

# ANÁLISIS TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE CONSUMO DE VAPOR EN UNA MARMITA

Ramírez Ramírez, María Isabel (1), Rodríguez Ángeles, Mario Alberto (2), Espinoza Zamora, Jesús (2), Castañeda Ramírez, José Cristóbal (2)

1Ingeniería en Procesos Alimentarios, Universidad Tecnológica del Suroeste de Guanajuato | Dirección de correo electrónico: yza.rmz@gmail.com

2 Dirección de Procesos Alimentarios, Universidad Tecnológica del Suroeste de Guanajuato | Dirección de correo electrónico: mrodriguez@utsoe.edu.mx

## Resumen

El consumo de energía en la operación de una planta industrial representa más del 50% del costo total de operación en la mayoría de los procesos. Se realizó un análisis térmico en una marmita industrial, instalada en la línea de proceso del taller de Frutas y Hortalizas. Se calculó la cantidad de vapor con la medición de parámetros geométricos de la marmita y corroborándolos matemáticamente, utilizando agua en el proceso de evaporación se hicieron mediciones con intervalos de 5 minutos y la cantidad de agua evaporada respecto al tiempo. Obteniendo parámetros de flujo para el vapor utilizado y parámetros térmicos para el sistema agua-acero inoxidable-vapor, en condiciones de operación estables en la marmita. Proponiendo varios modelos matemáticos para el análisis térmico verificando el más aproximado de acuerdo al análisis experimental. Concluyendo que solo el 10.37% es aprovechado del total de vapor generado. Estos resultados servirán para realizar modificaciones a los equipos, además de realizar una planeación que permita un mejor aprovechamiento del vapor generado en los talleres de la UTSOE.

## Abstract

Energy consumption in the operation of an industrial plant represents more than 50% of total operating costs in most processes. a thermal analysis was carried out on an industrial kettle, installed in the process line workshop Fruits and Vegetables. the amount of steam was calculated by measuring geometric parameters of the kettle and check them mathematically, using water in the evaporation process measurements were made with 5 minute intervals and the amount of evaporated water vs. time. Obtaining parameters for steam flow and thermal parameters used for water-stainless-steel steam in stable operating conditions in the kettle system. Proposing various mathematical models for thermal analysis verifying the approximate according to experimental analysis. Concluding that only 10.37% of the total is taken advantage of steam generated. These results will be used to make modifications to the equipment, in addition to planning that allows better use of the steam generated in the workshops of the UTSOE.

### Palabras Clave

Evaporación; Experimental; Calor; Rendimiento;

## INTRODUCCIÓN

### Transferencia de calor en la industria

El estudio de la transferencia de calor en el procesado de alimentos es fundamental ya que la mayoría de la preparación de alimentos involucra un calentamiento de éstos. Algunos de los principales usos son la cocción mediante la inyección de vapor, para el concentrado de los alimentos mediante la evaporación del contenido de agua, así como en procesos de esterilización y limpieza.

En México, la tercera parte de la energía utilizada a nivel nacional, es consumida por la industria, y de ésta, cerca del 70% proviene de combustibles fósiles, distribuidos en la forma siguiente: el gas natural como principal recurso (50%), seguido por el combustóleo (21%) y el coque (11%) [1]. Este requerimiento energético demandado por la industria lo conforman principalmente los sistemas de combustión directa, como son los calentadores a fuego directo y calderas, donde estas últimas se utilizan para la generación de vapor, el cual se requiere para suministrar trabajo mecánico y calor a los procesos.

### Producción de vapor

El vapor de agua constituye el fluido energético ideal para la industria, que necesita la utilización de calor a diversos niveles de temperatura, generalmente entre 90 °C y 260 °C. Es un fluido utilizado para proporcionar fuerza motriz y energía calorífica, es el medio natural más eficiente de transferencia de calor en la industria, siendo este incoloro, inodoro y estéril. El vapor se obtiene generalmente mediante el uso de calderas, en donde el agua es calentada a través de gases de combustión hasta sobrepasar su punto de saturación [2]. Al ser un fluido con un alto contenido calórico, un desperdicio de vapor se traduce en una gran pérdida de calor y por lo tanto de combustible quemado. Debido a esto y al alza de los combustibles hoy en día, es necesario mejorar los

procesos que involucran el uso de vapor a través de una optimización del sistema, para lo cual se deben realizar estudios térmicos en los cuales se pueda calcular la cantidad estrictamente necesaria de vapor para usar en el proceso, y de esta manera evitar pérdidas innecesarias durante la operación.

