

Avances

Centro de Información y Gestión Tecnológica

Cálculo de los parámetros de funcionamiento para la selección de una torre de enfriamiento

Calculation of the operation parameters for the selection of cooling tower

Tania María Pérez Sanjudo¹, Youry Rodríguez Montano¹, Daniel Regalado Nuñez²

¹Ingeniero Mecánico, profesor Instructor de la Universidad de Pinar del Río. Facultad de Ciencias Técnicas. Departamento de Mecánica. Calle Martí 270 final, Pinar del Río, Cuba. CP 20100. Teléfono: +53 (48) 728618, taniap@upr.edu.cu; ID: <https://orcid.org/0000-0001-8250-2140>
youry@upr.edu.cu ; ID: <https://orcid.org/0000-0002-0909-8652>

²Máster en Eficiencia Energética, profesor Instructor de la Universidad de Pinar del Río. Facultad de Ciencias Técnicas. Departamento Mecánica, Pinar del Río, Cuba, danielreg@upr.edu.cu ; ID: <https://orcid.org/0000-0001-6746-3796>

Para citar este artículo / to reference this article / para citar este artigo

Pérez, T.M., Rodríguez, Y. & Regalado, D. (2018). Cálculo de los parámetros de funcionamiento para la selección de una torre de enfriamiento. *Avances*, 20(4), 485-496. Recuperado de <http://www.ciget.pinar.cu/ojs/index.php/publicaciones/article/view/399/1385>

RESUMEN

La torre instalada en la Empresa de Productos Lácteos y Confiterías de Pinar del Río, no alcanza las

temperaturas de enfriamiento que se requieren en el proceso, por lo que se propone el cálculo para la selección de los parámetros de funcionamiento y

lograr así la selección de una nueva, que garantice la extracción de calor a los equipos de la línea de producción de helados de dicha empresa. Basándose en la teoría del potencial entálpico de Merkel y el método del 60% de eficacia, se obtuvo la potencia del ventilador, el flujo de agua que tiene que mover y las dimensiones de la torre que logró disipar la cantidad de calor que producen los equipos y mantenerlos en la temperatura de trabajo adecuada, como resultado de una buena transferencia de calor.

Palabras clave: torre, refrigeración, eficiencia, gestión.

ABSTRACT

The tower installed in the Company of Dairy Products and Confectionery of

Pinar del Rio, does not reach the cooling temperatures that are required in the process, so it is proposed the calculation for the selection of the operating parameters and achieve the selection of a new one, that guarantees the extraction of heat to the equipment of the ice cream production line of said company. Based on the theory of the enthalpic potential described by Merkel and the method of 60 % of effectiveness, this resulted in the power of the fan, the flow of water that has to move and the dimensions of the tower that manage to dissipate the amount of heat they produce. The equipment and keep them at the proper working temperature because of a good transfer of heat.

Keywords: tower, cooling, efficiency, management.

INTRODUCCIÓN

En los grandes procesos químicos de la industria se generan enormes cantidades de calor que debe ser removido para que todas las unidades operen eficientemente. Los equipos de transferencia de calor más comúnmente utilizados son los intercambiadores de calor y

condensadores. Muchas compañías requieren tener procesos eficientes en cuanto al costo razón por la cual gran cantidad del agua que se usa en muchos intercambiadores de calor para refrigerar es recirculada y reutilizada. Para lograr esto una de las formas más prácticas y económicas es mediante el uso de torres de enfriamiento empacadas, ya que

ofrecen ventajas importantes por la transferencia simultánea de calor y masa debida a que el contacto entre los fluidos es directo.

Según Obregón, Pertuz, Domínguez (2017) una ventaja que tienen las torres de enfriamiento sobre los intercambiadores de calor comunes es la gran cantidad de agua que manejan debido a que pueden tratar toda el agua de una planta entera mientras que los intercambiadores comunes son utilizados para equipos simples. Además se desarrolla rápidamente en su estructura, tipo, autocontrol y materiales.

