

Estimation of the wetting efficiency of an evaporator by a Dual Extended Kalman Filter

I.J. Canela-Sánchez * R.F. Escobar-Jiménez *
D. Juárez-Romero ** E. Carrera-Avendaño *

* *Tecnológico Nacional de México / Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico. Int. Internado Palmira S/N, Palmira C.P.62490, Cuernavaca, Morelos, México (e-mail: isaac.cs@cenidet.tecnm.mx, ricardo.ej@cenidet.tecnm.mx, edgardo.cap@cenidet.tecnm.mx)*

** *Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas, UAEM. Av. Universidad No. 1001, Col. Chamilpa, C.P. 62209, Cuernavaca, Morelos, México. (e-mail: djuarezr7@gmail.com)*

Abstract

This work presents the development of a Dual Extended Kalman Filter (DEKF) used to calculate the parameter known as wetting efficiency of a falling film evaporator. The wetting efficiency refers to the part of the tube that is in contact with the falling film. This parameter depends on different factors as the type of surface, physical properties of the fluid, and mainly the mass flow rate. The knowledge of the value of this parameter gives information about the lack or the abundance of the mass flow rate of the falling film. The evaporator consists of 13 tubes, in which the wetting efficiency of the first tube is estimated using the experimental outlet temperature of the fluid flowing inside the tubes. The results show that the predicted temperature for the first tube matches adequately the measured temperature. Alternatively, the wetting efficiency and the overall heat transfer coefficient were estimated together as a single parameter. The results show that both approaches can be used to estimate the unknown evaporator parameters, however, estimating the wetting efficiency gives more system information because it determines the lack of fluid on the tubes.

Keywords: Evaporator, falling film, wetting efficiency, modelling, Kalman Filter.

1. INTRODUCCIÓN

Los intercambiadores de calor son ampliamente usados en algunos procesos como en condensación y evaporación, plantas de energía de refrigeración, radiadores en coches, procesamiento de productos químicos, calentadores solares de aire/agua, recuperación de calor residual, cogeneración, generación de vapor e industrias farmacéuticas (Alam y Kim 2018). Es conveniente que estos intercambiadores de calor tengan el mejor diseño para mejorar su rendimiento. Los intercambiadores de calor de película descendente tienen un coeficiente de transferencia de calor más alto que los intercambiadores de calor inundados, además de que operan con flujos de película descendente menores (Hu y Jacobi 1996). Ayub et al. (2006) mencionan que los evaporadores de película descendente tienen un mejor rendimiento que los evaporadores inundados debido a su mayor coeficiente de transferencia de calor, además de que pueden ser de menor tamaño. Estos intercambiadores de calor tienen

valores desconocidos de algunos parámetros, los cuales se consideran constantes para describir la transferencia de calor, uno de esos parámetros es el coeficiente global de transferencia de calor. Escobar et al. (2009) estiman el coeficiente de transferencia de calor mediante un observador adaptable, lo cual permite que el proceso trabaje sin restricción en los límites de operación. Sin embargo, para los intercambiadores de calor de película descendente, se presenta una humidificación parcial de los tubos cuando el flujo es bajo (Ubara et al. 2020). Esta eficiencia de humidificación es un parámetro que se debe de tomar en cuenta para calcular correctamente la transferencia de calor en los intercambiadores de calor de película descendente. La eficiencia de humidificación se puede estimar de forma similar que el coeficiente global de transferencia de calor mientras se tengan correlaciones empíricas para éste. Esto debido a que no es posible una identificación separada de estos dos parámetros porque no aparecen por separado en las ecuaciones del modelo (Müller et al. 2014). Una herramienta para la estimación de los parámetros es el

Filtro dual de Kalman extendido (DEKF) (Khodadadi y Jazayeri-Rad 2011). En este trabajo se presenta la implementación de un DEKF para la estimación de la eficiencia de humidificación y la estimación conjunta de la eficiencia de humidificación con el coeficiente de transferencia de calor.

2. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO Y MODELADO

El evaporador helicoidal de película descendente es un intercambiador de calor de un transformador térmico por absorción que tiene la finalidad de destilar agua (Delgado-Gonzaga et al. 2017). Este evaporador esta acoplado a un absorbedor como se muestra en la Fig. 1. El evaporador consta de 13 tubos, donde el agua caliente fluye dentro de los tubos de abajo hacia arriba, mientras que el agua fría se distribuye con un distribuidor por la parte superior de los tubos para que el fluido fluya como película descendente. Una descripción detallada del procesos se presenta en Romero et al. (2023). Cada tubo del evaporador se modeló como un sistema individual. Las ecuaciones diferenciales se resolvieron utilizando el método explícito de Euler. El modelo fue desarrollado en MATLAB[®].

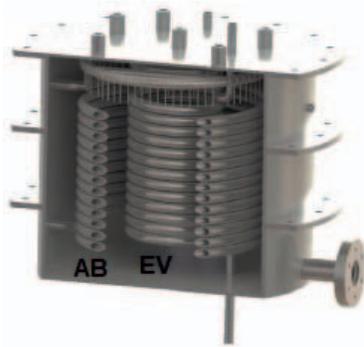


Figura 1. Evaporador (Delgado-Gonzaga et al. 2017).

2.1 Propiedades físicas y termodinámicas

Las propiedades físicas y termodinámicas del agua son calculadas por funciones desarrolladas en MATLAB[®] por Mikofski (2013). Estas funciones están formuladas de acuerdo con la Asociación Internacional para las Propiedades del Agua y del Vapor (IAPWS-IF97). Las funciones dependen de 1 o 2 variables como la temperatura o la presión.

2.2 Modelo matemático

En esta sección se describen las ecuaciones de interés para este trabajo del modelo del evaporador. Una descripción más detallada del modelo se presenta en Canela-Sánchez et al. (2023).

El balance de energía para la corriente de dentro de los tubos se calcula con la Ec. 1.

$$Ms_{Tub}Cp_{Tub}\frac{dTm_{Tub}}{dt} = \dot{m}_{Tub}^i Ht_{Tub}^i - \dot{m}_{Tub}^o Ht_{Tub}^o - \dot{Q}_{Trn} \quad (1)$$

donde Tm es la temperatura del fluido, Ms es la masa, Cp es la capacidad calorífica específica, \dot{m} es el flujo másico, Ht es la entalpía específica y \dot{Q}_{Trn} es la velocidad de transferencia de calor.

El balance de energía para la película descendente en condiciones de subenfriamiento viene dado por la Ec. 2.

$$\frac{d(Ms_{Flm}Ht_{Flm}^o)}{dt} = \dot{m}_{Flm}^i Ht_{Flm}^i - \dot{m}_{Flm}^o Ht_{Flm}^o + \dot{Q}_{Trn} \quad (2)$$

Los balance anteriores se aplica a cada uno de los 13 tubos.

En este trabajo las simulaciones se hicieron a presión constante, por lo que la entalpía y la temperatura de la película descendente no varían una vez alcanzadas las condiciones de saturación.

El calor de transferencia viene dado por la siguiente Ec. (Canela-Sánchez et al. 2023):

$$\dot{Q}_{Trn} = \eta_{Wet} U A_{Trn} \Delta Tm \quad (3)$$

donde A_{Trn} es el área de transferencia de calor, ΔTm es la diferencia de temperatura entre la corriente fría y caliente (Canela-Sánchez et al. 2023). U es el coeficiente global de transferencia de calor. η_{Wet} es la eficiencia de humidificación. Esta eficiencia se refiere a la parte del tubo que está en contacto con la película descendente. A mayor eficiencia de humidificación mayor va a ser la transferencia de calor. Esta eficiencia de humidificación depende de muchos factores como el flujo másico, las propiedades físicas del fluido y la velocidad de transferencia de calor (Habert y Thome 2010). La Fig. 2 muestra un arreglo de tubos horizontales parcialmente humidificados donde las zonas amarillas corresponden a las zonas sin humidificación (Lazcano-Véliz et al. 2014). En este trabajo la estimación de parámetros se realizó de 2 formas: a) Se considera la eficiencia de humidificación como el parámetro a estimar. Es decir, $X_p = \eta_{Wet}$. En este caso se calcula el coeficiente global de transferencia de calor mediante correlaciones para los coeficientes convectivos de transferencia de calor para ambas corrientes (Canela-Sánchez et al. 2023). b) Se estima conjuntamente la eficiencia de humidificación con el coeficiente global de transferencia de calor como un solo parámetro, es decir $X_p = \eta_{Wet} U$.

