

Integración térmica en la producción de azúcar mediante análisis del pellizco

Thermal Integration in Sugar Production Using Pinch Analysis

Juan R. Vidal Medina¹  Andrés F. Rodríguez Valencia¹   Julián Pérez Marin²
Yuri U. López Castrillón¹ 

¹Profesor Titular, Universidad Autónoma de Occidente, Cali, Colombia.

²Ingenio del Cauca, Caloto, El Ortigal, Cauca, Colombia.

Resumen

Objetivo: el objetivo de este estudio es conceptualizar una red de intercambiadores de calor diseñada para minimizar el desperdicio de energía y mejorar la eficiencia global del sistema en la producción de azúcar.

Metodología: se adoptó un enfoque sistemático para analizar los flujos de energía dentro de la planta, identificando áreas clave de mejora, especialmente en los procesos de calentamiento y evaporación. Se desarrollaron acumulaciones de calor en cascada y análisis gráficos de curvas compuestas utilizando software especializado para optimizar el intercambio de calor.

Resultados: Los resultados indican un potencial de ahorro energético significativo, reduciendo el consumo de servicios públicos de frío y calor en la planta en un 7% y un 30%, respectivamente. La herramienta computacional desarrollada permite realizar integraciones energéticas desde procesos simples hasta aquellos con cientos de corrientes. El concepto de tecnología Pinch estimó un ahorro anual total de 464.850,08 USD en el proceso elegido.

Conclusiones: este estudio demuestra que la integración térmica mediante el análisis del pellizco no solo mejora la eficiencia energética en la industria azucarera, sino que también contribuye a una reducción considerable de costos operativos y al impacto ambiental, ofreciendo una herramienta valiosa para la sostenibilidad y competitividad de la industria.

Palabras clave: Herramienta computacional, integración térmica, identificación de sistemas, ahorro energético, metodología Pinch.

Abstract

Objective: the objective of this study is to conceptualize a network of heat exchangers designed to minimize energy waste and enhance the overall efficiency of the sugar production system.

Methods: a systematic approach was adopted to analyze energy flows within the plant, identifying key areas for improvement, particularly in heating and evaporation processes. Heat accumulations in cascades and graphical analyses of composite curves were developed using specialized software to optimize heat exchange.

Results: the results indicate a significant potential for energy savings, reducing the consumption of cooling and heating utilities in the plant by 7% and 30%, respectively. The developed computational tool allows for energy integration from simple processes to those with hundreds of streams. The pinch technology concept estimated an annual total savings of \$464,850.08 in the selected process.

Conclusion: this study demonstrates that thermal integration through pinch analysis not only improves energy efficiency in the sugar industry but also contributes to a considerable reduction in operational costs and environmental impact, providing a valuable tool for the industry's sustainability and competitiveness.

Keywords: Computational tool, thermal integration, system identification, energy savings, Pinch methodology

¿Cómo citar?

Vidal, J.R., Rodríguez, A.F., Pérez, J., López, Y.U. Thermal Integración térmica en la producción de azúcar mediante análisis del pellizco. Ingeniería y Competitividad, 2024, 26(3) e-21114315

<https://doi.org/10.25100/iyc.v26i3.14315>

Recibido: 03-07-24

Evaluado: 13-08-24

Aceptado: 16-09-24

Online: 9-10-24

Correspondence

afrodriguezv@uao.edu.co



CrossMark



OPEN  ACCESS

¿Por qué se llevó a cabo?

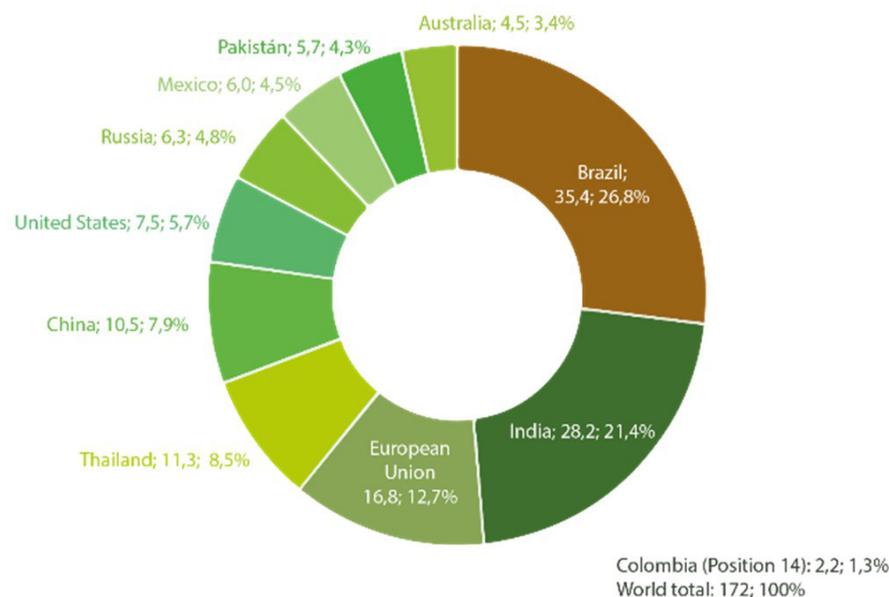
El estudio se llevó a cabo para abordar los importantes desafíos del consumo de energía y los costos operativos que enfrenta la industria de producción de azúcar, particularmente en el contexto del aumento de los precios de la energía y las crecientes preocupaciones ambientales. La investigación tuvo como objetivo implementar la metodología Pinch como un enfoque sistemático para optimizar la recuperación de calor y mejorar la eficiencia energética dentro del proceso de producción de azúcar de caña. Al identificar áreas clave para la mejora en los flujos de energía y desarrollar estrategias efectivas para la integración térmica, el estudio buscó mejorar la sostenibilidad del proceso de producción y, al mismo tiempo, reducir los costos. Esta iniciativa fue crucial para la industria, que a menudo experimenta altas demandas de energía y pérdidas térmicas sustanciales, por lo que necesita soluciones innovadoras para mejorar la competitividad general y reducir el impacto ambiental.

¿Cuáles fueron los resultados más relevantes?

Los resultados más relevantes del estudio destacaron un potencial significativo de ahorro de energía y beneficios económicos en el proceso de producción de azúcar mediante la aplicación de la metodología Pinch. Específicamente, la investigación indicó una reducción estimada del 7% en el consumo de servicios públicos de calor y del 30% en el consumo de servicios públicos de frío, lo que se traduce en ahorros anuales proyectados de aproximadamente 461.892 USD en costos de servicios públicos. Adicionalmente, el desarrollo de un programa informático especializado, Delta Pinch, facilitó el análisis y la optimización de los procesos térmicos, permitiendo una integración energética eficiente en varios escenarios operativos. Esta herramienta no solo redujo los tiempos de análisis al comparar diferentes diferencias de temperatura (ΔT_{min}), sino que también permitió el diseño de una red de intercambio de calor efectiva. Además, el análisis económico reveló que la implementación de la metodología Pinch podría generar ahorros sustanciales de costos, con una inversión inicial de 439,601.60 USD para un área de intercambio de calor de 1.483 m², lo que subraya el potencial de la metodología para mejorar la viabilidad económica y la sostenibilidad de la producción de azúcar.

¿Qué aportan estos resultados?

Los resultados del estudio contribuyen significativamente tanto a la sostenibilidad como a la viabilidad económica de la industria de producción de azúcar al demostrar estrategias efectivas para la optimización energética y la gestión de recursos. Al mostrar el potencial de ahorros sustanciales de energía y la reducción de costos operativos, los hallazgos subrayan la importancia de implementar la metodología Pinch como un medio para mejorar la eficiencia energética y minimizar el impacto ambiental. Esto no solo posiciona a la producción de azúcar como un sector más competitivo en un mercado cada vez más centrado en la sostenibilidad, sino que también proporciona un marco práctico para otras industrias que enfrentan desafíos energéticos similares. Además, el desarrollo del programa Delta Pinch representa una herramienta valiosa para ingenieros y profesionales de la industria, permitiéndoles analizar y optimizar los procesos térmicos de manera más efectiva. En general, estas contribuciones allanan el camino para mejoras continuas en las prácticas de gestión energética, fomentando un cambio hacia métodos de producción más sostenibles y reforzando el compromiso de la industria con la reducción de su huella de carbono.



Graphical Abstract

Introducción

La producción de azúcar y etanol a partir de la caña de azúcar es una de las principales actividades en el Valle del Cauca - Colombia, y uno de los sectores más críticos de la economía nacional (1). Con base en datos reportados por la Organización Internacional del Azúcar (OIA), tomando un promedio entre 2016 y 2020, Colombia continúa ubicándose como el 15 mayor productor y exportador de azúcar entre 110 productores mundiales y 115 exportadores. En promedio, entre 2016 y 2020, según cifras de la Organización Internacional del Azúcar (OIA), Colombia ocupó el lugar 14 entre los productores mundiales más importantes, pero con una participación de solo el 1,3% de la producción mundial, lo que equivale a un promedio de 2,6 millones de toneladas de azúcar y alcohol equivalente, producidas entre 2012 y 2021 (2). Además, de acuerdo con estos datos presentados por OIA, es evidente que Brasil es uno de los mayores productores de azúcar de América del Sur, con una participación del 26,8% de la producción mundial. En (3), se presentan diferentes estudios para mostrar alternativas para mejorar el proceso de producción industrial de la caña de azúcar en Brasil.

