



Revista Industrial
y Agrícola de
Tucumán

ISSN 0370-5404

En línea
1851-3018

Tomo 101 (2):
13-19; 2024



ESTACION EXPERIMENTAL
AGROINDUSTRIAL
OBISPO COLOMBRES
Tucumán | Argentina

Av. William Cross 3150
T4101XAC - Las Talitas.
Tucumán, Argentina.

Fecha de
recepción:
09/09/2024

Fecha de
aceptación:
04/06/2025

Recompresión de vapor como alternativa de ahorro de agua en los condensadores barométricos de un ingenio azucarero

Marcos Noé Russo* y Oscar Antonio Diez*

*Sección Ingeniería y Proyectos Agroindustriales, EEAOC. Email: mrusso@eeaoc.org.ar

RESUMEN

Se analizó la factibilidad de termocomprimir los vapores enviados a los condensadores barométricos en tándem de evaporación de cuatro y cinco efectos, con el objeto de anular el uso de agua fresca en dichos condensadores. Se compararon consumos energéticos y consumo de agua fresca a condensadores. Con la estrategia propuesta se muestra que es factible el uso de termocompresión para la disminución de captación de agua en la industrialización de la caña de azúcar sin comprometer los recursos energéticos, manteniendo la demanda de vapor entre 50% y 53% caña.

Palabras clave: termocompresión, condensador barométrico, ahorro agua.

ABSTRACT

Vapor recompression as a water-saving alternative in barometric condensers of a sugar mill.

The feasibility of thermocompressing vapors sent to the barometric condensers in 4 and 5-effect tandem evaporation was analyzed, with the aim of eliminating the use of fresh water for this operation. Energy parameters and fresh water consumption by the condensers were compared. The proposed strategy demonstrates the feasibility of using thermocompression to reduce water consumption in the sugar cane industrialization process, without compromising energy resources, maintaining the steam demand between 50% and 53% cane.

Key words: thermo-vapor compressor, barometric condenser, water saving.

■ INTRODUCCIÓN

En el proceso de fabricación de azúcar, los equipos destinados a mantener el vacío en las operaciones de evaporación son de vital importancia, dado que involucran dos aspectos de alto impacto económico. Por un lado, el vacío permite llegar a la ebullición a menor temperatura y a la vez, utilizar los vapores vegetales para calefactar sistemas con menor presión. Otro aspecto se encuentra referido a que trabajar a bajas temperaturas implica menor velocidad de formación de color.

El equipo habitual para generar este vacío es el condensador barométrico. En esencia, este no es más que un recipiente donde se ponen en contacto directo vapor y agua fresca, generando la condensación del vapor; con ella, una contracción del volumen y por consiguiente, la generación del vacío.

Si bien este dispositivo cuenta con gran popularidad por su simplicidad, bajo costo y fácil mantenimiento, presenta una desventaja: una alta tasa de consumo de agua, la cual ronda los 25 kg de agua/kg de vapor; referido a la molienda, el consumo promedio del condensador barométrico de evaporación de jugos es de 2,250 metros cúbicos por tonelada de caña (m^3/t caña) (Salazar *et al.*, 2021).

Las sequías de los últimos años acentuaron los problemas de agua disponible, algunos ingenios carecen de fuentes de agua holgadas para sostener todas las demandas de la fábrica, y quienes hoy están cubiertos no tienen garantías del abastecimiento de este recurso natural. Minimizar la captación no sólo es una cuestión de cuidado del recurso, sino que minimiza a la vez los costos de adquisición y de posterior tratamiento (Klemeš, 2012).

En los últimos años, para contrarrestar esta desventaja, la termocompresión de vapores ha cobrado relevancia, sobre todo en procesos de desalinización de agua de mar (Mazini *et al.*, 2014; Askari and Ameri, 2020; Menasri *et al.*, 2022).