El agua de enfriamiento a alta temperatura se rocía uniformemente desde la parte superior y fluye hacia la parte inferior de la torre de enfriamiento, forma una película de agua en la superficie del relleno según (Nailing, Liu; Lixia, Zhang; Xiangqin, Jia; 2017) y el aire ingresa a la torre de enfriamiento desde el fondo, intercambiando calor y masa en el relleno interior con película de agua.

Según Obregón, Pertuz, Domínguez (2017) el resultado de la transferencia de calor y masa es el valor de entalpía del aire que aumenta absorbiendo calor y masa, el agua de refrigeración se enfría por disipación de calor. El aire caliente y húmedo se descarga fuera de la torre de enfriamiento por efecto del ventilador de flujo axial. El

agua de refrigeración fluye al dispositivo de enfriamiento, absorbiendo el calor para mantener el proceso en marcha.

Merkel con su trabajo *Zeitschrift des Verdines Deutscher Ingenieure* expuesto en el año 1925, estructuró la teoría básica de las torres de enfriamiento según Alean, Gutiérrez, Chejne, Marlon, Bastidas (2009) el método implementado por él se usa actualmente para determinar la eficiencia de la torre, teniendo en cuenta también lo planteado por Jianlin, Cheng; Nianpin, Li; Kuan, Wang (2015) quienes exponen que los parámetros meteorológicos que influyen positivamente o negativamente en la tasa de flujo de agua, la velocidad del viento, el llenado y otros factores que afectan el rendimiento de enfriamiento.

En Pinar del Río, la Empresa de Productos Lácteos y Confitería es de tipo estatal. Tiene como misión, producir y proveer al sistema de distribución mayorista productos normados (leche, yogur, lactosoy) y a la red de comercialización en divisas, así como garantizar la merienda escolar a las secundarias básicas para satisfacer necesidades alimentarias. La empresa es una entidad rentable, con excelentes vínculos contractuales, que eleva su imagen corporativa, orientada al cliente por medio del ofrecimiento de sus producciones de

altos niveles competitivos que garantizan incrementos nutricionales a la población y posee tecnología aprobada sin productos a granel.

El proceso de producción de helado es altamente consumidor de energía por las etapas de enfriamiento. Si junto a esto, se considera que dichas instalaciones tienen varios años de explotación y por lo general baja eficiencia energética y un incremento en los indicadores de consumo, es evidente la necesidad de buscar mejores condiciones de operación que reduzcan los costos (Sariego, García, Pérez, Rodríguez, 2017).

La torre de enfriamiento instalada en la fábrica específicamente en la UEB Primavera, encargada de la producción de helados, tiene la tarea de enfriar los condensadores del banco de agua de helado y los congeladores, pero no cumple con las necesidades para las que está instalada; el buen funcionamiento de esos equipos se deriva del mantenimiento de una temperatura de trabajo adecuada, debido a esto, se tiene como objetivo calcular los parámetros necesarios para que cumpla con los requerimientos de dichos equipos, es decir que la temperatura de entrada a ellos sea constante y por debajo de los 40 °C.

MATERIALES Y METODOS

Los datos iniciales para el cálculo de la torre de enfriamiento se muestran a continuación:

- Temperatura del agua a la entrada de la torre $t_{L2} = 34$ °C
- Temperatura de bulbo seco $t_{bs} = 30$ °C
- Temperatura de bulbo húmedo $t_{bh} = 23$ °C
- Potencia térmica a disipar en la torre $Q = 110$ kW
- Presión manométrica del agua $P_{\text{Magua}} = 18,02$ kPa
- Presión manométrica del aire $P_{\text{Maire}} = 29$ kPa
- Calor latente de vaporización medio del agua $cv = 2\ 550$ kJ/kg

Elección del tipo de torre.

Como primera elección se debe escoger si la torre será de tiro natural o mecánico, al hacer esta elección se debe analizar si será de tiro forzado o de tiro inducido y se escogerá también si el flujo es cruzado o a contracorrientes.