El estudio sobre la mejora de la producción de bioetanol a través de la integración térmica revela avances significativos en la eficiencia energética y la reducción de costos. Al integrar columnas de rectificación y destilación, el proceso logra ahorros de energía sustanciales, reduciendo notablemente la demanda de vapor en comparación con los métodos de destilación tradicionales. La aplicación de la tecnología Pinch optimiza aún más los requisitos de los servicios públicos, mejorando el perfil general de consumo de energía y aumentando la disponibilidad de bagazo de caña de azúcar para usos alternativos. Además, la evaluación de varios sistemas de cogeneración demuestra que la integración térmica optimizada puede mejorar el rendimiento de estos sistemas, permitiendo la venta de excedentes de electricidad a la red y reforzando la viabilidad económica de la producción de bioetanol (4). Los principales hallazgos del estudio sobre la mejora de la producción de bioetanol de segunda generación en biorrefinerías de caña de azúcar a través de la integración energética destacan el importante potencial del uso del análisis Pinch para optimizar el consumo de energía. La investigación demostró que los procesos integrados energéticamente pueden lograr una reducción en el consumo de energía de más del 50% en comparación con escenarios sin integración energética, y más del 30% en comparación con los procesos con integración de proyectos que se encuentran típicamente en las plantas industriales brasileñas. Esta optimización no solo mejora la viabilidad económica de la producción de etanol de segunda generación al disminuir los costos de los servicios públicos, sino que, también aumenta la disponibilidad de bagazo para la producción de etanol, contribuyendo así a una operación de biorrefinería más sostenible y eficiente (5). Dias y cols. (6) Utilizaron el análisis de pellizco para optimizar la integración térmica en la planta de producción de bioetanol mediante la identificación de los requisitos mínimos para los servicios externos de calor y frío y la maximización de la recuperación de calor de los flujos de proceso. A través de simulaciones, se determinó que el uso de un sistema de destilación de doble efecto permite que el 90% del bagazo de caña esté disponible para la hidrólisis, en comparación con el 76% con un sistema convencional. Esta integración conduce a un aumento del 26% en la producción de bioetanol, al tiempo que reduce eficazmente el consumo de energía.

Las plantas azucareras que venden excedentes de energía eléctrica o etanol tienen un alto potencial para mejorar el rendimiento energético a través de la integración del calor, según (7). La metodología Pinch es una técnica de recuperación de energía térmica

desarrollada en respuesta a la crisis del petróleo de la década de 1970, que evolucionó como una herramienta de optimización y diseño para redes de intercambio de calor (8). El objetivo de la metodología Pinch es la integración energética de los procesos para aumentar la eficiencia energética y el aprovechamiento de la energía de los flujos de proceso, reduciendo el consumo de calor y la demanda de sistemas de refrigeración. La metodología Pinch se ha implementado en operaciones industriales en todo el mundo, lo que ha dado como resultado importantes mejoras en la eficiencia energética y de capital; la mayoría de los esfuerzos con esta metodología se centran en determinar el consumo óptimo de carga externa, minimizar la descarga de calor residual y producir energía sostenible de acuerdo con (9)(10).

Los principios fundamentales de la metodología Pinch se utilizan para desarrollar y mejorar el diseño de procesos químicos. Específicamente, este método se aplicó en el proceso de producción de azúcar (1) y J. Carrillo presenta los resultados de la aplicación de la metodología Pinch a la integración energética del proceso de producción de alcohol anhidro en un ingenio azucarero. Esta aplicación generó alternativas que permiten una reducción del 8,5% en los costos asociados al consumo de vapor en calderas y el uso de agua de enfriamiento en el proceso (11). Esta metodología se implementó en la Refinería de Cartagena, Unidad de Desglose Catalítico de Colombia, para evaluar diversos procesos de separación (12). El análisis determinó que era necesaria una inversión de 143,453.28 USD en el proceso de licor y 20,993 USD en el proceso de alcohol para asegurar la modernización identificada a través de la utilización de la metodología Pinch. Este reacondicionamiento supondría un ahorro anual de 22.624,66 USD y 196.897,20 USD, respectivamente.

Por otra parte, al aplicar la metodología Pinch a un tándem de evaporación multiefecto, la recuperación de energía se maximiza cuando se produce la extracción de vapor para otros fines en los últimos efectos, caracterizados por vapores de menor presión según (13). Además, a través del análisis del proceso de producción combinado de azúcar y etanol utilizando la metodología Pinch, se identificaron ajustes a los parámetros de operación de la estación de evaporación como un medio para reducir la demanda de calor en correspondencia con (14). Además, se evaluaron los parámetros de producción para diferentes configuraciones de plantas de caña de azúcar, incluyendo escenarios donde todo el jugo de caña de azúcar se utiliza para la producción de etanol sin producción de azúcar, esto por (15).

El estudio de A. Ensinas y S. Nebra sobre la optimización termoeconómica en las fábricas de caña de azúcar revela hallazgos significativos en cuanto a la rentabilidad y el consumo de energía. El procedimiento de optimización condujo a una reducción notable en los costos totales en varios subsistemas, en particular logrando un ahorro del 33,6% en el sistema de evaporación, que representó el 73,8% de la reducción de costos general. La investigación demostró que el uso de purgas de vapor de los efectos posteriores de la evaporación disminuyó la demanda de vapor agotado, lo que permitió que el sistema evaporara la misma cantidad de agua con un 16% menos de energía (16). Por último, un análisis de Pinch realizado en una fábrica de azúcar reveló el potencial de una reducción del 9% en la demanda térmica mediante la optimización del área de evaporación mediante la sustitución de un efecto cuádruple por un impacto quintuple (17).

La tecnología Pinch obtiene beneficios económicos en varios otros sectores de la industria mediante el empleo de ahorros de energía. Por ejemplo, un estudio determinó el retorno de la inversión de un proceso de producción de poliuretano de una planta petroquímica

en 2,3 años de acuerdo con el (18). Asimismo, en la estación de evaporación de una planta de celulosa en Suiza, la implementación de la tecnología Pinch permitió modificar las condiciones de operación, reduciendo así el diferencial de temperatura requerido y las presiones en los efectos de la evaporación. En consecuencia, el consumo de energía térmica se reduce en un 20%, esto se puede verificar en (19). Del mismo modo, un análisis realizado en una columna de destilación atmosférica reveló que los servicios auxiliares representan más del 80% del consumo energético del tramo (20). La integración del precalentamiento con una red de intercambiadores de calor en la sección de destilación a través de cambios en las condiciones de funcionamiento del sistema se mejoró utilizando la metodología Pinch. Esta propuesta supuso una reducción de la demanda de energía en el horno de destilación en 9.855 kW, lo que equivale a 820.000 dólares anuales según (21). Un análisis del uso de agua dulce y la descarga de aguas residuales en un proceso de fabricación de azúcar se presenta en (22). Por último, la aplicación de la metodología Pinch en el área de molienda de una fábrica de pasta de papel dio como resultado un potencial de ahorro energético identificado de 18,5 MW, lo que corresponde a aproximadamente el 12% de la demanda actual de vapor (8).

Según Robin Smith (23), los avances clave en la integración de procesos desde su inicio incluyen la expansión de aplicaciones más allá de la conservación de energía para abarcar la eficiencia de las materias primas, la reducción de emisiones y las operaciones generales del proceso. La integración de los enfoques termodinámicos con la programación matemática ha permitido una resolución de problemas más eficaz. Además, el desarrollo de curvas compuestas ha mejorado la identificación de oportunidades de recuperación de calor, mientras que metodologías como el pellizco de red han facilitado la adaptación de los sistemas existentes. B. Linnhoff, H. Dunford y R. Smith (24) Avanzaron significativamente en la comprensión de la integración del calor en las columnas de destilación al enfatizar la necesidad de considerar estas columnas dentro del contexto más amplio del proceso general. Su trabajo demuestra que una integración eficaz puede conducir a ahorros sustanciales de energía, permitiendo que las columnas de destilación funcionen sin costos de servicios públicos. Subrayan la importancia de evitar cruzar el pellizco de recuperación de calor para lograr una integración óptima y advierten que los métodos tradicionales de ahorro de energía a veces pueden obstaculizar este objetivo. Al extender los principios establecidos de las redes de intercambiadores de calor a la destilación, los autores proporcionan un marco valioso para mejorar la eficiencia energética en los procesos químicos. La integración del calor ha contribuido significativamente al desarrollo económico y al ahorro de recursos al mejorar la eficiencia de la utilización de la energía en los procesos industriales. Según J. Klemes y Z. Kravanja (25), la metodología de integración de procesos (PI), que se originó a partir de la integración del calor, ha proporcionado enfoques sistemáticos para optimizar el uso de la energía, el agua y otros recursos. Esta optimización redujo los costos operativos y mejoró la sostenibilidad en los sectores de ingeniería química, mecánica y energética.