En la recompresión térmica de vapor (o termocompresión), dicha operación se realiza a través de un eyector de vapor, y en procesos como en la desalinización de agua de mar, es un factor clave para aumentar la eficiencia del proceso propiamente dicho (Hassan and Darwish, 2014). En un eyector hay dos entradas: una que toma el vapor de alta presión, y otra que admite el vapor succionado de baja presión, dando como resultado una mezcla que posee propiedades termodinámicas intermedias entre las de los flujos ingresantes (Figura 1).

La termocompresión cuenta con varias ventajas,

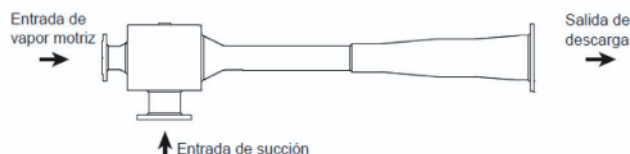


Figura 1. Eyector empleado en termocompresión de vapor. (Fuente: TLV, 2021).

entre ellas: construcción simple, diseño compacto, bajo costo capital y de operación y sin partes móviles ni mecanismos de revolución, lo que implica un mínimo mantenimiento; además, no necesita electricidad y los modernos

sistemas de control simplifican su funcionamiento (Spirax Sarco, 2015).

Entre los factores limitantes hay que citar que el consumo de vapor motriz puede resultar elevado, dando un exceso de vapor de descarga que quizás se deba ventear, y una limitada flexibilidad ante los cambios en las condiciones de operación (Everest, 2016).

En general, el último evaporador del tándem funciona a 0,2 atmósferas de presión, y los vapores de éstos son enviados a sus respectivos condensadores barométricos. Debido a su baja presión, dichos vapores tienen limitada aplicación como medio calefactor, por lo que se incurre en una pérdida de energía y un gasto importante de agua fresca al condensarlos.

El presente trabajo tiene como objetivo evaluar la posibilidad de termocomprimir los vapores vegetales que salen del último efecto del tándem de evaporación hasta las condiciones de vapor vegetal generado por la primera caja de un tándem de evaporación (VG1), el cual se utiliza para la calefacción de jugo encalado, jugo claro y tachos de cocimientos, a los fines de prescindir del uso de condensador barométrico en el proceso de concentración de jugo. Para ello, se tomó como caso base un ingenio tipo que cuenta con evaporación de cuatro o cinco efectos, y se comparó el consumo de agua y energía, antes y después de la termocompresión.

■ MATERIALES Y MÉTODOS

Para el desarrollo de este estudio se tomó como base una fábrica tipo de azúcar blanco directo, capaz de procesar 10.000 toneladas de caña por día (TCD), con destilería anexa en condiciones de procesar toda la melaza producida, y que consume 4,5 kg de vapor de escape por litro de alcohol producido. Dos escenarios fueron propuestos y posteriormente sometidos a evaluación: un sistema de evaporación de cuatro efectos y otro de cinco efectos.

Los sistemas de evaporación fueron resueltos con el simulador SIMCE 3.0 (EEAOC, 2005), el cual requiere algunos parámetros típicos de fábrica. Para este caso de estudio, dichos parámetros fueron los caudales de jugo encalado y jugo claro expresado en por ciento caña (%C), temperatura del vapor escape (VE), temperatura del jugo claro (ambas expresadas en °C), sólidos solubles en jugo claro y melado (% Brix), temperatura del vapor del último efecto (°C) y valor medio de pérdidas por radiación en el sistema de evaporación. Los valores adoptados se presentan en la Tabla 1.

En el sistema de evaporación se realizaron extracciones de vapor vegetal (VG) desde el primer efecto hasta el cuarto. La extracción de VG1 se utilizó para alimentar dos calentadores, uno de jugo claro (de 95°C a 100°C) y otro de jugo encalado (de 90°C a 103°C) y abastecer de vapor de calefacción el sector de cocimiento. El resto de las extracciones de vapor tuvieron como destino tres diferentes etapas de calentamiento de jugo encalado (Figura 2).

Con respecto a las extracciones de vapor, fueron fijadas según las necesidades térmicas para un esquema de evaporación eficiente, lo que implica que se maximicen las extracciones intermedias.