2.3 Descripción del Filtro Dual de Kalman Extendido

Las ecuaciones del Filtro Dual de Kalman Extendido (DEKF) para la estimación de los estados y de los parámetros del evaporador son mostradas a continuación (Wenzel et al. 2006).



Figura 2. Eficiencia de humidificación para una columna de tubos (Lazcano-Véliz et al. 2014).

La estimación de los parámetros se realizó con las temperaturas de la corriente de dentro de los tubos. La temperatura del primer tubo corresponde a la temperatura obtenida experimentalmente, mientras que las otras 12 temperaturas del vector de salida corresponden a valores de una planta simulada. La estimación de los parámetros se realizó con los resultados en estado estable de 5 pruebas experimentales. El filtro de Kalman se aplicó durante 27 segundos para cada prueba para dar tiempo a la correcta estimación de los parámetros. Las predicciones de los estados se obtuvieron con el método de Euler resolviendo los balances de energía de la corriente de dentro de tubos mostrados en la Ec. (4).

La predicción de la matriz de covarianza de la estimación del error para los estados viene dado por la Ec. (5).

$$\hat{x}_s^-(t) = \begin{bmatrix} \frac{\dot{m}_{Tub}^i H t_{Tub,1}^i - \dot{m}_{Tub}^o H t_{Tub,1}^o - \hat{\eta}_{Wet}^- U A_{Trn} \Delta T m_1}{M s_{Tub} C p_{Tub}} \\ \frac{\dot{m}_{Tub}^i H t_{Tub,2}^i - \dot{m}_{Tub}^o H t_{Tub,2}^o - \hat{\eta}_{Wet}^- U A_{Trn} \Delta T m_2}{M s_{Tub} C p_{Tub}} \\ \vdots \\ \frac{\dot{m}_{Tub}^i H t_{Tub,13}^i - \dot{m}_{Tub}^o H t_{Tub,13}^o - \hat{\eta}_{Wet}^- U A_{Trn} \Delta T m_{13}}{M s_{Tub} C p_{Tub}} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\Phi_s^-(t) = J_s(t) \Phi_s^-(t-1) J_s^T(t) + R_s \quad (5)$$

donde R_s y $J_s(t)$ son la matriz de covarianza de ruido de proceso y la matriz Jacobiana de los estados respectivamente. $J_s(t)$ es definida por la Ec. (6), donde f_m corresponde al balance de energía del tubo m .

$$J_s = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_{s,1}} & \cdots & \frac{\partial f_1}{\partial x_{s,m}} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial f_m}{\partial x_{s,1}} & \cdots & \frac{\partial f_m}{\partial x_{s,m}} \end{bmatrix} \quad (6)$$

La corrección de la matriz de ganancia de Kalman para los estados viene dada por la Ec. (7). Mientras que la

corrección de los estados y de la matriz de covarianza de la estimación del error son calculadas por las ecuaciones (8), y (9), respectivamente.

$$K_s(t) = \Phi_s^-(t) H_s^T [\sigma_s + H_s \Phi_s^-(t) H_s^T]^{-1} \quad (7)$$

$$\hat{x}_s(t) = \hat{x}_s^-(t) + K_s(t) [y(t) - H_s \hat{x}_s^-(t)] \quad (8)$$

$$\Phi_s(t) = [I - K_s(t) H_s] \Phi_s^-(t) \quad (9)$$

donde H_s es una matriz identidad de 13x13, $y(t)$ es el vector de salida y σ_s es la matriz de covarianza del ruido de salida para los estados.

Las predicciones de los parámetros n_{wet} y de la matriz de covarianza de la estimación del error para el parámetro se calculan con las ecuaciones (10), y (11). En la ecuación (10), $\hat{x}_p^-(t)$ es un vector de 13 elementos, donde cada elemento corresponde a la eficiencia n_{wet} de cada tubo. En este trabajo solo se analiza la eficiencia del tubo 1, ya que es la que corresponde a la temperatura experimental disponible.

$$\hat{x}_p^-(t) = \hat{x}_p^-(t-1) \quad (10)$$

$$\Phi_p^-(t) = \Phi_p^-(t-1) + R_p \quad (11)$$

donde R_p es la matriz de covarianza del ruido de proceso para los parámetros.

