

Reducción del consumo de energía en la producción de azúcar por la integración de un termocompresor de vapor

Meilyn González-Cortés^{1*}, Yaillet Albernas-Carvajal¹, Ana Iris La Rosa-Rodríguez¹, Junior Lorenzo-LLanez², Juan Pedro Hernández-Tousset¹

1. Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Química Farmacia, Universidad Central Marta Abreu de Las Villas. Carretera a Camajuaní km 5 ½, Santa Clara, Villa Clara, Cuba.

*mgonzalez@uclv.edu.cu

2. Grupo de Análisis de Procesos, Facultad de Ingeniería Química, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Cujae. Calle 114 No. 11901 e/Ciclovía y Rotonda, La Habana, Cuba

RESUMEN

Se aplicó una metodología para la integración de la termocompresión de vapor (TVC) en un evaporador múltiple efecto (EME) del proceso de producción de azúcar. El objetivo se centró en reducir el consumo de energía. Se comprobó que la TVC integrada a un EME es un sistema más eficiente que uno que funciona sin integración de un TVC. Del análisis de la literatura se pudo apreciar que la práctica común en el uso de TVC, es comprimir el vapor del último efecto y alimentar el vapor de presión media al primer efecto, favoreciendo la reducción del consumo de vapor de escape. Esta disposición del TVC no garantiza el óptimo energético. En el trabajo se garantizó la localización óptima del TVC maximizando la relación de flujo del vapor producido en el EME y el vapor de alta presión que se alimenta al TVC. El estudio se complementó con la integración energética (análisis pinch), del EME-TVC.

PALABRAS CLAVE: evaporador múltiple efecto, termocompresor de vapor, análisis pinch, integración energética.

ABSTRACT

A methodology for the integration of steam thermocompression (TVC) in a multiple effect evaporator (MEE) of the sugar production process was applied. The goal was to reduce energy consumption. It was verified that the integrated TVC to an MEE is a more efficient system than one that works without integration of a TVC. From the literature analysis was observed that the common practice in the use of TVC is to compress the vapor from the last effect and to feed the medium pressure vapor to the first effect favoring the reduction of the consumption of exhaust steam. This arrangement of the TVC does not guarantee the optimum energy. In the paper the optimum location of the TVC was guaranteed maximizing the flow rate of the vapor produced in the MEE and the high pressure vapor that is fed to the TVC. The study was complemented by the energy integration (pinch analysis) of the MEE-TVC.

KEYWORDS: multiple effect evaporator, thermo-vapor compressor, pinch analysis, energy integration.

INTRODUCCIÓN

En la literatura se han publicado varios trabajos en los que se reportan diferentes técnicas para reducir el consumo de energía en un evaporador de múltiple efecto (EME), entre estas se encuentra la termocompresión de vapor (1, 2). La termocompresión de vapor (TVC), se emplea para comprimir el vapor de baja presión extraído del EME, con la ayuda de un vapor de alta presión y produ-

cir vapor de presión media. La TVC puede ayudar a mejorar la eficiencia energética en una fábrica de azúcar en condiciones reales (3). Sharan and Bandyopadhyay (4), realizaron la integración térmica de un evaporador múltiple efecto con termocompresión de vapor proponiendo una metodología para la localización óptima del termocompresor. Estos autores demostraron que integrando el termocompresor con el múltiple efecto se logra una reducción del consumo de vapor de escape. No

obstante, dicha integración no garantiza el óptimo energético; la integración de la TVC en un EME debe maximizar la relación GOR (por sus siglas en inglés, Gain Output Ratio), que no es más que la relación entre el flujo de vapor producido por el EME y el flujo de vapor alimentado al TVC.

La eficiencia de un sistema integrado EME-TVC depende de los parámetros de operación temperatura, presión etc., del vapor motriz y del vapor de baja presión que entra al TVC. Al-Juwayhel *et al.* (5), Bin Amer (6), Samake *et al.* (7), mostraron que el GOR para un TVC integrado en un simple efecto, en un sistema de desalinización se incrementa con la presión y la temperatura del vapor motriz. Otros resultados similares fueron reportados para el sistema TVC-EME de El-Dessouky *et al.* (8) y Kamali *et al.* (9), en cuyos trabajos comprobaron que, con la variación del flujo del vapor motriz con respecto al punto de diseño, el GOR del sistema EME-TVC disminuye.