La principal contribución de la investigación desarrollada por P. Sabev Varbanov et al. (26) es la revisión sistemática y el análisis de las prácticas de extracción de datos (DE) en el contexto de la integración de calor (HI) y el análisis total del sitio. Los autores enfatizan la complejidad de la adquisición de datos que involucra a múltiples partes interesadas y la necesidad de una comprensión común de la semántica de los datos. Destacan la importancia de preservar la integridad de los datos y documentar el razonamiento detrás de la selección y exclusión de datos. Además, el documento formula un conjunto de requisitos de datos para la ED, con el objetivo de establecer un formato estandarizado que

incluya descriptores para el razonamiento detrás de las selecciones de flujos, mejorando así la calidad y confiabilidad de los datos utilizados en los procesos de HI.

El planteamiento del problema en esta investigación se centra en la necesidad de mejorar la eficiencia energética en la producción de azúcar de caña, que a menudo implica un alto consumo de energía y pérdidas térmicas significativas. La industria azucarera enfrenta desafíos de sostenibilidad y reducción de costos operativos, lo que hace imperativo encontrar estrategias efectivas para optimizar el uso de la energía. La pregunta de investigación a abordar es la siguiente: ¿Cómo se puede implementar la metodología Pinch para reducir el consumo de energía en el proceso de producción de azúcar de caña, y maximizar la recuperación de calor y minimizar los costos asociados?

El objetivo principal de este trabajo es desarrollar una estrategia para reducir el consumo de energía a través de la integración térmica del proceso de producción de azúcar de caña utilizando la metodología Pinch. La investigación consiste en caracterizar el sistema actual de recuperación de calor, proponer alternativas para mejorar la eficiencia energética y diseñar una red de intercambio de calor que minimice los costos totales. En primer lugar, el desarrollo de un programa informático denominado Delta Pinch es de notable importancia y, en segundo lugar, la aplicación de la metodología Pinch a las corrientes de un proceso de fabricación de azúcar se presenta como una valiosa contribución.

Metodología

Este estudio presenta la conceptualización de una red de intercambiadores de calor (HEN) para un ingenio azucarero ubicado en la región del Valle del Cauca, empleando tecnología Pinch. La metodología Pinch es un enfoque directo para investigar sistemáticamente los procesos industriales, basado en los principios fundamentales de la primera y segunda ley de la termodinámica, tal como se expresa en (27). La metodología para el desarrollo de una herramienta computacional para la implementación de la metodología Pinch que hemos utilizado se centra en la creación de software que facilite el análisis y la optimización de los procesos térmicos en la industria. Utilizando el entorno de programación Matlab, se desarrolla una interfaz gráfica de usuario que permite a los ingenieros interactuar con el programa de forma intuitiva. Esta herramienta se basa en los principios de la primera y segunda ley de la termodinámica, permitiendo la identificación de oportunidades para la recuperación de energía y la minimización de costos energéticos en procesos como el calentamiento, la evaporación y la cristalización en la producción de azúcar. A través de esta implementación, buscamos mejorar la eficiencia del diseño de redes de intercambio de calor y contribuir a la sostenibilidad del proceso productivo.

La figura 1 muestra la ventana inicial del programa. El panel datos en la parte superior muestra los datos incorporados al programa a lo largo del análisis. El panel cascada en el lado derecho de la ventana muestra dinámicamente el algoritmo de cascada de análisis de pellizco. En la parte inferior, dentro del panel de curvas, los resultados del análisis de pellizco se pueden mostrar a través de una serie de gráficos. Al tener dos espacios para graficar, el usuario puede comparar sus resultados si lo desea.

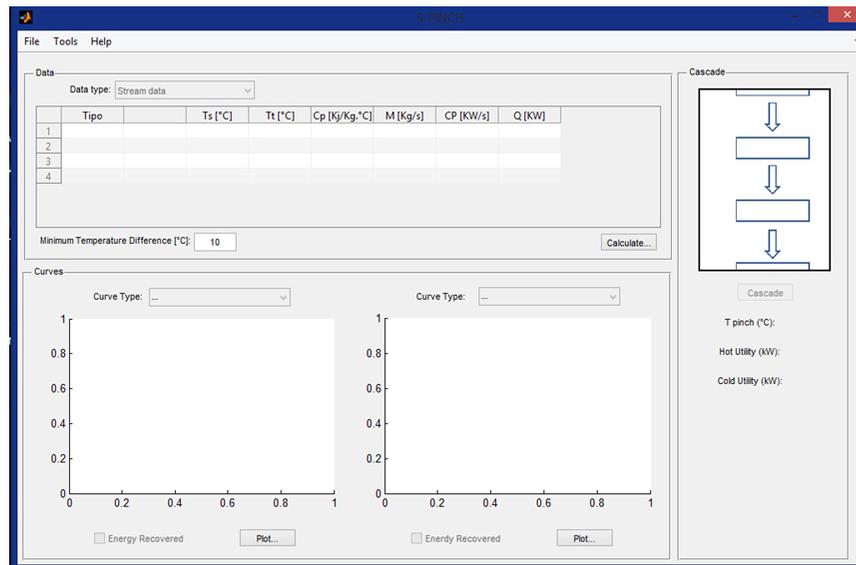


Figura 1. Interfaz gráfica del método Pinch.

Pasos para implementar la Metodología Pinch

Identificación de flujos calientes y fríos y utilidades de proceso: en el método Pinch, una corriente caliente disminuye su energía (la temperatura de salida es más baja que la temperatura de entrada, o hay condensación). Por el contrario, una corriente fría aumenta su energía (la temperatura de salida es más alta que la temperatura de entrada, o hay evaporación). Las utilidades de proceso son todos los fluidos adicionales utilizados como medio de enfriamiento (utilidades frías) o medios de calentamiento (utilidades calientes). Para este caso, identificamos las corrientes calientes y frías y los servicios públicos a partir del balance de masa y energía del proceso. La fiabilidad de estos datos es fundamental para tener resultados concluyentes y veraces. De este modo, podríamos confirmar los datos mediante instrumentos de medición actualmente en funcionamiento (18)(28).

Extracción de datos térmicos de procesos y servicios públicos: para cada flujo caliente, frío o utilidad identificada, se deben obtener los siguientes datos de proceso (18)(28):

Temperatura de suministro (Ts): es la temperatura a la que está disponible la corriente.

Temperatura objetivo (Tt): temperatura a la que se debe llevar la corriente.

Capacidad de flujo de calor (CP): producto entre el flujo másico y el calor específico del fluido.

Cambio de entalpía (H): está asociado a las corrientes que pasan por el intercambiador de calor.

Selección del valor inicial ΔT_{min} : la fuerza motriz mínima para la transferencia de calor dentro de un intercambiador de calor para que su diseño sea factible se conoce como ΔT_{min} . En la literatura especializada, se recomienda que, para este tipo de industria, este valor sea de aproximadamente 10°C. Sin embargo, puede variar para otras industrias (18)(28).

Construcción de curvas compuestas y la gran curva compuesta: una curva compuesta representa la suma de las corrientes del proceso. La curva compuesta caliente representa el conjunto de corrientes calientes y la curva compuesta fría representa el conjunto

de corrientes frías. El objetivo de una curva compuesta, con el ΔT_{\min} seleccionado, es entregar la cantidad de energía intercambiada por los flujos de proceso y el consumo mínimo de servicios de calor y frío. Esa gran curva compuesta se obtiene llevando a cabo la cascada de calor y también se acepta el consumo mínimo de servicios de frío y calor. Además, permite identificar la temperatura de pellizco y los niveles de temperatura del flujo de proceso o utilidad necesarios para cumplir con los requisitos del proceso (18)(28).

Diseño de la red del intercambiador de calor: una red de intercambio de calor es un diagrama en el que se puede observar la intersección de los flujos de proceso y los servicios públicos en los intercambiadores de calor. Este diseño debe considerar el ΔT_{\min} seleccionado, ya que está directamente relacionado con el área del intercambiador y el costo de los servicios públicos. Cuanto mayor es este ΔT_{\min} , más aumenta el costo de los servicios públicos y el área se vuelve más pequeña y viceversa (18)(28).

Selección de la ΔT_{\min} óptima: en esta última etapa, se determina un valor óptimo de ΔT_{\min} para el cual los costos totales se vuelven mínimos. Este proceso consiste en repetir toda la integración energética, seleccionando diferentes valores de ΔT_{\min} en cada repetición y representando gráficamente el costo para cada uno de estos valores. A partir del gráfico es posible estimar el punto de ΔT_{\min} donde el costo se vuelve mínimo (18)(28).