Tabla 1. Valores promedio adoptados para la resolución del sistema de evaporación.

En la Tabla 2 se muestra el esquema de extracciones propuestas, donde T_e es temperatura de entrada al intercambiador; y T_s es temperatura de salida.

La estrategia de cocimientos considerada fue la misma para todos los escenarios y consistió en un sistema de tres templeas. El mismo fue resuelto planteando balances de materia en una hoja de cálculo Excel y, junto con el complemento Solver, se resolvió el conjunto de ecuaciones ajustado a restricciones establecidas según Paz *et al.* (1995). Aquí se calculó el consumo de VG1 para los tachos de cocimiento, asumiendo valores promedio para los contenidos de sólidos solubles en mieles, jarabes y magma.

Los consumos de agua en condensadores barométricos del tándem fueron calculados según la metodología propuesta por Salazar *et al.* (2021).

La estrategia de recompresión de vapor consistió en tomar el vapor que va a condensadores y termocomprimirlo hasta condiciones de VG1, de manera tal de aprovechar el mismo para satisfacer las necesidades energéticas

de los consumidores de VG1, tal como se muestra en la Figura 3.

• **Recompresión térmica de vapor o termo-compresión:** los cálculos de la potencia requerida por el eyector de estos sistemas se realizaron según catálogo de la firma TLV (2021). Previo a esto fue necesario establecer tres parámetros: la relación de compresión (Cr), definida como la presión de descarga sobre la presión de succión; y la relación de expansión (Er), que es el cociente entre la presión del vapor de alta y la presión de succión. Empleando ambos valores, se calculó la relación de mezclado (Mr), definida como el flujo de vapor de alta sobre el flujo de vapor de succión según metodología TLV. Una vez establecida la relación Mr se calculó la cantidad de vapor motriz necesario para realizar la termocompresión (vapor de alta presión) mediante la ecuación 1. El vapor de succión se obtuvo de la diferencia entre el vapor vegetal que sale del último efecto del sistema de evaporación ($VG_{\text{último efecto}}$) y el vapor destinado a calentador 1 ($VG_{\text{calentador 1}}$).

Tabla 2. Extracciones propuestas para los sistemas a analizar.

Calentamiento de jugo encalado (JE) y jugo clarificado (JC)		
Tipo de Jugo	Medio calefactor	Te-Ts [°C]
JE	VG4	20-50
	VG3	50-75
	VG2	75-90
	VG1	90-103
JC	VG1	95-100
	VE	100-119

Ecuación 1

$$Vapor_{motriz} = M_r \times Vapor_{succión}$$

Donde:

Ecuación 2

$$Vapor_{Succión} = VG_{últimoeffecto} - VG_{calentador1}$$

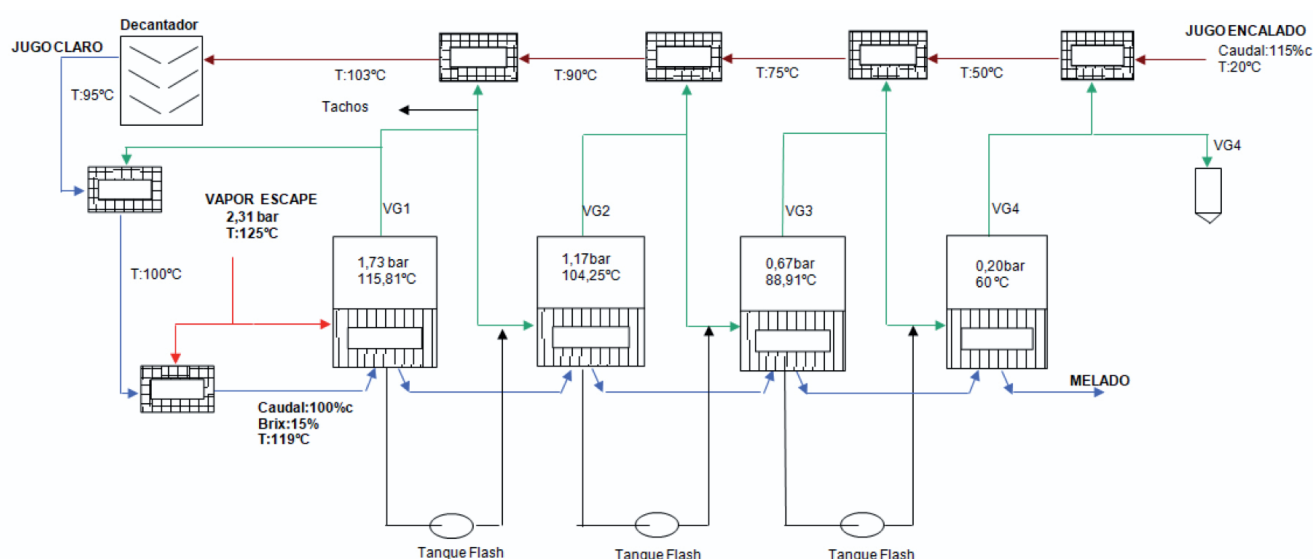


Figura 2. Configuración del sistema de evaporación del escenario 1.

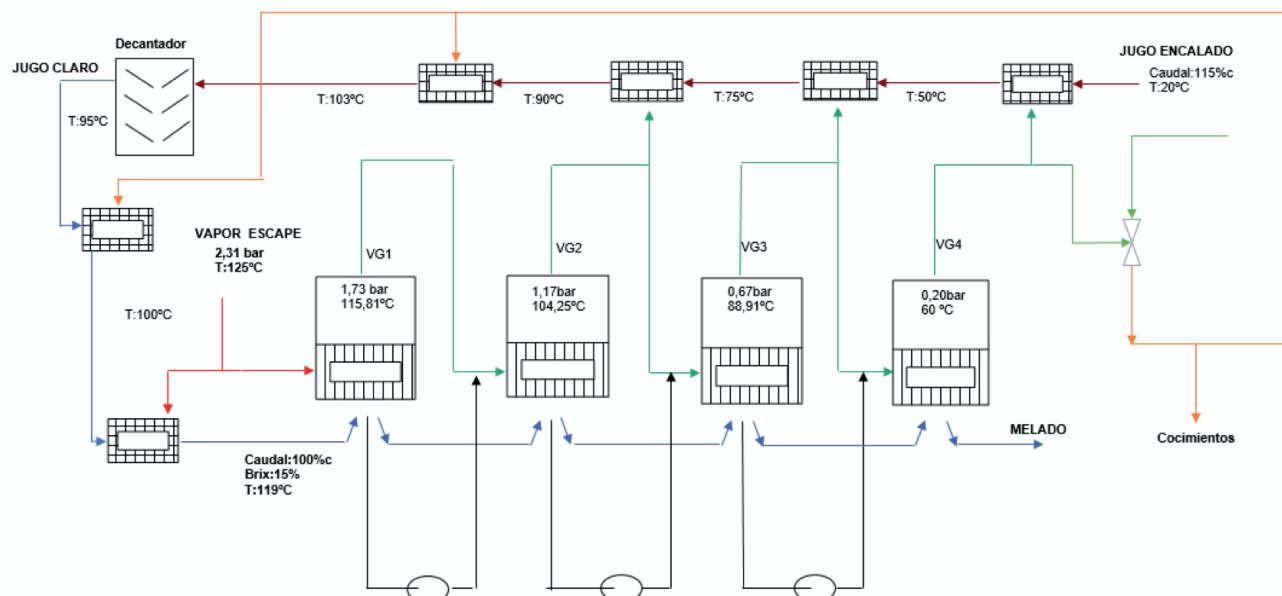


Figura 3. Configuración para el sistema de evaporación de 4 efectos y termocompresión.

Con el valor de vapor motriz obtenido se calculó, a través de la ecuación 3, el vapor total disponible a ser reutilizado en la fábrica.