La corrección de la matriz de ganancia de Kalman para los parámetros se calcula con la Ec. (12). Mientras que las correcciones del parámetro y de la matriz de covarianza de la estimación del error del parámetro vienen dadas por las ecuaciones (13), y (14) respectivamente.

$$K_p(t) = \Phi_p^-(t) H_p^T [\sigma_p + H_p \Phi_p^-(t) H_p^T]^{-1} \quad (12)$$

$$\hat{x}_p(t) = \hat{x}_p^-(t) + K_p(t) [y(t) - H_s \hat{x}_s^-(t)] \quad (13)$$

$$\Phi_p(t) = [I - K_p(t) H_p] \Phi_p^-(t) \quad (14)$$

donde σ_p y H_p son la matriz de covarianza del ruido de salida y la matriz Jacobiana de los parámetros respectivamente. H_p es definida por la Ec. (15).

$$H_p = H_s \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_{p,1}} & \cdots & \frac{\partial f_1}{\partial x_{p,m}} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial f_m}{\partial x_{p,1}} & \cdots & \frac{\partial f_m}{\partial x_{p,m}} \end{bmatrix} \quad (15)$$

3. RESULTADOS

Primeramente se muestran los resultados de la estimación de la eficiencia de humidificación sin la temperatura simulada por la planta. De esta forma, al no haber fluctuaciones, se puede verificar que la estimación fue llevada a cabo de forma correcta. La Fig. 3 muestra la estimación de la eficiencia de humidificación del primer tubo realizada por el DEKF. La Fig. 4 muestra los resultados de las temperaturas del fluido dentro de los tubos en estado estable. Se puede visualizar que al final de la simulación la temperatura predicha coincide con la temperatura experimental, con lo que se muestra que la estimación se ha realizado correctamente. Además, los resultados de las Figs. 3 y 4 muestran un comportamiento adecuado, ya que se puede observar que hay un decremento en la temperatura del tubo 1 cercano a $0.03\text{ }^{\circ}\text{C}$, mientras hay un aumento en la eficiencia de aproximadamente 0.03, este aumento se debe a que se necesita una mayor transferencia de calor para enfriar más la corriente del tubo 2 al 1.

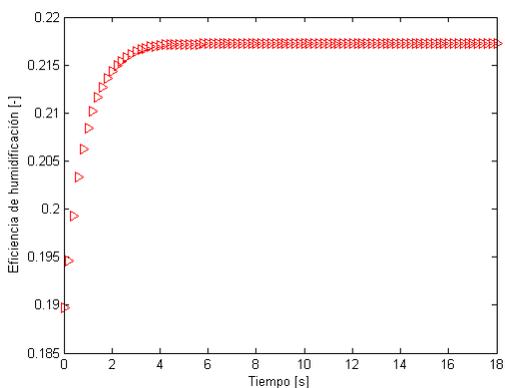


Figura 3. Estimación del parámetro n_{Wet} sin valores de la planta simulada.

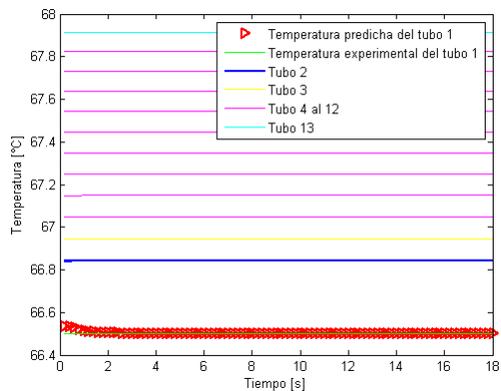


Figura 4. Temperatura predicha para la estimación de n_{Wet} sin valores de la planta simulada.