Análisis económico

El análisis económico de la investigación implicó varios pasos clave, comenzando con la recopilación de datos financieros relevantes de la planta de producción de azúcar, incluidos los costos operativos, las tasas de consumo de energía y los gastos de servicios públicos. Utilizando la metodología Pinch, el análisis identificó ahorros potenciales de energía, particularmente en procesos de calentamiento y evaporación, y calculó la reducción resultante en los costos de los servicios públicos. Se realizó un análisis de costo-beneficio para estimar el ahorro anual frente a la inversión inicial requerida para la red de intercambio de calor, lo que permitió calcular el retorno de la inversión (ROI) y el período de recuperación. Además, se realizó un análisis de sensibilidad para evaluar cómo las variaciones en variables clave, como los precios de la energía y los costos operativos, podrían afectar los resultados económicos.

Desarrollo de herramienta computacional en Matlab

Desarrollamos un algoritmo en Matlab R2023a para ejecutar el procedimiento mencionado anteriormente. Es imperativo determinar las corrientes y utilidades de la operación e identificar la información térmica asociada a ella. Esta información debe ingresarse manualmente en la herramienta o a través de una hoja de cálculo, como se muestra en la Figura 2.

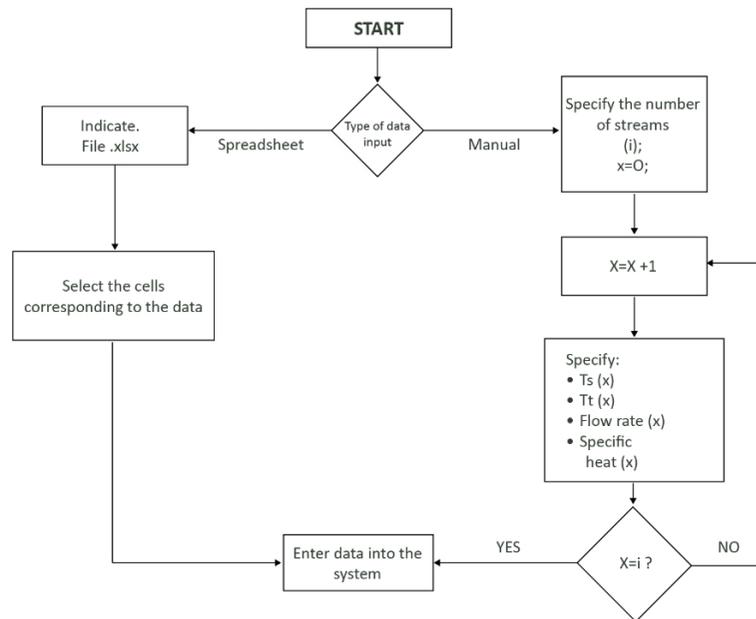


Figura 2. Diagrama de flujo de entrada de datos

Después de esto, la herramienta realiza el algoritmo de cascada de calor, obteniendo así la temperatura de pellicco y las utilidades de enfriamiento y calefacción que se pueden lograr. Las corrientes se reorganizan y se generan intervalos de temperatura, como se muestra en la Figura 3.

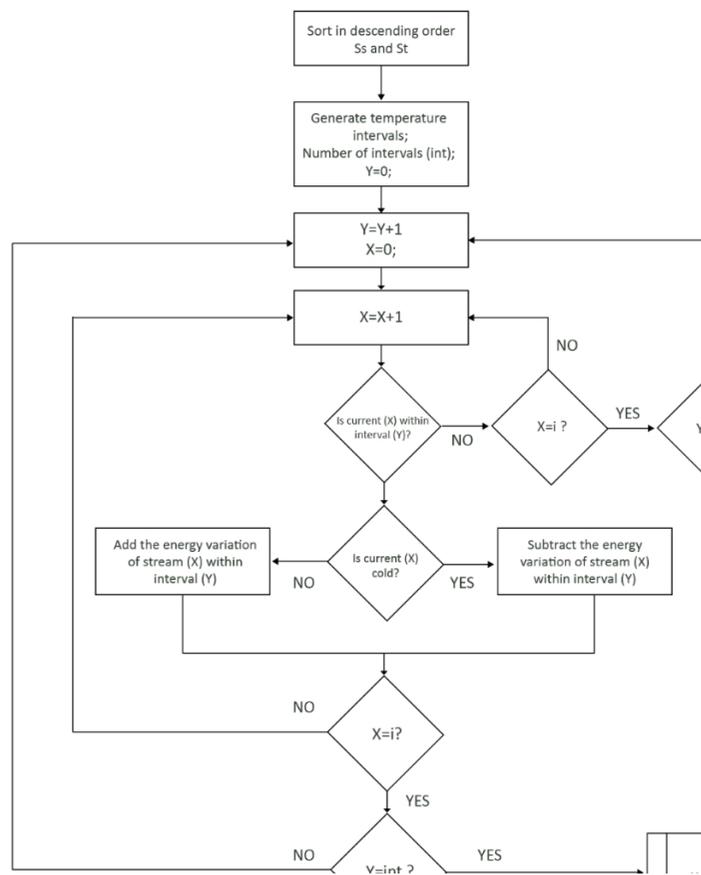


Figura 3. Diagrama de algoritmo de tabla de problemas

En este diagrama, se observa cómo termina en otro proceso llamado cascada. Este diagrama muestra el algoritmo de la tabla de problemas utilizada por la herramienta. Dependiendo del tipo de corriente, la corriente debe desplazarse a la mitad de la ΔT_{min} . La utilización de Matlab logra e incrementa la efectividad de la programación de la tecnología Pinch. Se crea una colección de algoritmos, que produce un programa capaz de realizar análisis de Pinch junto con una interfaz visual. Esta herramienta es de gran valor para los ingenieros especializados en eficiencia energética dentro de instalaciones industriales. Los datos incorporados al programa a lo largo del análisis se muestran en un panel de datos en la parte superior. El algoritmo de cascada de análisis de pellizco se muestra dinámicamente en el panel de cascada en el lado derecho de la ventana. A través de una serie de gráficos, los resultados del análisis de pellizco se observan en el panel curvas situado en la parte inferior. Si lo desea, el usuario puede comparar sus resultados utilizando los dos espacios disponibles para graficar. Es posible trazar curvas frías, calientes, compuestas y compuestas grandes en esta sección.

Características de los arroyos a integrar

Utilizamos la herramienta aplicada para tratar el jugo en una planta de producción de azúcar en el Valle del Cauca, Colombia. El tratamiento del jugo tiene como objetivo eliminar las impurezas que se encuentran en el jugo para mejorar su calidad. A continuación, la etapa es la fase de encalado, en la que se incorpora leche de cal y el zumo se calienta a una temperatura de 105 °C para facilitar las reacciones químicas. A continuación, el zumo calentado pasa por un tanque flash y un clarificador, donde las reacciones producen sedimentos que se depositan, separándolos así del zumo dirigido a los evaporadores clarificados. Después de eso, el material separado se filtra a través de filtros rotativos y prensas que funcionan bajo vacío. En esta etapa, el jugo que se encuentra en los sedimentos se recupera y se devuelve al proceso de encalado. El sedimento resultante se utiliza como fertilizante en el campo de caña de azúcar. La secuencia de operaciones en la etapa de tratamiento del jugo se ilustra en la figura 4.

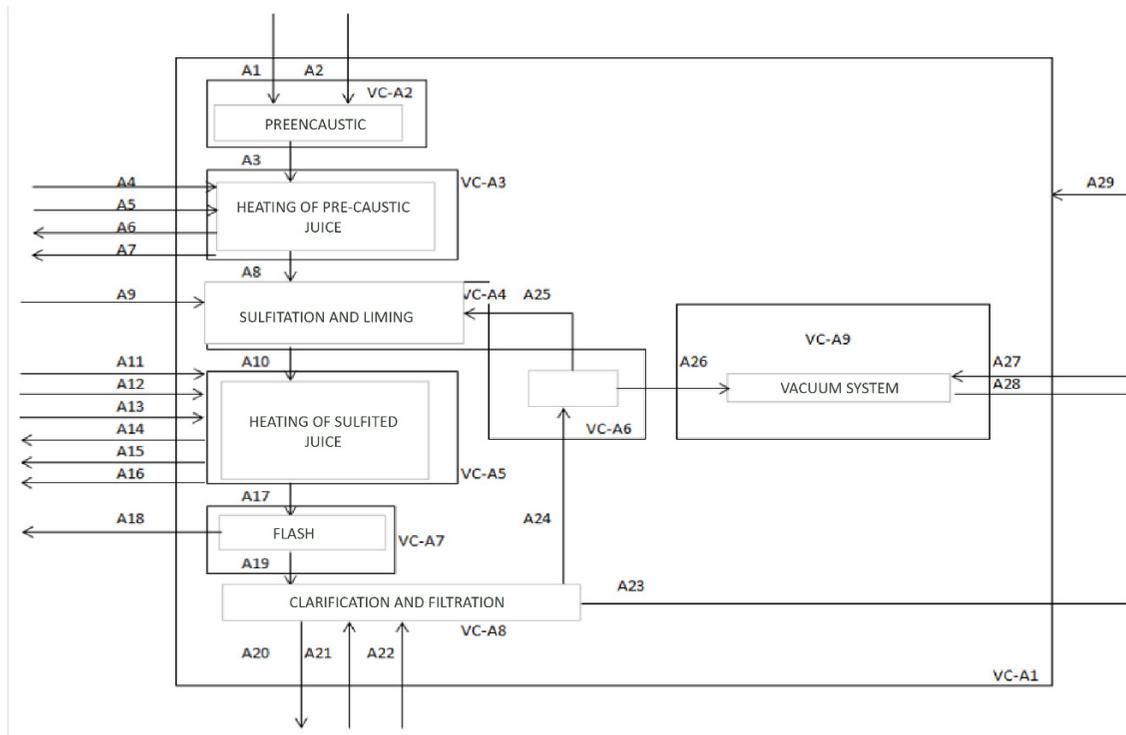


Figura 4. Secuencia de operaciones en la etapa de tratamiento del jugo (subsistema 1)

En la tabla 1 también se describe la etapa de operaciones de tratamiento de jugo (subsistema 1). La tabla 1 muestra la secuencia de operaciones para el proceso de calentamiento de jugo. Se determinaron diversos parámetros como caudales, temperaturas, presiones, entalpías y calores específicos a través de los balances de masa, sólidos solubles, sacarosa y energía.