Ecuación 3

$$Vapor_{Disponible} = Vapor_{motriz} + Vapor_{Succión}$$

Por último, para cada caso y situación estudiada se elaboraron en Excel diagramas de consumo de vapor, donde se determina el gas consumido, el vapor laminado y el vapor de escape venteado, como así también las demandas energéticas de los sistemas de recompresión. Estos cálculos permitieron realizar las comparaciones entre cada sistema.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados de las simulaciones realizadas con SIMCE se presentan en la Tabla 3. En ellas se observan el caudal de vapor de escape utilizado (VE) en el primer cuerpo, los vapores vegetales en cada cuerpo (VG) y las extracciones de vapor empleadas como medios de calefacción de jugo. Todos estos resultados fueron expresados en por ciento caña (%C).

Tabla 3. Resultados de las simulaciones realizadas con SIMCE de los sistemas de 4 y 5 efectos.

	Cuatro Efectos					Cinco Efectos				
	VE [%C]	37,09	VG1 [%C]	VG2 [%C]	VG3 [%C]	VE [%C]	34,92	VG1 [%C]	VG2 [%C]	VG3 [%C]
GENERAC. [%C]	VG1	36,23	VG2	16,86	VG3	14,52	VG4	10,43	VG1	34,87
	VG2	15,44	VG3	13,65	VG4	9,45	VG5	4,75		
EXTRACC. [%C]	VG1	20,437	VG2	3,1	VG3	5,02	VG4	5,77	VG1	20,357
	VG2	3,58	VG3	3,04	VG4	4,94	VG5	-		

De acuerdo a lo planteado por Salazar *et al.* (2021), se estimaron los caudales de agua empleados en los condensadores barométricos (m agua fría) a partir de los caudales de vapor a condensar, para los sistemas de evaporación. Los resultados son expresados en metros cúbicos por tonelada de caña y se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Cantidad de agua necesaria en condensadores barométricos de evaporación.

Agua necesaria para el condensador barométrico de la evaporación		
	VG último efecto [%C]	m agua fría [m³/t caña]
Cuatro efectos eficiente	4,66	1,165
Cinco efectos eficiente	4,75	1,187

En la Figura 4 se muestra el esquema de consumo de vapor por la fábrica propuesta, con sistema de evaporación de cuatro efectos, donde se detallan los consumidores de vapor vivo y los de escape, como así también la distribución de los vapores vegetal y el agua fresca a condensador. Todos los flujos están expresados en toneladas por hora, como en porcentaje caña.

Termocompresión (recompresión térmica de vapor)

Para el cálculo de la cantidad de vapor de alta presión se estableció el valor de presión de alta (P_a), y el valor de la presión de succión (P_s), el cual se corresponde con la presión de trabajo de la última caja del tandem de evaporación, mientras que la presión de descarga es la presión correspondiente a la de VG1 para cada caso. Con las presiones establecidas y el catálogo de TLV se calcularon las relaciones C_r , E_r y M_r . Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 5.

Los datos mostrados en la Tabla 5 permiten calcular, por medio de las ecuaciones 1 y 3, el vapor de alta necesario (motriz) y el vapor disponible para satisfacer las demandas energéticas de cocimientos, y calentadores.