La localización de la posición de succión del TVC en el EME juega un rol fundamental en la minimización del consumo de energía en el sistema EME-TVC. En ese sentido, Alasfour *et al.* (10), estudiaron 3 configuraciones para un séxtuple efecto: EME-TVC sin calentamiento, EME-TVC con calentamiento y EME-TVC con extracción de vapor del tercer efecto. La segunda configuración fue la más eficiente debido a la presencia del calentador, mientras que la tercera configuración dio un menor requerimiento de área. Kouhikamali *et al.* (11), estudiaron el efecto del cambio en la localización de la succión del TVC para un sistema de desalinización, como resultado obtuvieron que el GOR para el sistema se incrementó y la presión de succión del vapor de entrada se desplazó desde el último al efecto del medio. Otros autores como Sayyaadi *et al.* (12) reportaron que el último efecto es el óptimo para la localización del TVC. En cambio, Dadhah y Mitsos (13), emplearon una optimización multiobjetivo para minimizar el área específica de un múltiple con 12 vasos y maximizar el GOR y observaron que variando la posición de la succión del TVC del último a un efecto intermedio, el GOR se incrementa y el área requerida para la transferencia de calor disminuye.

Como puede apreciarse son varios los trabajos en los que se reportan diferentes procedimientos para la operación de la TVC en un EME, los que se han referido se pueden agrupar en 2 tipos: aquellos que muestran las ventajas de la TVC integrada a un EME a través de la maximización de la eficiencia energética del EME y otros en los que se optimiza la posición de succión del TVC. Los autores de este trabajo consideran que ambos elementos deben tenerse en cuenta al diseñar un sistema integrado TVC-EME.

En este artículo, se aplica en un evaporador múltiple efecto del proceso de producción de azúcar a partir de caña, la metodología desarrollada por Sharan and Bandyopadhyay (4). La metodología guía los pasos para la integración de un TVC a un EME con máxima eficiencia energética, así como para la localización de la posición de succión óptima del TVC.

MATERIALES Y MÉTODOS

En esta sección se detallan los métodos empleados para el análisis de la aplicación de la termocompresión de vapor en el proceso de producción de azúcar.

Gran Curva de Composición (GCC) de un EME

Sharan y Bandyopadhyay (4), representaron el EME en la forma de una Gran Curva de Composición (GCC), y explicaron en detalle la metodología para la generación de los datos de flujo de proceso para el EME. A partir de la GCC se pueden calcular los requerimientos externos de utilidad caliente para completar la vaporización en el primer efecto y fría para el enfriamiento del condensado en el último efecto. El punto en el cual la curva toca al eje "y", se denomina punto pinch y es el punto que limita la integración de energía máxima posible entre los flujos térmicos.

Localización del efecto óptimo para la succión del TVC

El efecto óptimo para la succión del TVC debe cumplir con el teorema de maximizar el GOR de un sistema integrado EME-TVC con K efectos. Por tanto, el efecto "n" de succión óptima para el TVC será aquel en el que se tenga una mayor relación GOR.

El-Dessouky *et al.* (8), demostraron que para una operación estable del TVC la relación de compresión no debe ser mayor de 1,81 y que para este valor, el efecto óptimo para la succión del TVC es el primero cuando se trata de un sistema de 2 efectos, si se incrementa a un sistema de 3-5 efectos, el efecto óptimo resultó ser el segundo y GOR se reduce ligeramente. El DT_{min} se mantiene constante e igual a 10 °C.

La eficiencia de sistema de TVC depende de parámetros tales como presión del vapor motriz, temperatura de saturación del vapor extraído, relación de compresión, relación de expansión. La relación de compresión se define como la relación de presión del vapor de presión media producido por el TVC y el vapor de baja presión que entra al TVC, es decir la presión de descarga vs presión de succión. La relación de expansión es la relación

entre la presión del vapor motriz y la presión en la succión.

Power (14), construyó una gráfica para calcular una relación de mezclado, tomando como base resultados experimentales. La relación de mezclado se define como la relación entre el flujo de masa del vapor motriz y la relación del flujo del vapor extraído.

Desplazando la posición de succión del TVC del último efecto al primero se incrementa el requerimiento de utilidad del EME. Simultáneamente la presión del vapor extraído también se incrementa, resultando en una disminución de la relación de compresión y de la relación de expansión del TVC. La relación de mezclado disminuye. Esto conduce a un incremento en el flujo de vapor de entrada y por tanto significa más ahorro de energía. El balance entre el incremento en el requerimiento de utilidad y el incremento en el ahorro de energía debe ser explotado para obtener la localización óptima de la posición para la succión del TVC.

Procedimiento para la integración del TVC con el EME

Paso 1: Definir los parámetros de entrada: flujo de la alimentación, número de efectos, parámetros de operación en cada efecto y ΔT_{EME} .

