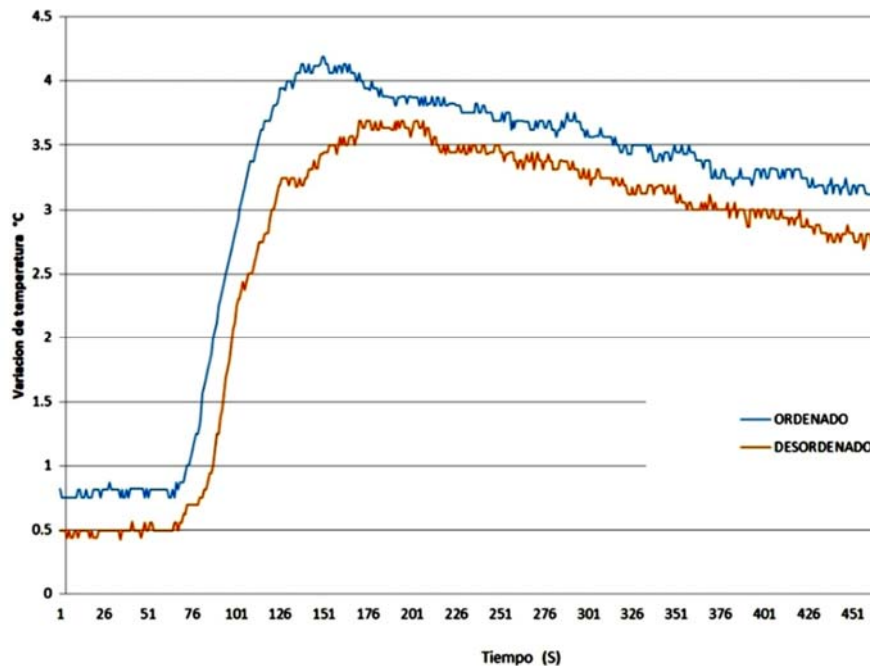


Figura 5. Variación de los gradientes de temperatura durante el experimento, utilizando los dos tipos de empaques estudiados.

Para el proceso de medición, primero se realizó el calentamiento del agua contenida en el tanque utilizando el calefactor controlado hasta alcanzar una temperatura de 47.5 °C aproximadamente. Luego, se puso a funcionar

la bomba de circulación de agua y se inició la medición de todos los sensores, tal como se muestra en la Figura 5. Durante el tiempo de medición el empaque ordenado mantuvo un gradiente de temperatura mayor que el

empaquete desordenado. Durante los primeros 70 segundos de medición se mantuvo el extractor de aire apagado, observándose que el empaque ordenado mantuvo un gradiente constante de 0.8 °C, en tanto el empaque desordenado se mantuvo en 0.5 °C. Como era de esperarse al encender el extractor de aire el gradiente de temperatura entre la salida y la entrada aumentó en ambos casos, pero siempre el empaque ordenado tuvo un valor mayor, llegando a un máximo de 4.1 °C para el primero mientras que el máximo gradiente para el empaque desordenado llegó a un máximo de 3.65 °C aproximadamente entre 2.5 y 3 minutos después de iniciada las mediciones. Luego de este máximo el gradiente de temperatura para ambos empaques, así como las temperaturas de entrada y salida empiezan a disminuir e igualarse como consecuencia de la imposibilidad de mantener la temperatura inicial del agua de 47.5 °C a través del calefactor, debido al proceso de extracción de calor de la torre de enfriamiento.

4. Conclusiones

Las mediciones realizadas en el prototipo corroboran una mejor eficiencia de transferencia de calor del empaque ordenado respecto al desordenado. Esta condición podría deberse al flujo inequitativo del aire a través de la geometría desordenada del empaque. Otras investigaciones [9] sobre este tema también señalan la importancia del diseño de la geometría y los materiales para determinar la máxima eficiencia del empaque.

Los cálculos realizados nos permiten concluir que la carga de calor transferida en el empaque ordenado es mayor en un 10.62 % respecto al empaque desordenado en el intervalo de mayor transferencia. Igualmente, la tasa de transferencia de masa en el empaque ordenado tiene un valor mayor en un 10 % aproximadamente respecto al empaque desordenado.

Aunque una diferencia de 10.62 % en la eficiencia de transferencia de calor obtenido en el ensayo con el prototipo pareciera ser pequeña, debe tenerse en cuenta que este valor se vuelve más significativo si el volumen de agua del sistema es mayor, como por ejemplo en un equipo a escala industrial o en un reactor nuclear. Debido a las limitaciones de materiales en este estudio se construyó un prototipo en el que el volumen total de agua fue de solo 30 litros. Aunque no es posible

determinar cuantitativamente cual sería la mejora de la eficiencia en un sistema a mayor escala, si es posible inferir que cualitativamente la mejor eficiencia del empaque ordenado para volúmenes de mayor agua representaría un ahorro significativo de energía y como consecuencia un costo menor de operación en las mismas condiciones.

Este trabajo podría proporcionar la justificación necesaria para realizar estudios a mayor escala en las torres de enfriamiento del reactor RP-10, que actualmente tiene los empaques o rellenos ensamblados en una configuración desordenada y esto podría representar una reducción significativa de la eficiencia de transferencia de calor y por tanto una menor capacidad de enfriamiento del núcleo del reactor en las mismas condiciones.

5. Bibliografía

- [1]. Comisión Nacional de Energía Atómica. Informe especial: Centro Nuclear de Investigaciones del Perú. Revista Argentina Nuclear. 1988; 16: 13-42.
- [2]. Kern DQ. Procesos de transferencia de calor. México: Ed. Continental; 1999.
- [3]. Páucar Cuba KM, Vivas Cuellar MC. Diseño y construcción de una torre de enfriamiento de tiro inducido con flujo en contracorriente [Título Profesional]. Universidad Nacional de Ingeniería. Facultad de Ingeniería Química y Textil; 1999.
- [4]. Ponce Ochoa E. Diseño de un tren de potabilización para una planta generadora de agua embotellada [Tesis Licenciatura. Ingeniería Civil.]. Universidad de las Américas Puebla. Departamento de Ingeniería Civil; 2005.
- [5]. Jimeno Tejeda IJ, Olmos Ruíz CA. Estudio y cálculo para la selección de una torre de enfriamiento en la compañía colombiana de Clinker S.A (COLCLINKER) [Tesis Título Ingeniero Mecánico]. Corporación Universitaria Tecnológica de Bolívar. Facultad de Ingeniería Mecánica; 1999.
- [6]. Dto. de Máquinas y Motores Térmico. Cálculos Psicrométricos [Internet]. Disponible en: <http://www.sc.ehu.es/nmwmigaj/CartaPsy.htm>
- [7]. Burghardt MD. Ingeniería termodinámica. 2da. Edición. México: Editorial Harla; 1984.
- [8]. Villa Jadán SF. Determinación de correlaciones para tasa global de transferencia de calor y caída de presión en un determinado

relleno de torre de enfriamiento utilizando un equipo experimental [Tesis Título Ingeniero Mecánico]. Escuela Superior Politécnica del Litoral. Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción; 2008.

[9]. Obregón LG, Pertuz JC, Domínguez RA. Performance analysis of a laboratory scale cooling tower for different packing materials, water inlet temperature and mass flow ratio water-air. *Prospectiva*. 2017; 15(1):42-52.