### Justificación

El laboratorio de frutas y hortalizas de la Universidad Tecnológica del Suroeste de Guanajuato cuenta con diversos equipos de transferencia de calor, entre los cuales se cuentan 2 marmitas de una capacidad de 150 litros. Estas marmitas se usan en procesos de concentración de alimentos por evaporación. Durante la operación normal de las marmitas se detectó un excesivo incremento en la humedad ambiental, esta humedad proviene en parte de la evaporación del alimento en cuestión, sin embargo se sospechaba que la mayor parte de esta humedad proviene del vapor no aprovechado en el proceso, es decir el vapor producido directamente del generador de vapor y que no cumple con ninguna función para la operación de la marmita, dando como resultado un excesivo gasto de combustible. Con el fin de reducir el consumo de vapor, se realizó un análisis térmico de la operación del equipo para encontrar el flujo de vapor necesario para llevar a cabo los procesos de evaporación. A la par de esto, se probaron ecuaciones para la transferencia de calor durante el proceso, las cuales puedan ayudar a predecir el comportamiento de los procesos futuros de evaporación.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Como se mencionó antes, el equipo a analizar fue una marmita semi-industrial con una capacidad de 150 litros, con un enchaquetado en el fondo. Para realizar el cálculo del vapor requerido en el proceso de evaporación, se llevaron a cabo varias pruebas experimentales, consistentes en la evaporación de agua, con lo cual se calcularon los parámetros necesarios para la transferencia de calor. El punto

más importante del cálculo consistió en el cálculo de los coeficientes de transferencia de calor convectivos tanto en el lado de la chaqueta como en el lado del agua. Los parámetros requeridos para la obtención del coeficiente convectivo de transferencia de calor y realizar el análisis térmico pueden dividirse en: parámetros térmicos, geométricos y de flujo.

### Parámetros geométricos

Se determinó la forma geométrica de la marmita, ya que dentro de las especificaciones no se encontraron datos acerca de si el fondo era esférico o bien un paraboloide. Se realizó una estructura en la superficie de la marmita usando cartoncillo, madera y pegamento, elaborando con esto un molde de la marmita. Usando el molde elaborado, se proyectó en una cuadrícula, con lo cual se determinó la función matemática representativa de la figura geométrica. Por otro lado, se realizaron mediciones para el espacio interno del enchaquetado para determinar el área de flujo del vapor, así como del espesor de las paredes y la altura del enchaquetado.

### Parámetros de flujo

La marmita instalada, no cuenta con rotámetros o ningún otro medidor del flujo de vapor, por lo cual éste se determinó por métodos indirectos. Se introdujo el vapor del generador a la chaqueta de la marmita por 10 y se dejó enfriar a temperatura ambiente para asegurar que todo el vapor se haya condensado, posteriormente se abrió la válvula de purga de la chaqueta, ubicada en la parte inferior de la marmita, dejando salir el condensado y recolectándolo en una probeta para medir la cantidad de condensado; esta operación fue repetida varias veces para descartar errores de medición por estancamiento del condensado dentro de la marmita. Con la cantidad del condensado y el tiempo de operación se obtuvo el flujo másico de vapor. El flujo volumétrico del vapor se obtuvo a través del uso de tablas de vapor y la velocidad se calculó usando el área de flujo calculada previamente.