Para este cálculo se necesita conocer los valores de las variables mostradas en el esquema de circulación de los fluidos de la *figura*

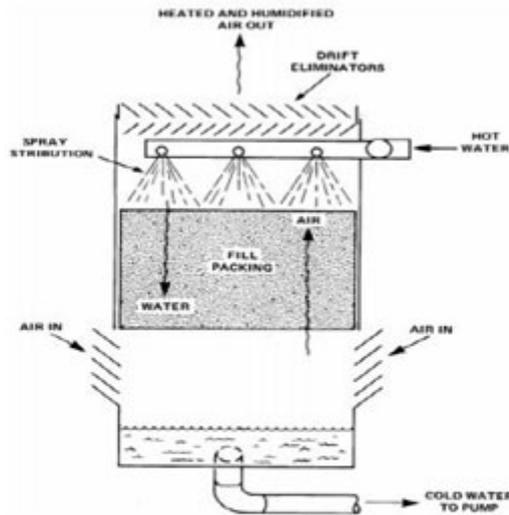


Figura. Esquema de circulación de la torre de enfriamiento.

Fuente: (Guanhong, Zhang; Suoying, Hea; Zhiyu, Zhanga; Yi, Xua; Rui, Wanga 2017)

Selección de la aproximación de la temperatura de salida del agua.

Para realizar esta selección se utiliza el Método del 60% de eficacia referenciado por Kaijun, Dong; Pingjie, Lia; Zhilin, Huang; Lin, Sua; Qin, Suna (2017), el flujo de agua caliente proviene del condensador debe llegar a una temperatura t_{L2} conocida la cual se debe enfriar hasta una temperatura t_{L1} aproximada:

$$E = (t_{L2} - t_{L1}) / (t_{L2} - t_{bh}) \quad (1)$$

Donde:

E: Eficiencia de las torres de enfriamiento (%)

t_{L1} : Temperatura del agua a la salida de la torre en °C.

Despejando t_{L1} se tiene que:

$$t_{L1} = t_{L2} E + (t_{L2} - t_{bh}) \quad (2)$$

Cálculo del flujo másico o caudal de agua necesario.

Para calcular el flujo másico L se usa la ecuación del calor:

$$Q = L + c_{pa} (t_L) \quad (3)$$

Despejando L se tiene que:

$$L = Q / (c_{pa} (t_L)) \quad (4)$$

Donde:

Q: Potencia térmica a disipar en kW.

c_{pa} : Calor específico del agua en kJ/kg K

t_L : Diferencia entre las temperaturas de entrada y salida del agua a la torre en °C.

Cálculo de parámetros para la selección de una torre de enfriamiento

Cálculo de la presión parcial de la mezcla aire vapor saturado.

Se calcula por la siguiente expresión llamada ecuación de Antoine.

$$P_{\text{sat}} = e^{(A/B + t_L + C)} \quad (5)$$

Donde:

t_L : Temperatura del líquido en °C

A, B y C son constantes de Antoine cuyos valores son: A = 16,3872, B = 3885,7 y

$$C = 230,17$$

Cálculo de humedad absoluta de saturación.

Se puede obtener por la expresión que se muestra a continuación

$$w_{\text{sat}} = (P_{\text{Magua}} \gg P_{\text{sat}}) / (P_{\text{Maire}} \gg (101,325 - P_{\text{sat}})) \quad (6)$$

Cálculo de la entalpía de la mezcla saturada aire-vapor.

Se calcula esta entalpía para cada punto del intervalo de enfriamiento usando los valores de humedad absoluta de saturación calculados anteriormente usando:

$$H^* = (C_{\text{paire}} + C_{\text{pvapor}} \gg w_{\text{sat}})(t_L - t_o) + \ddot{e}_o \gg w_{\text{sat}} \quad (7)$$

Donde:

t_o : Temperatura de referencia = 0 °C

C_{paire} : Calor específico del aire

C_{pvapor} : Calor específico del vapor

Los valores de los calores específicos se toman de (Calzada, 2012)

Cálculo de la presión parcial del aire húmedo.