El cambio de entalpía está asociado con las corrientes que pasan a través del intercambiador. Está dada por la primera ley de la termodinámica que se puede expresar en la Ec. (1):

$$\dot{Q} + \dot{W} = \Delta H \quad (1)$$

Tabla 1. Características de las corrientes del proceso de tratamiento de jugos

Variable	Descripción	Variable	Descripción
A1	Jugo crudo	A16	Condensados de vapor 1
A2	Lima	A17	Zumo de sulfito a 102°C
A3	Jugo pre-limado	A18	Vapor relámpago
A4	Agua condensada	A19	Jugo de sulfito para clarificar
A5	Vapor 4	A20	Jugo claro
A6	Agua condensada	A21	Bagazo
A7	Condensados de vapor 4	A22	Agua de lavado de tortas
A8	Zumo pre-encalado a 85°C	A23	Pastel de cachaça
A9	Dióxido de azufre y cal	A24	Jugo filtrado
A10	Jugo de sulfito	A25	Jugo recirculado
A11	Vapor 2	A26	Vapores de filtración de aire
A12	Vapor 3	A27	Agua para sistema de vacío
A13	Vapor 1	A28	Sistema de vacío de condensado
A14	Condensados de vapor 3	A29	Energía eléctrica
A15	Condensados de vapor 2		

El cambio de entalpía se puede expresar en términos del calor específico cuando se considera constante, dado por la Ec. (2):

$$\Delta H = C_p(T_s - T_0) \quad (2)$$

T_s es la temperatura Celsius o Kelvin a la que está disponible la corriente y T_0 es la temperatura en Celsius o Kelvin a la que se debe llevar la corriente y es el calor específico a presión constante en unidades de $[kJ/(kg \cdot K)]$. C_p

Una vez que todas las corrientes están representadas, los intercambiadores de calor se colocan entre ellas. En cada intercambiador de calor se indica el calor que se debe intercambiar y se calculan las temperaturas de entrada y salida de cada corriente a cada uno de ellos mediante Eqs. (3) y (4):

$$T_{\text{outlet,hot current}} = T_{\text{inlet,hot current}} - \frac{\dot{Q}}{\dot{m}C_p} \quad (3)$$

$$T_{\text{outlet,cold current}} = T_{\text{inlet,cold current}} + \frac{\dot{Q}}{\dot{m}C_p} \quad (4)$$

Un intercambiador de calor de carcasa y tubos es uno de los tipos de diseño de intercambiador, que cuenta con una gran cantidad de tubos empacados en una carcasa con parámetros importantes siendo su longitud y el número de pasos a través de la cáscara, normalmente estos son los más utilizados en el sector azucarero colombiano para calentar jugos. Para calcular las áreas de transferencia de calor, se utiliza el método logarítmico de diferencia de temperatura media para estimar el área de transferencia de calor, esto se expresa en la Ec. (5).

$$\dot{Q} = UA\Delta T_{\text{DMLT}} \quad (5)$$

\dot{Q} es la transferencia de calor en el intercambiador en vatios, U es el coeficiente de transferencia de calor general $[W/(m^2 \cdot ^\circ C)]$, A área de transferencia de calor y es la diferencia de temperatura media logarítmica. El valor de esta diferencia de medias logarítmicas entre los flujos se puede expresar mediante la Ec. (6). ΔT_{DMLT}

$$\Delta T_{\text{DMLT}} = \frac{(T_{\text{inlet,hot}} - T_{\text{outlet,cold}}) - (T_{\text{outlet,hot}} - T_{\text{inlet,cold}})}{\ln \left(\frac{T_{\text{inlet,hot}} - T_{\text{outlet,cold}}}{T_{\text{outlet,hot}} - T_{\text{inlet,cold}}} \right)} \quad (6)$$

$T_{\text{inlet,hot}}$ = La temperatura del fluido caliente a la entrada del intercambiador de calor.

$T_{\text{outlet,cold}}$ = La temperatura del fluido frío a la salida del intercambiador de calor.

$T_{\text{outlet,hot}}$ = La temperatura del fluido caliente a la salida del intercambiador de calor.

$T_{\text{inlet,cold}}$ = La temperatura del fluido frío a la entrada del intercambiador de calor.

Red de intercambio de calor de flujo del proceso de calefacción

El primer efecto es el consumo de vapor es muy alto para calentar jugo de sulfito, por lo que el subsistema de calentamiento 1 será el punto de partida y el más importante del análisis. Otro punto importante es que el jugo clarificado no se está calentando a la temperatura de saturación, por lo tanto, el sistema de evaporación no solo debe realizar su función principal de evaporar, sino que también debe realizar un proceso de calentamiento inicialmente, llevando el sistema a consumir más energía y en ocasiones a desequilibrar el proceso provocando pérdidas de tiempo en la fábrica.

Este estudio y rediseño de la red de intercambiadores de calor se centra, por su efecto en otros procesos, en el sistema de tratamiento de zumos. A continuación, la figura 5 muestra el sistema de tratamiento de jugo de chorro.

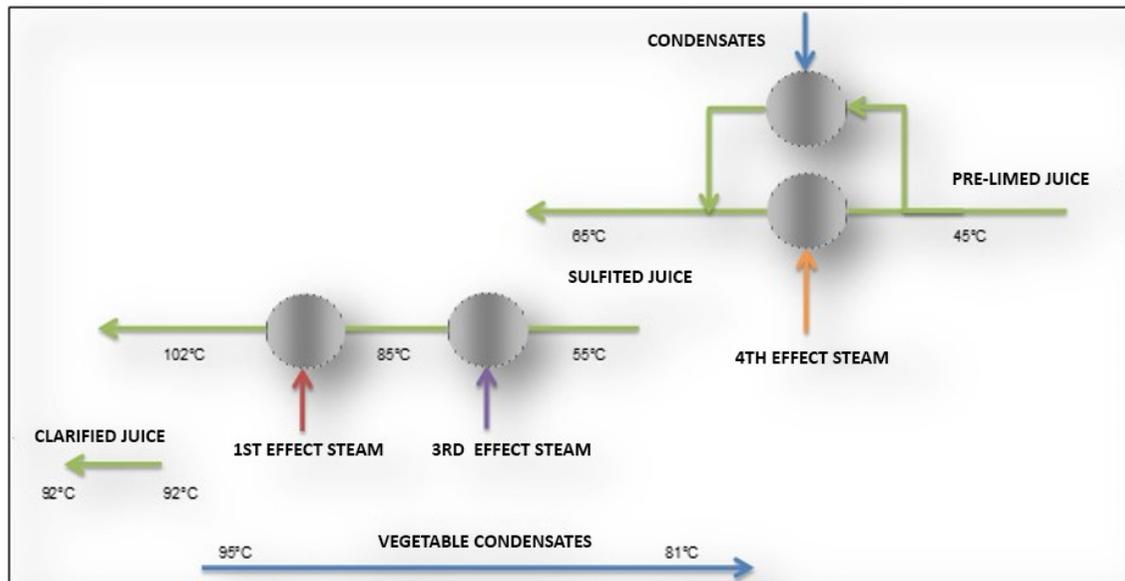


Figura 5. Sistema actual de tratamiento de zumos.

Este análisis incluye las corrientes principales que requieren calentamiento o enfriamiento para cumplir con el proceso de producción de azúcar. De acuerdo con la figura 5, hay tres corrientes frías, jugo pre-encalado, jugo de sulfito y jugo claro. La corriente caliente que requiere enfriamiento es el condensado que se produce a lo largo del proceso de producción. En cuanto al consumo de utilidades, se puede decir que el consumo de vapor del primer efecto es muy alto para el calentamiento del jugo de sulfito, por lo que el tratamiento de los jugos será el centro del análisis. Otro punto importante es que el jugo clarificado no se está calentando a la temperatura de saturación, por lo tanto, el sistema de evaporación no solo debe cumplir su función principal de evaporación, sino que también debe realizar un proceso de calentamiento, lo que hace que el sistema consuma más energía y en ocasiones desequilibre el proceso, provocando pérdidas de tiempo en la fábrica.