Para determinar si el DEKF puede ser aplicado a todos los tubos del evaporador se obtuvieron las temperaturas

del tubo 2 al 13 con los valores de una planta simulada, las cuales se obtuvieron con las temperaturas predichas más un ligero error aleatorio. Primeramente, se estimó la eficiencia de humidificación, esto considerando que se conocen correlaciones para calcular el coeficiente global de transferencia de calor. Posteriormente se estimó conjuntamente la eficiencia de humidificación junto con el coeficiente global de transferencia de calor. Los resultados para la estimación de la eficiencia de humidificación son presentados para 5 condiciones de operación experimentales, donde la temperatura se varía desde 68 hasta $76\text{ }^{\circ}\text{C}$, con un incremento de $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Romero et al. 2023). Cada prueba se realiza con 27 segundos de duración. La Fig. 5 muestra la corrección de los estados realizada por el DEKF. Como se puede observar, las temperaturas estimadas se ajustan adecuadamente a la temperatura experimental y a las de la planta simulada. La Fig. 6 muestra las predicciones de los estados. Como se observa al inicio de las pruebas 2 a 5, la temperatura del primer tubo no es muy cercana al valor experimental, sin embargo, conforme transcurre el tiempo, la temperatura predicha va acercándose al valor experimental. Esto es debido a que el DEKF va estimando la eficiencia de humidificación que ajuste la temperatura. También se observa que las predicciones de las temperaturas del tubo 2 al 13 se ajustan a las de la planta simulada. La Fig. 7 muestra la eficiencia de humidificación estimada en cada prueba. Se puede observar que la eficiencia en las pruebas 2 a 5 comienza a estabilizarse cuando la temperatura predicha también lo hace aproximándose a la temperatura experimental. El valor negativo del parámetro estimado es debido a que la temperatura predicha del primer tubo sobrepasa la temperatura de salida del segundo tubo, con lo cual, necesariamente la velocidad de transferencia de calor cambia de signo. Los resultados obtenidos cuando la estimación se estabiliza son razonables considerando que operacionalmente se manejan flujos máscicos bajos de la película, con lo que se podría obtener humidificaciones parciales de los tubos. Es importante notar que sólo se estima la eficiencia para el último tubo debido a que únicamente se cuenta con la temperatura experimental de salida del primer tubo. Si se quisiera tener una estimación para los demás tubos se tendrían que tener mediciones experimentalmente de la temperatura de salida de cada tubo.

Un segundo enfoque se realizó para estimar conjuntamente la eficiencia de humidificación con el coeficiente global de transferencia de calor. La estimación se realizó para las primeras dos pruebas. Como se puede observar en la Fig. 8, las estimaciones de los estados se ajustan a la temperatura experimental y a las de la planta simulada. La predicción de los estados se muestra en la Fig. 9. La predicción de la temperatura se va acercando a la temperatura experimental conforme transcurre el tiempo. La Fig. 10 muestra la estimación conjunta de la eficiencia de humidificación y del coeficiente global de transferencia de calor ($n_{Wet}U$). Los resultados parecen razonables de acuerdo a la Fig. 11, la cuál muestra la eficiencia de

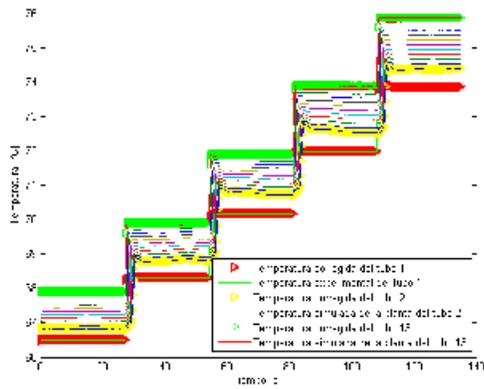


Figura 5. Corrección de estados para la estimación de n_{Wet} .

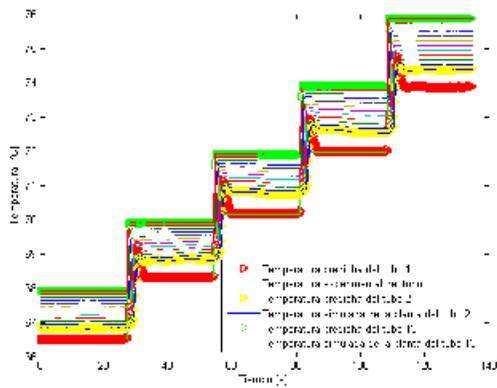


Figura 6. Predicción de estados para la estimación de n_{Wet} .