### Parámetros térmicos

Se comenzó por obtener las especificaciones técnicas del generador de vapor, siendo este el que suministra el vapor para llevar a cabo el análisis térmico. El generador utilizado tiene un suministro de combustible gas LP, con una capacidad de 40 cc y presión de operación de 7 kg/cm<sup>3</sup>. La presión del vapor de en la marmita se abate por un sistema de válvulas hasta alcanzar Durante la operación de la marmita se tomaron lecturas de la temperatura del vapor de alimentación a la marmita, así como del agua en evaporación y de la superficie metálica externa, a intervalos de 5 minutos. También, en el mismo intervalo se tomaron mediciones de la altura del nivel del líquido dentro de la marmita, con lo cual se calculó la cantidad de agua evaporada por unidad de tiempo. Además, se investigaron los parámetros termo-físicos del acero inoxidable del que está elaborada la marmita.

### Cálculo del vapor requerido

Con los datos recolectados se calcularon los coeficientes de transferencia de calor, usando para la parte interna de la marmita la ecuación propuesta por Rohsenow para ebullición nucleada [3]:

$$\dot{q}_{nucleada} = \mu_l h_{ng} \left[ \frac{g(\rho_l - \rho_v)}{\sigma} \right]^{1/2} \left[ \frac{C_p(T_s - T_{sat})}{C_{sf} h_{fg} Pr_l^n} \right]^3$$

Para el vapor circulante por la chaqueta se propuso el uso de la correlación para esferas concéntricas propuesta por Raithby y Hollands [4]. Sin embargo, durante el cálculo, se tuvieron problemas para obtener los resultados, ya que los flujos de vapor obtenidos eran excesivamente altos; por lo tanto, se propuso utilizar la ecuación propuesta por Chilton y Colburn [5]:

$$Nu = 0.125 Re Pr^{1/3}$$

Los coeficientes obtenidos se usaron para calcular el flujo total de calor a través de la marmita, y con ello calcular el flujo de evaporación. Para determinar la validez de las ecuaciones, se calculó

la velocidad de evaporación del agua en los intervalos de 5 minutos y se compararon los resultados con los obtenidos experimentalmente. Finalmente se calculó el flujo de vapor necesario para lograr la evaporación requerida y se comparó con el flujo de vapor de entrada al evaporador.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Después de repetir la toma del flujo de vapor en la chaqueta de la marmita, se observó que el valor tenía poca variabilidad, por lo cual se descartaron errores metodológicos y de mediciones, obteniéndose un flujo de vapor total de 734 lt/hr. A partir de este dato se obtuvieron los demás parámetros de flujo mostrados en la Tabla 1.

Tabla 1: Datos para la obtención de velocidad del vapor en la marmita

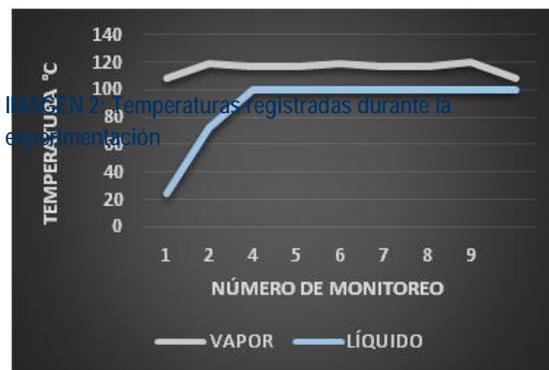
Flujo másico kg/s	Flujo volumétrico m <sup>3</sup> /s	Diámetro equivalente <i>m</i>	Velocidad m/s
0.2026	0.1832	0.045	6.009

Para calcular el coeficiente de transferencia de calor por convección en el lado del vapor se calcularon los valores de los números de Reynolds, Prandtl y Nusselt, cuyos valores se muestran en la tabla 2.

Tabla 2: Valores de los números adimensionales para el vapor.

Reynolds	Prandtl	Nusselt
23,145.46	1.0	2,893.18

El cálculo del número de Nusselt se realizó con la ecuación de Chilton-Colburn mostrada arriba debido a que el número de Reynolds calculado fue turbulento.