Resultados y discusión

La tabla 2 se obtiene a partir del balance de masa y energía, que en realidad muestra las corrientes utilizables del condensado, descontando los flujos requeridos por las otras áreas del proceso. Los arroyos con potencial de integración energética se pueden ver en esta misma tabla.

Tabla 2. Flujos de proceso identificados con potencial de integración térmica-uso de condensado

Corriente	Descripción	Temperatura de entrada (°C)	Temperatura de salida (°C)	Q (kW)	C (kW/K)
F1	Jugo pre-limado	45	65	27,207	878
F2	Jugo de sulfito	55	102	41,249	878
F3	Jugo claro	92	115	17,239	784
C1	Condensados de proceso	95	80	7,635	509
C2	Condensados de proceso	80	40	8,203	205

El valor de ΔT_{min} tomado inicialmente es de 7,3 °C, que corresponde a la diferencia de temperatura mínima lograda en uno de los equipos de proceso para calentar jugo. Como resultados del análisis del método tabular, se obtienen los objetivos de la red eléctrica caliente de 136.257 kW y 42.167 kW para la fría.

Utilizando el método tabular descrito anteriormente en las áreas de tratamiento de jugo, evaporación y cristalización, se estimó la demanda mínima de utilidades de calor y frío. La determinación de las metas de consumo de servicios públicos se llevó a cabo con la herramienta computacional desarrollada. Esta herramienta permite obtener curvas compuestas en un sistema de temperatura en función de la entalpía como se muestra en la Figura 6.

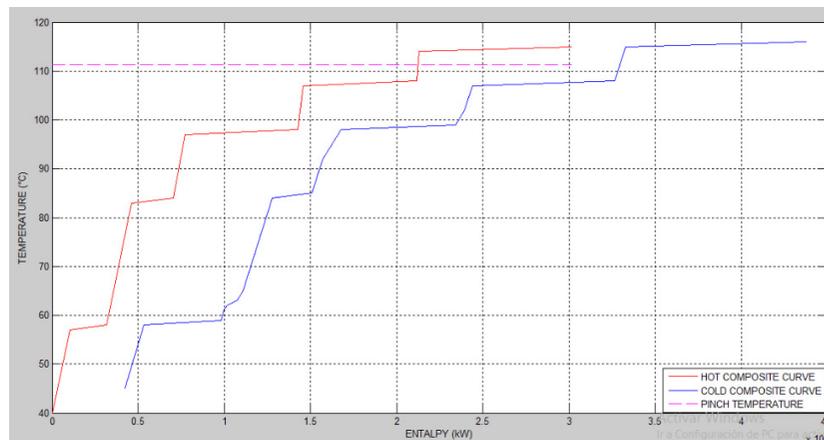


Figura 6. Curva compuesta.

Las curvas compuestas representadas en la figura 6 muestran que el punto de pellizco del proceso está a 111,35 °C, lo que representa una temperatura muy cercana al punto de operación del primer efecto de evaporación, lo que indica un mayor consumo de este vapor en el proceso. Las figuras 6 y 7 presentan las curvas compuestas y la curva compuesta grande, respectivamente. Estos muestran el potencial de ahorro de energía, con la superposición entre las curvas fría y caliente que representan la recuperación de calor entre las curvas.

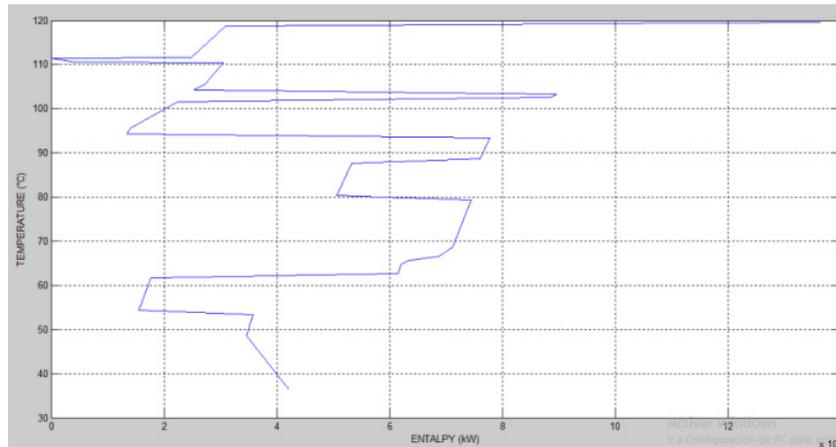


Figura 7. Gran curva compuesta.

En la Fig. 8, se ejecutan los cruces de la corriente de proceso, agotando toda la energía proveniente de la única corriente caliente en el caso del calentamiento del jugo. Teniendo en cuenta la gran curva compuesta del sistema de calefacción, se observa que los niveles de calefacción varían según las corrientes disponibles. Se decide no utilizar vapor 4 ya que su aporte energético sería insuficiente, permitiendo solo un aumento de 4 °C en la temperatura del jugo de sulfito, de 71 °C a 75 °C, porque la ΔT_{min} es de 10 °C con respecto a la temperatura del vapor 4. En cambio, el análisis comienza utilizando vapor 3 (a 101°C) en la segunda etapa de calentamiento, logrando aumentar la temperatura del jugo de 71°C a 91°C, manteniendo una ΔT_{min} de 10°C. Posteriormente, se utiliza vapor 2 (a 110 °C) para calentar el jugo de 91 °C a 100 °C. Finalmente, el vapor 1 lleva la temperatura del jugo de sulfito a su valor final de 102 °C.

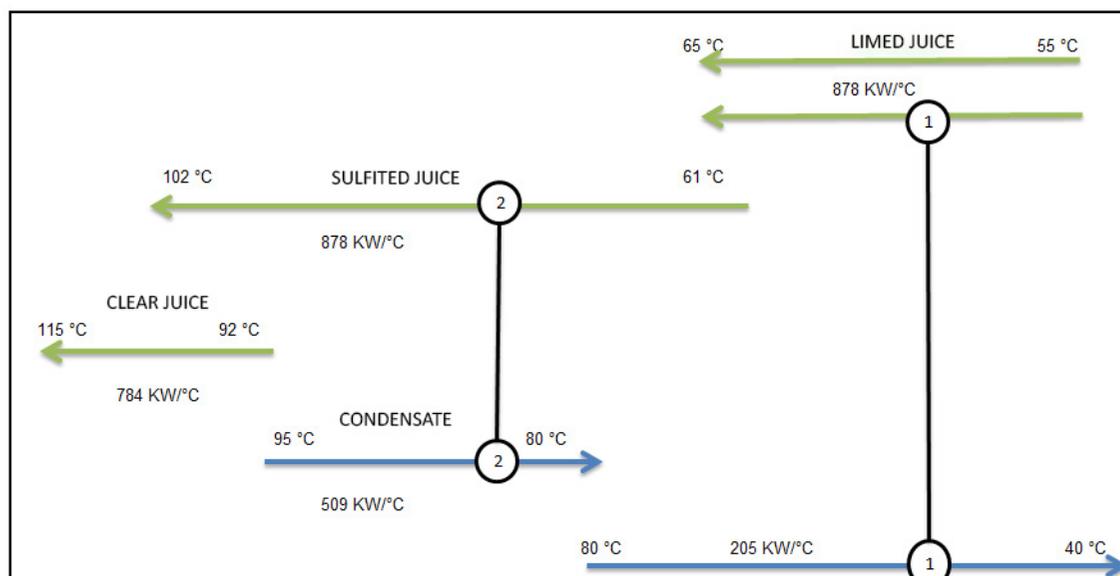


Figura 8. Esquema de tratamiento inicial de jugo: división de jugo encalado.

Esta figura muestra la mejor configuración para el uso de la energía contenida en cada una de las corrientes de este proceso; ahora para cumplir con las reglas de pellizco es

necesario que el calentamiento del jugo clarificado se realice con utilidades distintas al vapor de escape (utilidad caliente), al menos por debajo de la temperatura de pellizco del sistema completo de 111 °C. Para ello, es necesario saber qué corrientes de proceso se podrían utilizar para cumplir con el calentamiento del jugo claro teniendo en cuenta una ΔT_{min} de 7,3°C. A partir de la gran curva compuesta, se obtienen las fuentes de calor del proceso que pueden ser utilizadas para cumplir con los objetivos de calentamiento del proceso, esto se puede observar en la tabla 3.