Se calcula por la ecuación de Antoine, utilizando la temperatura de bulbo húmedo t_{bh} .

$$P_{ah} = e^{(A/(B/(C + t_{bh})))} \quad (8)$$

Cálculo de la humedad absoluta del aire húmedo.

$$w_{ah} = (P_{\text{Magua}} \gg P_{\text{sat}}) / (P_{\text{Maire}} \gg (101,325 - P_{\text{sat}})) \quad (9)$$

Cálculo de la humedad absoluta del aire.

$$w_{ah} = ((w_{ah} \gg \ddot{e}_o) - C_{\text{paire}}(t_{bs} - t_{bh})) / (\ddot{e}_o + C_{\text{pvapor}}(t_{bs} - t_{bh})) \quad (10)$$

Cálculo del área de la sección transversal de la torre.

Para calcular el área de la sección transversal de la torre (m^2) es necesario obtener el flujo específico L' ($kg/s \gg m^2$), L' está en función del rango de enfriamiento ($t_{L2} - t_{L1}$) y la temperatura de bulbo húmedo t_{bh} . Una vez determinado el flujo específico y con el valor de flujo másico de agua

que circula por la torre L (kg/s), el área de la sección transversal de la torre se calcula con la siguiente expresión:

$$A = L / L' \quad (12)$$

Determinación de la altura de la zona empaquetada y total de la torre.

La ecuación característica para una torre de enfriamiento establecida por Merkel, el cual se basa en una serie de asunciones para reducir la solución a un cálculo simple, referenciado en Alean, Gutiérrez, Chejne, Marlon, Bastidas (2009). Esta relaciona la fuerza impulsora o gradiente que favorece la transferencia de calor del vapor agua en el aire con el coeficiente de transferencia característico del tipo de relleno:

$$(K_{ya} + z) / L' = \int_{t_1}^{t_2} (dt_L / (H^* - H)) \quad (13)$$

Donde:

K_{ya} : Coeficiente de transferencia de calor.

z : Altura de la zona empaquetada en m.

Para obtener la altura total se usa en lugar del flujo específico el flujo total.

Se selecciona para este tipo de torre un relleno fílmico de PVC de arreglo

hexagonal tipo colmena debido a su amplio uso en los diseños actuales de estas torres.

El coeficiente de transferencia de calor se calcula según el tipo de relleno por la siguiente expresión:

$$K_{ya} = 0,35 L'^{0,45} (Gs.min)^{0,6} \quad (14)$$

Cálculo de la cantidad de agua evaporada.

$$Ae = Q / cv \quad (15)$$

cv : Calor latente de vaporización medio (estimado) del agua en kJ/kg.

Cálculo de los ciclos de concentración

Los parámetros recomendables de calidad del agua de recirculación en torres de enfriamiento son obtenidos en (Idae, 2007)

Se observa que, en este caso, la relación determinante es la de los sólidos disueltos,

$$Cc = (\# \text{ de sólidos disueltos en el agua de recirculación}) / (\# \text{ de sólidos disueltos en el agua de aportación}) \quad (16)$$

Cálculo del caudal de arrastre.

$$Var = L \cdot \text{eficiencia del separador de gotas} \quad (17)$$

Cálculo de parámetros para la selección de una torre de enfriamiento

Considerando un separador de gotas de alta eficiencia, de calidad media = 0,01% de agua recirculada.

Cálculo del caudal de purga.

La cantidad de agua a purgar o sangrado para este equipo se determina por la ecuación siguiente:

$$V_p = (A_e + V_{ar}) / (C_c - 1) \quad (18)$$

Donde:

V_p : Volumen de agua a evacuar con la purga en kg/s.

A_e : Volumen de agua evaporada en kg/s.

V_{ar} : Volumen de agua perdida por arrastres en kg/s.

Cálculo del caudal de agua de compensación (consumo total).

El consumo total de agua: $M = V_{ar} + A_e + V_p$ (19)

Cálculo de los parámetros fundamentales para la selección del ventilador.

Para el cálculo de estos parámetros se debe conocer los siguientes valores:

El rendimiento térmico de una torre de enfriamiento de tiro inducido depende en gran medida del ventilador que a esta se le instale y para la selección correcta del mismo

se necesita calcular primeramente el volumen de aire que debe manejar, calculándose por la siguiente expresión:

$$G = G_s \cdot V_{es} \quad (20)$$

Siendo:

G : Volumen de aire manejado por el ventilador en m^3/s .