Paso 2: Se asume igual vaporización para todos los efectos ($V_{1, inicial}=V_{2, inicial}=V_{K, inicial}=W/K$) y $V_{e,n}=0$. Calcular el flujo de alimentación F_n para una alimentación paralela, la concentración del licor y el flujo del licor, así como la cantidad total de vapor producido.

Paso 3: Empleando el teorema propuesto calcular la posición óptima para la succión del TVC, que es lo mismo que calcular donde se alcance mayor GOR.

Paso 4: Determinar los datos de flujo del proceso para el EME, generar la GCC y calcular el requerimiento de utilidades calientes y frías.

Paso 5: En la GCC desplazar del eje "y" cada efecto (el desplazamiento corresponde al requerimiento de calor para que ocurra la vaporización en cada vaso). La suma de los desplazamientos por cada efecto será igual a dV_n y este valor debe sumarse al requerimiento de utilidad caliente para obtener el nuevo flujo de vapor.

Paso 6: Calcular el flujo de vapor extraído del efecto "n", correspondiente al efecto óptimo (calculado en el paso 3).

Paso 7: El valor inicial de flujo de vapor es reemplazado con el nuevo valor y el procedimiento del paso 4 se repite, hasta que se obtenga el máximo GOR.

En este trabajo el procedimiento anterior se aplicó en el EME de una fábrica de azúcar. Se evaluaron dos alternativas para la obtención de la posición de succión óptima. En una, se sitúa el TVC después del último efecto y el vapor comprimido se alimenta al primer efecto; mientras que en la otra se sitúan dos TVC, uno para comprimir el vapor del cuarto efecto al tercero y otro del tercero al primero.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la tabla 1 se muestran los resultados de consumo de vapor para cada alternativa.

En la figura 1, se muestran los resultados obtenidos al aplicar la metodología considerando 5 efectos. En la figura se muestra la variación de la GOR con el incremento del número de efectos. Para un EME de 3 efectos el GOR para un sistema sin TVC es de 3,42. Si el TVC se localiza después del último efecto, el GOR se incrementa a 3,93 significando una mejora de 14,9 %. Con la integración óptima del TVC, el GOR se incrementa hasta 5,05 significando una mejora de 28,5 % (47,7 % de mejora total). Con el incremento del número de efectos hay ligera mejora en el GOR si el TVC se localiza después del último efecto, por ejemplo, para un EME de 5 efectos, el GOR para un sistema sin TVC es de 5,05; mientras que para un sistema con TVC que se localice después el último efecto es 5,07. Esto se debe a la diferencia

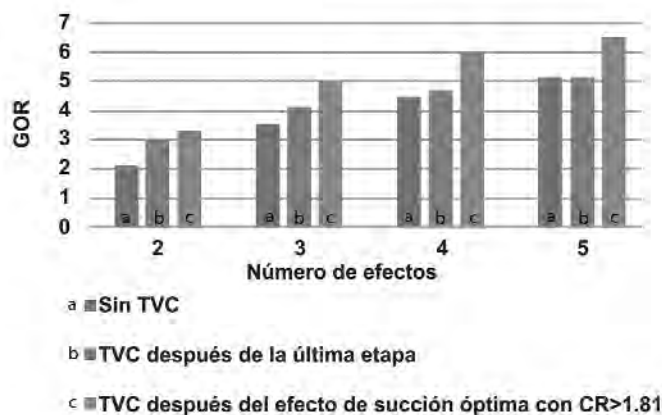


Figura 1. Variación de GOR con el número de efectos.

Tabla 1. Consumo de vapor de las alternativas evaluadas

	Base	Alternativa 1	Alternativa 2
Consumo de vapor en EME, kg/t de caña	166,3	140,2	145,4
Reducción en EME, %	-	15,69	12,56

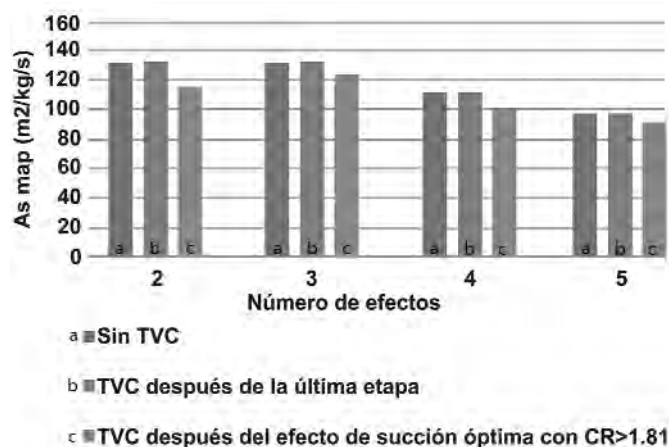


Figura 2. Variación área específica requerida del evaporador.

de temperatura (muy alta), entre la operación del primer y el último efecto, lo que conduce a una alta relación de mezclado. Si el TVC es dispuesto de manera óptima, lo que para el caso de estudio resultó ser en el segundo efecto, el GOR es de 6,50 (28,7 % de mejora total).