Tabla 3. Disponibilidad de flujos de procesos en caliente

Fuente de calor de proceso	Presión de trabajo psig	Temperatura °C
Vapor 1 (primer efecto)	13.94	118
Steam 2 (segundo efecto)	7.87	110
Vapor 3 (tercer efecto)	1.81	101
Vapor 4 (cuarto efecto)	4.25	87
Vapor 5 (quinto efecto)	10.31	60

De acuerdo con la tabla anterior, se construye la red de intercambio de calor para calentar jugo claro, considerando una ΔT_{min} de 7,3 °C. Se descarta el uso de vapor para el cuarto y quinto efecto porque su temperatura es inferior a la temperatura de entrada del jugo claro (92 °C) más los 7,3 °C de ΔT_{min} ; es decir, es inferior a 99,3 °C. Por lo tanto, solo es posible el uso de los vapores 1 y 2. Esta propuesta de intercambio de energía define las corrientes y la cantidad de calor que intercambian entre sí, como se ve en la figura 8.

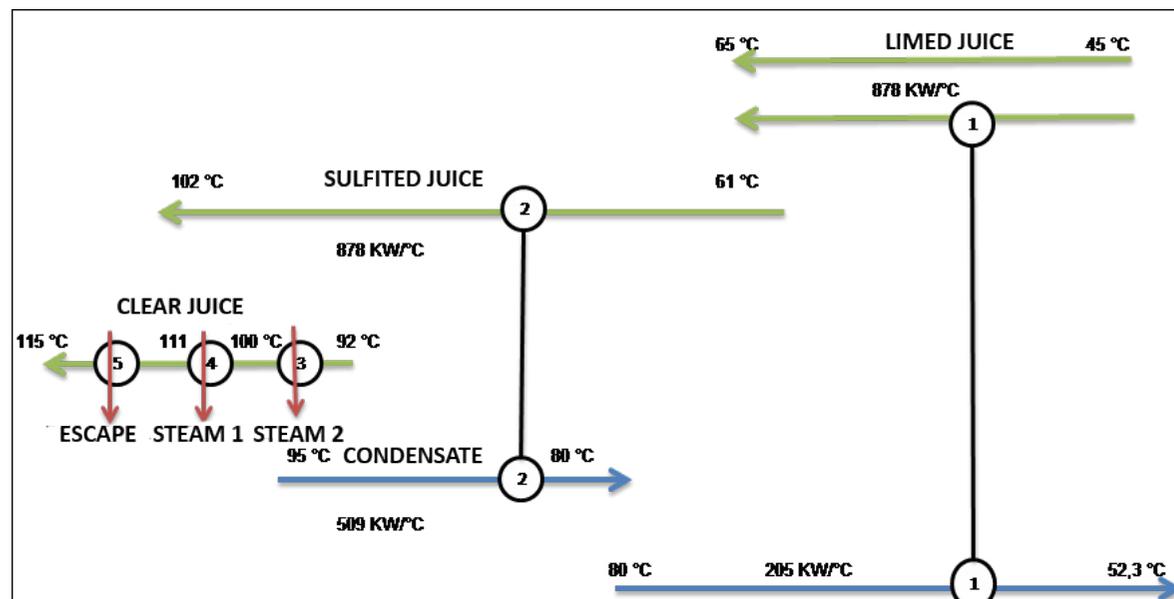


Figura 8. Esquema final de calentamiento de jugo claro

Para calentar el 60% del jugo de sulfito, se utilizará vapor 4 (temperatura de funcionamiento: 87 °C) como corriente caliente. El jugo se calentará de 45 °C a 65 °C.

En las siguientes tablas se muestran los resultados con el nuevo consumo de servicios de frío y calor:

Tabla 4. Consumo de servicios calientes después de la aplicación de la metodología Pinch

Subsistema	Caudal másico (kg/s)	Carga térmica (kW)
Líneas de evaporación	61	101,908
Destilería	10.6	17,631
Desaireador	4.3	7,219
Pérdidas	1.6	2,714
Total	77.5	129,472

Tabla 5. Consumo de servicios de frío después de la aplicación de la metodología Pinch

Subsistema	Caudal másico (kg/s)	Carga térmica (kW)
Agua de enfriamiento de quinto efecto	236.6	14,725
Agua de refrigeración al lecho de siembra A	59.2	3,817
Depósito de agua de refrigeración A	391.3	23,157
Agua de refrigeración al semillero B	34.1	2,197
Depósito de agua de refrigeración B	119.7	7,084
Total	840.9	50,980

Con el diseño de la red de intercambio de calor se obtiene una disminución considerable en el consumo de la red de calor caliente, pasando de 146.577 kW a 129.472 kW, produciendo un ahorro del 17% con respecto a la red de intercambio de calor de corriente sin modificaciones.

Una vez finalizado este proceso, se debe completar el diseño de la red de intercambio para abastecer las necesidades energéticas del proceso. Para ello, se utilizan vapores vegetales de la línea de evaporación a diferentes temperaturas, según la tabla 3. Con la red de intercambio diseñada para cumplir con las reglas Pinch, se calcula el área de intercambio necesaria para cada equipo. En la tabla 6 se presentan las áreas de los intercambiadores de calor propuestos, que se pueden ver a continuación.

Tabla 6. Cálculo de las áreas de intercambio de calor

Intercambiador de calor	Cambios de temperatura de las corrientes frías °C		Cambios de temperatura de las corrientes calientes °C		Q (kW)	A (m ²)
1	45	65	80	52.3	6,146	342
2	61	71	95	80	7,940	232
3	92	102.7	110	110	8,385	452
4	99	111	118	118	9,168	479
5	111	115	130	130	3,370	126
6	71	91	101	101	17,553	616
7	91	100	110	110	7,899	360
8	100	102	118	118	1,755	66
9	45	65	85	85	10,532	233

El análisis económico de la integración energética incluye el costo del consumo de servicios públicos y el costo de amortización de la inversión en los intercambiadores.

El costo de los servicios públicos se estimó directamente a partir del costo de generación de vapor y el costo de bombeo de cada m³ de agua de refrigeración, datos obtenidos de las bases de datos de la planta analizada como se puede observar en la tabla 7.

Tabla 7. Costo de los servicios públicos

Utilidad	Costo unitario
Vapor de baja presión (20 psig)	3 \$/lb
Agua de refrigeración	11.65 \$/m ³

En la tabla 8 se muestran los ahorros esperados después de aplicar la metodología Pinch. El ahorro anual total debido a la disminución en el consumo de utilidades de frío y calor del proceso que soporta esta obra es de 461.892 USD. Para estimar los costos del área de intercambio de calor, se utiliza la relación de costos de fabricación de los calentadores de carcasa y tubo, con cuerpo de acero A36 y tubo de intercambio de acero inoxidable 304, por un valor de 296.43 \$/m². Este es un valor suministrado por la empresa que fabrica estos equipos certificados por diseñadores extranjeros. Del total de intercambiadores, solo se incluyen los equipos 3, 4, 5, 7 y 8, dado que el resto se encuentra en el almacén de la planta. La suma del área correspondiente a estos nuevos intercambiadores de calor equivale a 1.483 m², a un costo de capital de 439.601,69 USD.

Tabla 8 Ahorros esperados después de aplicar el método Pinch

	Consumo de suministros de frío (kW)	Consumo de servicios públicos calientes (kW)
Sin pellizco	60,121	146,577
Con pellizco	50,980	129,472
Energía ahorrada	9,141	17,105
Saving \$/año	15,763.57	461,892

De esta manera, se esperaría un retorno de la inversión después de aproximadamente un año de operación. Este resultado se obtiene a través de un simple período de recuperación o amortización, dividiendo el costo del equipo de intercambio por los ahorros esperados debido a una disminución en el consumo de servicios públicos de frío y calor.

Hay que tener en cuenta que todo lo correspondiente al montaje e instalación de los equipos de intercambio queda excluido del alcance de este trabajo; cada planta de producción tendrá presupuestos diferentes para este rubro teniendo en cuenta la disposición de los equipos.

Conclusiones

Un programa informático específico desarrollado permite aplicar la tecnología Pinch de manera efectiva, permitiendo integraciones energéticas desde procesos simples hasta procesos con cientos de flujos. Su programación y desarrollo reducen los tiempos de análisis al comparar diferentes ΔT_{min} .

El análisis teórico del potencial de ahorro energético en la planta de producción estudió una posible disminución en el consumo de servicios de calor y frío, estimando un ahorro del 7% para los servicios de calor y del 30% para los servicios de frío. Se proyecta un ahorro anual de 461.892 USD en consumo de servicios públicos, aplicando la metodología Pinch. Es importante destacar que la planta ya se encontraba en el proceso de mejora energética sin considerar la segunda ley de la termodinámica. Durante este estudio, se propusieron mejoras adicionales que contribuyeron a reducir el consumo de servicios públicos de frío y calor, optimizando así el rendimiento energético de la planta.

La simulación y el análisis de los procesos de calentamiento, junto con la integración energética en la red de intercambiadores de calor, demuestran que aplicando la metodología Pinch se puede lograr una optimización significativa en la eficiencia térmica de la planta de producción de azúcar. Este enfoque no solo permite una mejor recuperación energética y una reducción en el consumo de servicios de calor y frío, sino que también contribuye a la sostenibilidad del proceso, generando ahorros económicos sustanciales y mejorando la competitividad de la industria en el contexto de una creciente demanda de prácticas más sostenibles.