La Tabla 6 muestra un resumen de la información

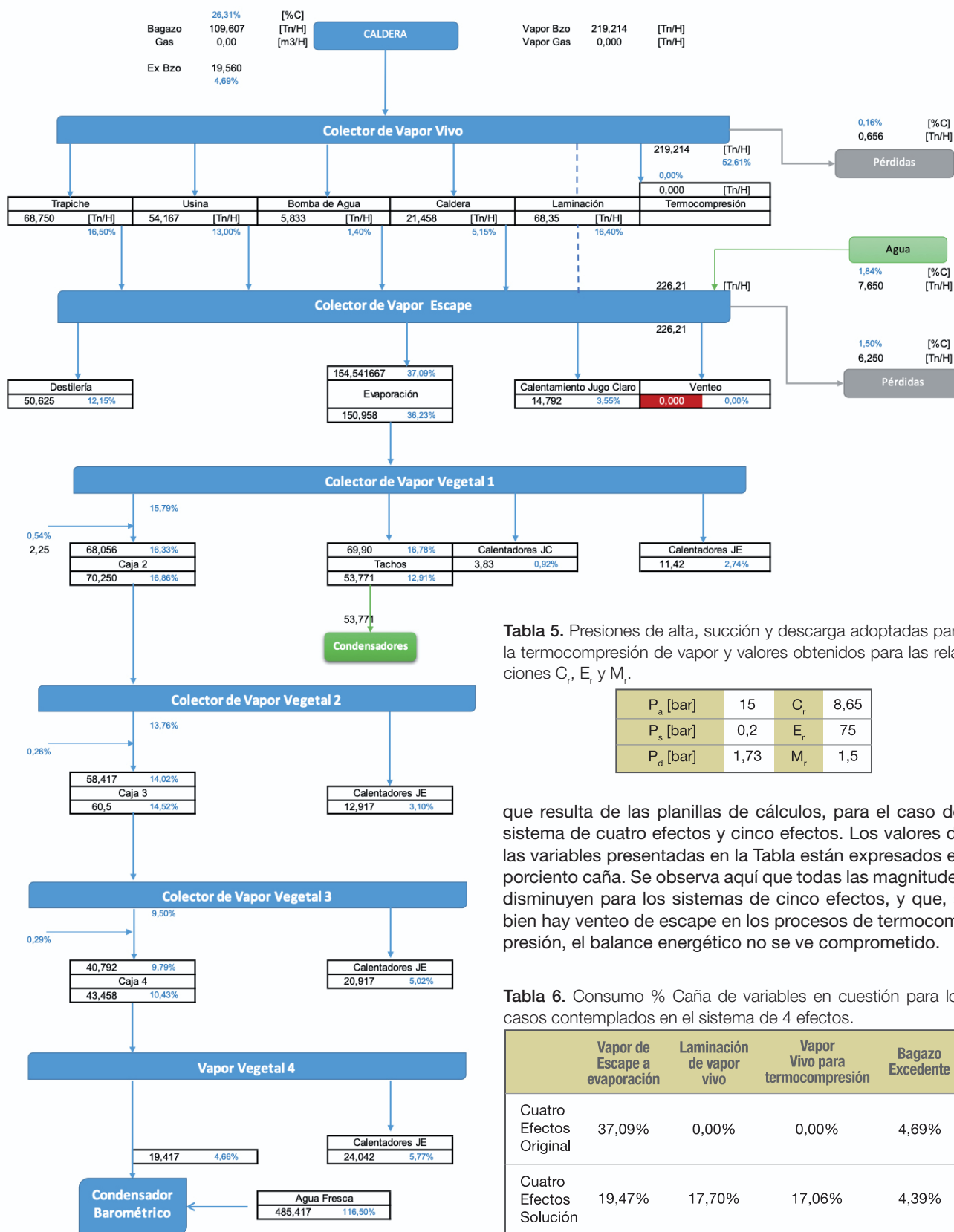


Figura 4. Flujo de vapor para un sistema con evaporación de cuatro efectos.

Tabla 5. Presiones de alta, succión y descarga adoptadas para la termocompresión de vapor y valores obtenidos para las relaciones C_r , E_r y M_r .

P_a [bar]	15	C_r	8,65
P_s [bar]	0,2	E_r	75
P_d [bar]	1,73	M_r	1,5

que resulta de las planillas de cálculos, para el caso del sistema de cuatro efectos y cinco efectos. Los valores de las variables presentadas en la Tabla están expresados en por ciento caña. Se observa aquí que todas las magnitudes disminuyen para los sistemas de cinco efectos, y que, si bien hay venteeo de escape en los procesos de termocompresión, el balance energético no se ve comprometido.

Tabla 6. Consumo % Caña de variables en cuestión para los casos contemplados en el sistema de 4 efectos.