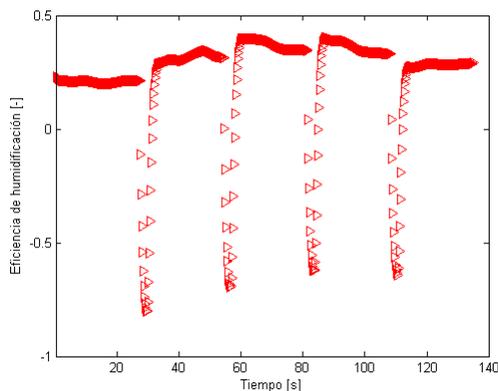


Figura 7. Estimación del parámetro n_{Wet} .

humidificación obtenida a partir del parámetro calculado $n_{Wet}U$ y el coeficiente global de transferencia de calor calculado con las correlaciones empíricas. Debido a que el coeficiente global de transferencia de calor varía muy poco para condiciones de operación similares, el compor-

tamiento de n_{Wet} y $n_{Wet}U$ son casi iguales. Se puede observar que los resultados están de acuerdo con los obtenidos al estimar n_{Wet} de forma individual. Por lo tanto, ambos enfoques pueden estimar los parámetros desconocidos del evaporador, sin embargo, convendría estimar n_{Wet} individualmente ya que proporciona más información del sistema porque indica la falta de fluido en los tubos.

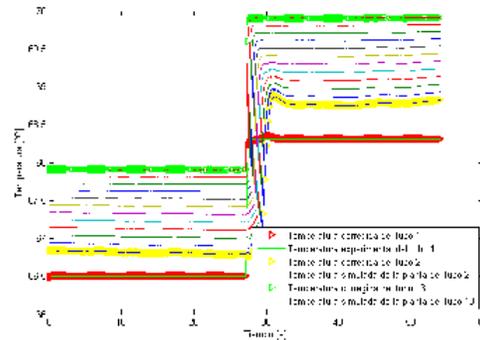


Figura 8. Corrección de estados para la estimación de $n_{Wet}U$.

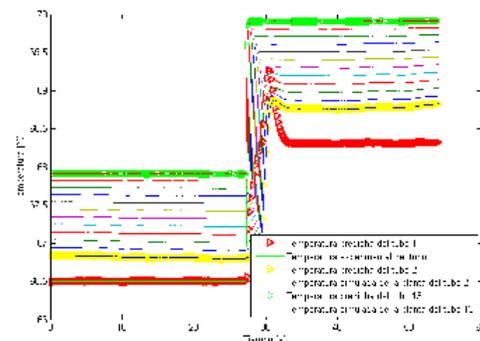


Figura 9. Predicción de estados para la estimación de $n_{Wet}U$.

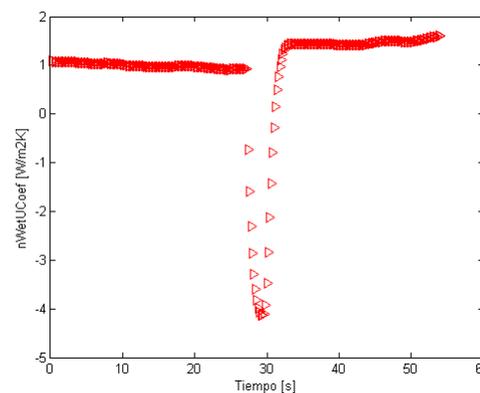


Figura 10. Estimación del parámetro $n_{Wet}U$.

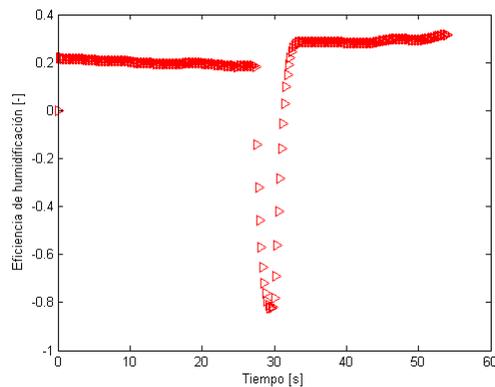


Figura 11. Estimación de la eficiencia de humidificación a partir del parámetro $n_{Wet}U$.