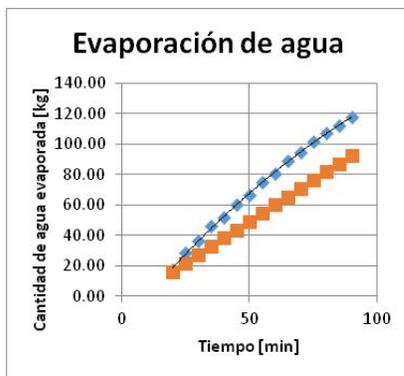
Las mediciones de temperatura realizadas durante el periodo de evaporación se muestran en la imagen 2 para el agua y el vapor. Se puede observar que para el vapor la temperatura se mantuvo constante, mientras que para el agua las condiciones de temperatura se estabilizaron hasta el minuto 20, momento en que se alcanzó el punto de ebullición.

Tabla 3: Relación de flujos másicos, teórico - experimentales.

Tiempo min	Masa evaporada experimental Kg/s	Masa evaporada teóricamente Kg/s
30	36.39	32.68
35	46.01	38.12
40	51.82	43.57
45	60.24	49.01
50	66.18	54.46
55	74.93	59.91
60	80.79	65.35
65	88.62	65.35

70	94.21	70.80
75	101.36	76.25
80	107.46	87.14
85	111.98	92.59
90	117.36	98.03

Con las mediciones del nivel del agua dentro de la marmita se calculó la cantidad de agua evaporada desde el tiempo cero hasta el tiempo  $t$ , los cuales se muestran en la Tabla 3, junto a los resultados obtenidos teóricamente con las ecuaciones propuestas. Los resultados también se muestran en la Imagen 3, para una mejor comparación. Como se puede observar, la cantidad de agua evaporada experimentalmente es mayor a la calculada por lo que se puede decir que las ecuaciones usadas nos predicen correctamente el fenómeno que se llevó a cabo.



**IMAGEN 2:** Comportamiento de la evaporación de agua

Aun con este problema, se calculó la cantidad de vapor que se debió usar en esta experimentación, el calor requerido para la transferencia en el agua es de 42,149.53 W, mientras que el generador de vapor suministra 392,461.47 W, con esto se demuestra que se tiene un aprovechamiento del 10.37% del vapor generado.

## CONCLUSIONES

En este trabajo se realizó el análisis térmico de una marmita instalada en el laboratorio de frutas y hortalizas de la UTSOE. Se tiene un flujo volumétrico de 734 lt/hr obtenido experimentalmente teniendo una diferencia del 4.63 %, en comparación con las especificaciones del generador de vapor ya que el abastecimiento de agua es de 700 Lts/hr, el cual es un flujo muy alto, de tal manera que se debe establecer un plan de acción para poder reducir el desperdicio excedente. En la experimentación, el agua total evaporada es de 45.89 Lts mientras que por medio del modelo matemático seleccionado da una cantidad de 41.70 Lts, es decir con una diferencia del 9.12%, la diferencia puede deberse a que, aunque la ecuación usada para la transferencia de calor no considera el fenómeno de condensación dentro de la chaqueta, además de que las ecuaciones de ambos lados de la marmita deben adecuarse a una geometría esférica, por lo cual se sugiere en un futuro adaptar o cambiar las ecuaciones usadas para la predicción de la operación de la marmita. El desperdicio en el vapor usado es de 89.63%, aunque si se considera el error de adecuación de los datos teóricos, este porcentaje se incrementará, por lo tanto se recomienda el uso de un generador de vapor más pequeño para el funcionamiento de la marmita, que se adecue mejor a las necesidades y reduzca el desperdicio de energía.

## REFERENCIAS

- [1] Energía, S.d. (s.f.). Obtenido de [www.sener.gob.mx](http://www.sener.gob.mx)
- [2] LTDA, T. E. (s.f.). Artículo Técnico, Costo de generación de vapor. Obtenido de [www.thermal.cl](http://www.thermal.cl)
- [3] Cengel, Y.A (2004). Transferencia de Calor. (3ª ed.) México, D.F.: McGraw-Hill.
- [4] Raithby, G.D., and Hollands, K.G.T., 1975, "A General Method of Obtaining Approximate Solutions to Laminar and Turbulent
- [5] Incropera, F.P., De Witt, D.P. Fundamentos de transferencia de calor. (4ª ed.)