G_s : Flujo másico de aire en kg/s.

V_{es} : Volumen específico del aire en m^3/kg . Para este caso se toma $0,9051 m^3/kg$ a $33^\circ C$

Teniendo el volumen de aire manejado, se puede calcular la velocidad a la que este se debe mover por la torre usando la expresión siguiente:

$$V = G / A \quad (21)$$

Donde:

V : Velocidad del aire que se mueve por la torre en m/s.

A : Área de la sección transversal en m^2 .

Con la velocidad del aire, se calcula la presión estática (P_s en m de agua) de la siguiente ecuación:

$$P_s = (2 \cdot V^2) / g \quad (22)$$

Donde:

g: Aceleración de la gravedad en m/s^2 . Para este caso será de $9,81m/s^2$

Teniendo el valor de presión estática entonces se puede calcular la potencia (Hp) requerida por el ventilador mediante la ecuación siguiente:

$$Pe = 13,142 \cdot Ps \cdot G \quad (23)$$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se determinó que la torre de enfriamiento más idónea para la refrigeración en el proceso de producción de helado es una de tiro mecánico inducido y flujo en contracorriente, además se realizaron cálculos pertinentes como la altura de la torre con un valor de 2,4 m, el flujo del agua igual a 3,75 kg/s y el área transversal de la torre con un valor de $3,23 m^2$. Según Kaijun, Dong; Pingjie, Lia; Zhilin, Huang; Lin, Sua; Qin, Suna (2017) los valores obtenidos cumplen con los requisitos, ya que la altura es un 20% menor que el espacio donde se colocará la torre.

Se debe incorporar a la torre un volumen de agua desde el tanque de aportación de 0,086 kg/s de agua. Al conocer este valor se puede regular adecuadamente la válvula de entrada del agua de aportación y así no tener ni exceso ni falta de agua en el equipo.

Se seleccionaron boquillas fabricadas de polipropileno, inatascables y que funcionan a baja presión, resistentes al ataque químico y biológico, de insecto intercambiable.

Según Contreras (2012), Calzada (2012) y Obregón, Pertuz, Domínguez (2017) refieren que existe varios tipos de relleno, el laminar puede ser de PVC (policloruro de vinilo) o de PP (polipropileno), el salpiqueo puede ser de madera, PVC, PP y PE (polietileno), los plásticos son mucho más efectivos y baratos que los de madera. Siguiendo este criterio se escogió para la torre del combinado un empaque plástico tipo película que tiene una eficiencia superior al tipo salpicadura hasta un 30% (Kaijun, Dong; Pingjie, Lia; Zhilin, Huang; Lin, Sua; Qin, Suna 2017).

Se determinó la potencia del ventilador, la cual debe ser 2,463 HP para poder mover el aire que circula en la torre. El volumen de aire manejado por el ventilador es de $2,13 m^3/s$, la velocidad del aire que se mueve por la torre de 0,659 m/s y la presión estática de 0,088 m de agua, acordes con lo establecido por el antes mencionado autor.

Impacto económico

La producción de helado en la empresa es de 50 tinajas de helados de 10 litros en un tiempo de 8:00 am

hasta las 4:30 pm en dependencia de la cantidad de ingredientes y el proceso de elaboración de la misma. Teniendo una ganancia de 400 cuc equivalente a 10 000 cup diarios sin descontar los gastos.

La torre de enfriamiento se pone en funcionamiento al comienzo de la elaboración y al no cumplir con los requerimientos del sistema de refrigeración el proceso, los equipos se disparan y el proceso de fabricación se ve interrumpido alrededor de una hora diaria.

Al considerar que este trabajo se implemente en la empresa, la torre trabajará entre sus parámetros de diseño y se podrán elaborar alrededor de 7 cubetas más, siendo un total de 57 cubetas al día. Esto daría un aumento de 56 cuc equivalente a 1 400 cup, por lo que se produciría 456 cuc equivalente a 11 400 cup sin contar los gastos por consumo de ingredientes.