4. CONCLUSIONES

Se desarrolló un Filtro Dual de Kalman Extendido (DEKF) para un evaporador de película descendente. El filtro estimó las temperaturas de los tubos del evaporador y el parámetro llamado eficiencia de humidificación. El DEKF se implementó usando la medición de la temperatura experimental para el primer tubo y los valores de una planta simulada. En el primer caso, cuando la estimación de la eficiencia de humidificación empieza a estabilizarse, la temperatura predicha también se estabiliza cerca de la temperatura experimental. Esto es un indicio de que el DEKF fue implementado correctamente. Cuando se implementó el DEKF con los valores de la planta simulada, los estados predichos coinciden con los valores de la planta simulada mientras que para la temperatura experimental del tubo 1, el error va disminuyendo conforme avanza la simulación. La estimación también se realizó considerando el parámetro $X_p = n_{Wet}U$ en vez de $X_p = n_{Wet}$. La estimación se llevó a cabo correctamente teniendo resultados similares a los obtenidos con la estimación del parámetro $X_p = n_{Wet}$. Sin embargo, convendría estimar n_{Wet} individualmente ya que este parámetro proporciona información sobre la falta de fluido en los tubos.

AGRADECIMIENTOS

IJ Canela-Sánchez agradece a CONAHCyT (Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías) por el apoyo financiero brindado durante su período de posdoctorado. Los autores agradecen a CONAHCyT, PRODEP, Tecnológico Nacional de México y CENIDET por el apoyo brindado para la realización de este trabajo.

REFERENCIAS

Alam, T. y Kim, M.H. (2018). A comprehensive review on single phase heat transfer enhancement techniques in heat exchanger applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 813–839.

Ayub, Z.H., Chyu, M.C., y Ayub, A.H. (2006). Case study: Limited charge shell and tube ammonia spray

evaporator with enhanced tubes. *Applied thermal engineering*, 26(11-12), 1334–1338.

Canela-Sánchez, I.J., Juárez-Romero, D., y Escobar-Jiménez, R.F. (2023). Modeling and simulation of a helical falling film evaporator to improve its performance and design. *Applied Thermal Engineering*, 228, 120445.

Delgado-Gonzaga, J., Huicochea, A., Torres-Merino, J., Canela-Sánchez, I., y Juárez-Romero, D. (2017). Performance analysis of a dual component evaporator-absorber of an absorption heat transformer. *Desalination and water treatment*, 73, 175–184.

Escobar, R., Zaragoza, C.A., Romero, D.J., Hernández, D., y Medina, M.A. (2009). Estimación en línea del coeficiente de transferencia de calor en un intercambiador de calor. *Asociación Mexicana de Control Automático*.

Habert, M. y Thome, J.R. (2010). Falling-film evaporation on tube bundle with plain and enhanced tubes—part ii: New prediction methods. *Experimental heat transfer*, 23(4), 281–297.

Hu, X. y Jacobi, A.M. (1996). The intertube falling film: Part 1—flow characteristics, mode transitions, and hysteresis. *Journal of Heat and Mass Transfer*, 118(3), 626—633.

Khodadadi, H. y Jazayeri-Rad, H. (2011). Applying a dual extended kalman filter for the nonlinear state and parameter estimations of a continuous stirred tank reactor. *Computers and chemical engineering*, 35(11), 2426–2436.

Lazcano-Véliz, Y., Siqueiros, J., Juárez-Romero, D., M.L.I., y Torres-Merino, J. (2014). Analysis of effective wetting area of a horizontal generator for an absorption heat transformer. *Applied thermal engineering*, 62(2), 845–849.

Mikofski, M. (2013). Water and steam properties and derivatives for matlab. https://mikofski.github.io/IAPWS_IF97/.

Müller, D., Esche, E., y Wozny, G. (2014). An algorithm for the identification and estimation of relevant parameters for optimization under uncertainty. *Computers and chemical engineering*, 71, 94–103.

Romero, D.J., Rivera, I.O., Canela-Sánchez, I.J., Ortega-Mojica, N.I., Huicochea, A., y Gonzaga, J.D. (2023). Evaluation of a rough-surface evaporator applied to an absorption heat transformer for water desalination. *International Journal of Chemical Reactor Engineering*, 21(4), 537–547.

Ubara, T., Asano, H., y Sugimoto, K. (2020). Heat transfer enhancement of falling film evaporation on a horizontal tube by thermal spray coating. *Applied sciences*, 10(5), 1632.

Wenzel, T.A., Burnham, K.J., Blundell, M.V., y Williams, R.A. (2006). Dual extended kalman filter for vehicle state and parameter estimation. *Vehicle system dynamics*, 44(2), 153–171.