Otro elemento importante a añadir en el análisis es que, en un EME, existen tres tipos diferentes de área requeridas para la transferencia de calor: el área requerida para la evaporación (A_{evap}), el área del condensador requerida para el enfriamiento del vapor del último efecto y la integración del licor, (A_{cond}); y el área del intercambiador de calor ($A_{\text{H/E}}$) para el intercambio de calor entre el licor y el condensado. El área del evap-

rador disminuye si K se incrementa de 2 a 5 a DTmin constante de 10 °C. Esto se debe a que, con el incremento del número de efectos, el efecto de la temperatura de operación se incrementa, como resultado U_{evap} se incrementa. Si el TVC se localiza después del último efecto, el área del evaporador permanece casi igual a si se tiene un EME solo, figura 2. Sin embargo, con la integración óptima del TVC el área del evaporador se reduce en 7,7 % para un EME de 2 efectos y en un 5,2 % para EME de 5 efectos. Los resultados obtenidos refuerzan la importancia de la integración óptima del TVC - EME y de la determinación de la posición óptima para la succión.

CONCLUSIONES

La TVC integrada a un EME resulta un sistema más eficiente en comparación con un EME que funciona sin integración de un TVC. La integración de la TVC al EME reduce los requerimientos de utilidad fría como resultado de la reducción del área del condensador y maximiza la GOR del EME. Es frecuente que la localización del TVC sea después del último efecto pero esto no garantiza una solución óptima desde el punto de vista energético.

Debido a la localización óptima de la succión del TVC, la vaporización para las etapas iniciales se incrementó (teniendo mayor coeficiente de transferencia de calor), resultando en una reducción del área específica requerida para el EME, es por esto que tanto el costo capital como los costos operacionales se reducen simultáneamente.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Esfahani, I. J.; Kim, J. T.; Yoo, C. K. A Cost Approach for Optimization of a Combined Power and Thermal Desalination System through Exergy and Environmental Analysis. *Ind. Eng. Chem. Res.* 2013, 52(32), 11099-11110.
2. Hamed OA, Ahmed KA. An assessment of an ejector compression desalination process. *Desalination* 1994; 96:103-11.
3. Rein P., 2007, Cane Sugar Engineering. Verlag Dr. Albert Bartens K. G, Berlin, Germany
4. Sharan P., Bandyopadhyay S., Integration of thermo-vapor compressor with multiple-effect evaporator. *Applied Energy* 184 (2016) 560-573.
5. Al-Juwayhel F, El-Dessouky H, Ettouney H. Analysis of single-effect evaporator desalination systems combined with vapor compression heat pumps. *Desalination* 1997; 114:253-75.
6. Bin Amer AO. Development and optimization of ME-TVC desalination system. *Desalination* 2009;249: 1315-31.
7. Samake O, Galanis N, Sorin M. Thermodynamic study of multi-effect thermal vapour-compression desalination systems. *Energy* 2014; 72:69-79.
8. El-Dessouky HT, Ettouney HM, Al-Juwayhel F. Multiple effect evaporation- vapour compression desalination processes. *Chem Eng Res Des* 2000; 78:662-76.
9. Kamali RK, Abbassi A, Sadough Vanini SA, Saffar Avval M. Thermodynamic design and parametric

- study of MED-TVC. Desalination 2008; 222:596-604.
10. Alasfour FN, Darwish MA, Amer AOB. Thermal analysis of ME-TVC+MEE desalination systems. Desalination 2005; 174:39-61.
 11. Kouhikamali R, Sanaei M, Mehdizadeh M. Process investigation of different locations of thermo-compressor suction in MED-TVC plants. Desalination 2011; 280:134-8.
 12. Sayyaadi H, Saffari A, Mahmoodian A. Various approaches in optimization of multi effects distillation desalination systems using a hybrid meta-heuristic optimization tool. Desalination 2010; 254:138-48.
 13. Dahdah TH, Mitsos A. Structural optimization of seawater desalination: II novel MED-MSF-TVC configurations. Desalination 2014; 344:219-27.
 14. Power RB. Steam jet ejectors for the process industries. New York: McGraw- Hill; 1994.
-