	Vapor de Escape a evaporación	Laminación de vapor vivo	Vapor Vivo para termocompresión	Bagazo Excedente
Cuatro Efectos Original	37,09%	0,00%	0,00%	4,69%
Cuatro Efectos Solución	19,47%	17,70%	17,06%	4,39%
Cinco Efectos Original	34,92%	0,00%	0,00%	5,75%
Cinco Efectos Solución	18,19%	15,78%	13,86%	5,99%

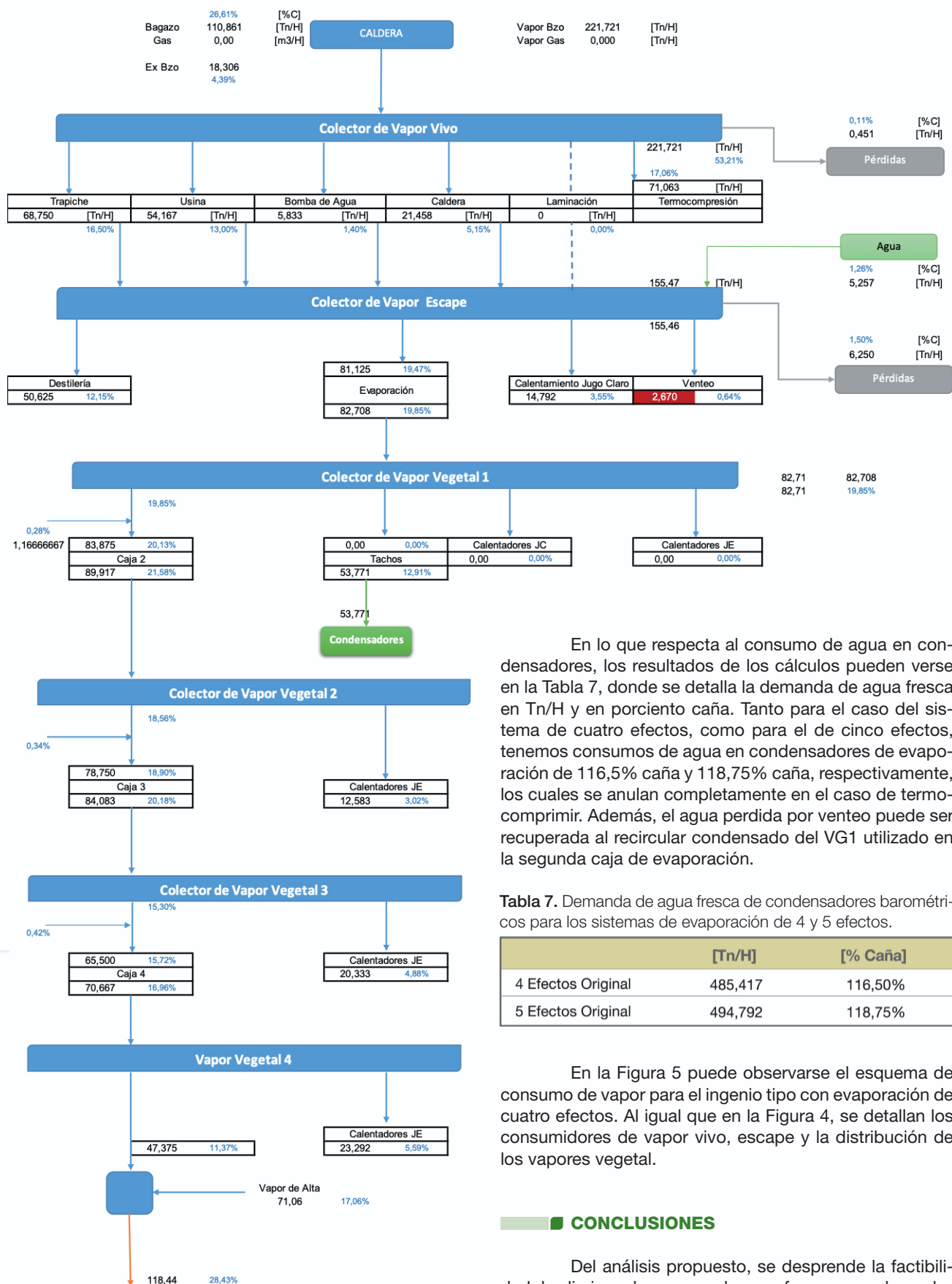


Figura 5. Flujo de vapor para un sistema con evaporación eficiente de 4 efectos y termocompresión del vapor vegetal de último efecto y cocimientos.