Impacto ambiental

Los intercambiadores de calor usan como refrigerante el amoniaco y el freón que aunque este último no es muy dañino son perjudiciales si ocurriese algún incidente en la fábrica, con el uso de las torres de enfriamiento en procesos industriales sustituyendo a los intercambiadores de calor altos consumidores de

energía, se evitan notablemente los daños al ambiente ya que aparte de utilizan como fuente de energía la electricidad motores pequeños y de bajo consumo, las sustancias de trabajo son agua y aire.

Aunque la torre no constituye un problema ambiental, se le debe prestar atención a la cantidad de agua que se consume en la torre, ya que se pueden producir pérdidas por evaporación. Si el agua no se enfría adecuadamente las pérdidas por evaporación aumentan principalmente cuando el eliminador de rocío esta averiado o no existe, por ello se debe establecer un estricto control sobre esta. Por lo que en el diseño y selección de la misma se tuvo en cuenta el porcentaje de agua que se evapora, en condiciones de operación.

CONCLUSIONES

Al calcular correctamente los parámetros de trabajo necesarios de los equipos del sistema, la transferencia de calor que tiene lugar en la torre ocurrirá sin ninguna dificultad y el agua de trabajo que es en este caso el flujo de refrigeración, llegará con la temperatura para la cual está diseñada, consiguiéndose entonces el enfriamiento necesario para el trabajo de los equipos que dependen de la torre, por lo que se dice que cumple con las expectativas de la empresa además lograr el

correcto desenvolvimiento del flujo productivo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alean J. D., Gutiérrez G.A., Chejne F., Marlon J., Bastidas, M.J. (2009). Simulación de una Torre de Enfriamiento Mecánica Comparada con Curvas Experimentales. *Información tecnológica*, 20(3), 13-18. doi:10.1612/inf.tecnol.4107it.08 Recuperado de <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642009000300003>

Calzada, F.J. (2012). Diseño de un sistema industrial de enfriamiento con agua de refrigeración para un complejo industrial en Lima, Perú. Madrid, España. 350 p.

Contreras, A.A. (2012). *Torres de Enfriamiento*. Veracruz: SlideShare, México. 295 p.

Guanhong, Z., Suoying, H., Zhiyu, Z., Yi, X., Rui, W. (2017). Economic Analyses of Natural Draft Dry Cooling Towers Pre-cooled Using Wetted Media. *Procedia Engineering*, 205, 423-430. doi: 10.1016/j.proeng.2017.10.393 Recuperado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705817350683>

Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (2007).

Guía técnica de torres de refrigeración. Madrid: IDAE. 45 p.

Jianlin, Ch., Nianpin, L., Kuan, W. (2015). Study of Heat-source-tower Heat Pump System Efficiency. *Procedia Engineering*, 121, 915-921. doi: 10.1016/j.proeng.2015.09.050 Recuperado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705815028787>

Kaijun, D., Pingjie, L., Zhilin, H., Lin, S., Qin, S. (2017). Research on Free Cooling of Data Centers by Using Indirect. *Procedia Engineering*, 205, 2831-2838. doi: 10.1016/j.proeng.2017.09.902 Recuperado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705817344600>

Nailing, L., Lixia, Z., Xiangqin, J. (2017). The Effect of the Air Water Ratio on Counter Flow Cooling Tower. *Procedia Engineering*, 205, 3550-3556. doi: 10.1016/j.proeng.2017.09.925 Recuperado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705817344831>

Cálculo de parámetros para la selección de una torre de enfriamiento

Obregón, L.G., Pertuz, J.C., Domínguez, R.A. (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. *Prospectiva*, 15(1), 42-52. Doi: <http://dx.doi.org/10.15665/rp.v15i1.820> Recuperado de

<http://www.scielo.org.co/pdf/prosp/v15n1/1692-8261-prosp-15-01-00042.pdf>

Sariego, Y., García, E., Pérez, S., Rodríguez, L. (2017). Evaluación energética de una planta de helados. *Ingeniería Energética*, 38(1), 42-53. Recuperado de <http://rie.cujae.edu.cu/index.php/RIE/article/view/491> Cuba

Avances journal assumes the Creative Commons 4.0 international license