En lo que respecta al consumo de agua en condensadores, los resultados de los cálculos pueden verse en la Tabla 7, donde se detalla la demanda de agua fresca en Tn/H y en porcentaje caña. Tanto para el caso del sistema de cuatro efectos, como para el de cinco efectos, tenemos consumos de agua en condensadores de evaporación de 116,5% caña y 118,75% caña, respectivamente, los cuales se anulan completamente en el caso de termocomprimir. Además, el agua perdida por venteo puede ser recuperada al recircular condensado del VG1 utilizado en la segunda caja de evaporación.

Tabla 7. Demanda de agua fresca de condensadores barométricos para los sistemas de evaporación de 4 y 5 efectos.

	[Tn/H]	[% Caña]
4 Efectos Original	485,417	116,50%
5 Efectos Original	494,792	118,75%

En la Figura 5 puede observarse el esquema de consumo de vapor para el ingenio tipo con evaporación de cuatro efectos. Al igual que en la Figura 4, se detallan los consumidores de vapor vivo, escape y la distribución de los vapores vegetal.

CONCLUSIONES

Del análisis propuesto, se desprende la factibilidad de eliminar el consumo de agua fresca a condensadores en evaporación tanto para cuatro efectos como para cinco efectos, lo que implica una disminución de la captación en 116,5% caña y 118,75% caña, respectivamen-

te. Durante el cambio a sistema con termocompresión, el balance energético no se ve comprometido, dando como resultado una ligera disminución del excedente de bagazo, la cual incluso puede tomarse como despreciable.

BIBLIOGRAFÍA CITADA

Askari, I. B. and I. B. Ameri. 2020. Thermodynamic analysis of multi effect desalination unit with thermal vapor compression feed by different motive steam pressures. *Desalination and Water Treatment* (184): 57-71

Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres (EEAOC). 2005. SIMCE 3.0. Manual del usuario. Versión 3.0. [CD ROM]. EEAOC, Las Talitas, Tucumán, R. Argentina.

Everest. 2016. Catálogo: Mechanical vapour recompressors. (Disponible en: <http://www.everestblowers.com/everestblowers-data/uploads/2021/06/mvr-writeup-2016.pdf>)

Hassan, A. S. and M. A. Darwish. 2014. Performance of

thermal vapor compression. *Desalination*. Elsevier. 335: 41-46.

Klemeš, J. 2012. Industrial water recycle/reuse, *Current Opinion in Chemical Engineering* 1 (3): 238-245.

Menasria, R.; Trikia, Z.; M. Nadjib Bouaziza and B. Hamrounib. 2022. Energy and exergy analyses of a novel multi-effect distillation system with thermal vapor compression for seawater desalination. *Desalination and Water Treatment*. 246:54-67

Salazar, R. A.; C. A. Gómez; E. A. Feijóo; M. M. de los A. Coronel; R. M. Ruiz y D. Paz. 2021. Usos de agua en la industria suroenergética de Tucumán, R. Argentina. *Revista Industrial y Agrícola de Tucumán*. 98 (2): 37-45.

Spirax Sarco. 2015. Catálogo: SJT Steam Jet Thermocompressor (Disponible en: <https://content.spiraxsarco.com/-/media/spiraxsarco/international/documents/ca/ti/sjt-ti-p493-02-en.ashx?rev=00f217ab148b45fbb0ad38f5feb3587e>)

TLV. 2021. Catálogo: Compresor de vapor modelo SC. (Disponible en: https://www.tlv.com/global_pdf/tla/l-sc110-hp.pdf).