El análisis económico revela que la implementación de la metodología Pinch, ya sea en una planta nueva o existente, ofrece un importante potencial de ahorro de costos al enfocarse en la adquisición de equipos esenciales de intercambio de calor, con una inversión inicial de 439,601.60 USD para cubrir un área de intercambio de calor de 1.483 m². Aunque se encontraron ahorros notables en la red de intercambiadores del sistema de calefacción, se produjo una violación significativa de la regla de pellizco durante la evaporación. Sin

embargo, el sistema de cristalización demostró ser energéticamente eficiente, utilizando eficazmente el vapor del tercer efecto de evaporación.

Declaración de contribución de autoría de CRediT

Julián Pérez Marín: conceptualización, Curación de datos, Metodología, Recursos, Software, Visualización. Juan R. Vidal Medina: Análisis formal, Administración de proyectos, Metodología, Supervisión, Validación. Yuri U. López Castrillón: Investigación, Redacción – revisión y edición, Validación. Andrés F. Rodríguez Valencia: Investigación, Visualización, Escritura – revisión y edición, Redacción – borrador original.

Implicaciones éticas

Los autores no tienen ningún tipo de implicación ética que deba ser declarada en la redacción y publicación de este artículo.

Conflicto de intereses

Los autores no declaran.

Financiación

No, los autores declaran que no recibieron recursos para la redacción o publicación de este artículo.

Referencias

1. Julian Andrés Perez Marin. Análisis y evaluación de integración térmica de las corrientes de proceso en una planta de producción de azúcar para incrementar su eficiencia utilizando la metodología Pinch. Universidad Autónoma de Occidente. 2017.
2. Asocaña. Un dulce sabor que se transforma. Informe anual 2021 – 2022 [Internet]. Sector agroindustrial de la caña. 2022. Available from: <http://www.asocana.org/documentos/672022-B663EF18-00FF00,000A000,878787,C3C3C3,0F0F0F,B4B4B4,FF00FF,FFFFFF,2D2D2D,A3C4B5.pdf>
3. Palacios-Bereche MC, Palacios-Bereche R, Ensinas A V., Gallego AG, Modesto M, Nebra SA. Industria brasileña de caña de azúcar – Un estudio sobre futuras mejoras en la gestión de la energía de proceso. *Energía*. 2022; 259(junio):1–19.
4. Dias MOS, Modesto M, Ensinas A V., Nebra SA, Filho RM, Rossell CEV. Mejora de la producción de bioetanol a partir de la caña de azúcar: Evaluación de sistemas de destilación, integración térmica y cogeneración. *Energía [Internet]*. 2011; 36(6):3691–703. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2010.09.024>
5. Oliveira CM, Cruz AJG, Costa CBB. Mejorar la producción de bioetanol de segunda generación en biorrefinerías de caña de azúcar a través de la integración energética. *Appl therm eng [Internet]*. 2016; 109:819–27. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.11.016>
6. Dias MOS, Ensinas A V., Nebra SA, Maciel Filho R, Rossell CEV, Maciel MRW. Producción de bioetanol y otros materiales de base biológica a partir de bagazo de caña de azúcar: Integración al proceso convencional de producción de bioetanol. *Chem Eng Res Des*. 2009; 87(9):1206–16.
7. Bonhivers JC, Ortiz PAS, Reddick C, Rossell CEV, Mariano AP, Filho RM. Análisis gráfico de la cascada de calor de toda la planta para aumentar la eficiencia energética en la producción de etanol y azúcar a partir de la caña de azúcar. *Proceso Integr Optim Sustain*. 2021; 5(3):335–59.

8. Svensson E, Harvey S. Análisis de pellizco de una fábrica de celulosa y papel parcialmente integrada. Proc World Renew Energy Congr – Suecia, 8-13 de mayo de 2011, Linköping, Suecia. 2011; 57:1521–8.
9. Safder U, Lim JY, How BS, Ifaei P, Heo SK, Yoo CK. Configuración óptima y análisis económico de redes industriales modernizadas PRO para la producción de energía sostenible y la recuperación de materiales teniendo en cuenta las incertidumbres: estudio de caso de bioetanol y molino de azúcar. *Renovar Energía* [Internet]. 2022; 182:797–816. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.10.047>
10. Cortés-Rodríguez EF, Fukushima NA, Palacios-Bereche R, Ensinas A V., Nebra SA. Sistema de concentración de vinaza y evaporación de jugo integrado al proceso convencional de producción de etanol a partir de caña de azúcar – Integración de calor e impactos en el sistema de cogeneración. *Renovar Energía* [Internet]. 2018; 115(1):474–88. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.08.036>
11. Molina JBC. Integración energética del proceso de producción de alcohol en la destilería de un ingenio azucarero. Universidad Autónoma de Occidente. 2017.
12. Hurtado CMR, Rincon RG. Análisis y evaluación de integración térmica de las corrientes de proceso de la unidad de ruptura catalítica de ecopetrol gerencia refinería de cartagena utilizando la metodología Pinch. 2003.
13. Higa M, Freitas AJ, Bannwart AC, Zemp RJ. Integración térmica de evaporador de efecto múltiple en planta azucarera. *Appl therm eng* [Internet]. 2009; 29(2–3):515–22. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2008.03.009>
14. Morandin M, Toffolo A, Lazzaretto A, Maréchal F, Ensinas A V., Nebra SA. Síntesis y optimización de parámetros de un proceso de producción combinado de azúcar y etanol integrado con un sistema de cogeneración. *Energía* [Internet]. 2011; 36(6):3675–90. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2010.10.063>
15. Pina EA, Palacios-Bereche R, Chavez-Rodrigues MF, Ensinas A V., Modesto M, Nebra SA. Integración térmica de diferentes configuraciones de plantas de producción de azúcar y etanol a partir de caña de azúcar. *Trad. Chem Eng* 2014; 39(Número especial):1147–52.
16. Ensinas A V., Nebra SA, Lozano MA, Serra L. Diseño de sistemas de evaporación y redes de calentadores en fábricas de caña de azúcar mediante un procedimiento de optimización termoeconómica. *Int J Thermodyn*. 2007; 10(3):97–105.
17. Raghu Ram J, Banerjee R. Objetivo de energía y cogeneración para una fábrica de azúcar. *Appl Therm Eng*. 2003; 23(12):1567–75.
18. Neto JNS, Pacheco JG, Sacramento LDA, Kalid R, Magalhães SLF De, Queiroz EM, et al. Integración energética: un ejemplo en la modernización de una planta petroquímica. 2º Mercosur Congr Ing. *Química* 2004; 1–10.
19. Levasseur ZP, Palese V, Marechal F. Estudio de integración energética de un evaporador multiefecto. *Ec Polytech Fed Lausana*. 2008; 1(1):1–17.
20. Llerena AC, Ones OP, Cardenas LZ de, Rios JLP de los. Integración energética del proceso de incineración de vinazas concentradas y generación de electricidad. *Rev Univ y Soc* [Internet]. 2021; 13(6):286–94. Available from: <https://doi.org/10.1080/09638288.2019.1595750><https://doi.org/10.1080/17518423.2017.1368728><http://dx.doi.org/10.1080/17518423.2017.1368728><https://doi.org/10.1016/j.ridd.2020.103766><https://doi.org/10.1080/02640414.2019.1689076><https://doi.org/>

21. Chegini S, Dargahi R, Mahdavi A. Modificación de la red de intercambiadores de calor de precalentamiento en la unidad de destilación de crudo de la refinería de Arak basada en la tecnología de pellizco. *Proc World Congr Eng Comput Sci.* 2008; 1(1):1–5.
22. Balla WH, Rabah AA, Abdallah BK. Análisis de pellizco de la integración del agua de la refinería de caña de azúcar. *Tecnología Azucarera* 2018; 20(2):122–34.
23. Smith R. Estado del arte en integración de procesos. *Appl Therm Eng.* 2000; 20(15):1337–45.
24. Linnhoff B, Dunford H, Smith R. Integración térmica de columnas de destilación en procesos generales. *Chem Eng Sci.* 1983; 38(8):1175–88.
25. Klemeš JJ, Kravanja Z. Cuarenta años de integración del calor: análisis de pellizco (PA) y programación matemática (MP). *Curr Opin Chem Eng.* 2013; 2(4):461–74.
26. Varbanov PS, Yong JY, Klemeš JJ, Chin HH. Extracción de datos para la integración de calor y el análisis total del sitio: una revisión. *Trad. de Ingeniería Química* 2019; 76(1):67–72.
27. Fu D, Nguyen T, Lai Y, Lin L, Dong Z, Lyu M. Método mejorado basado en pellizcos para calcular el objetivo de costo de capital de la red de intercambiadores de calor mediante la evolución de la estructura de espagueti hacia una combinación de bajo costo. *J Clean Prod [Internet].* 2022; 343(1):1–19. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131022>
28. Jaramillo Chica, Esteban-Sánchez Cossio JA. Desarrollo de una metodología para síntesis, optimización y diagnóstico de redes de transferencia de calor (HEN) – tratamiento de problemas con corrientes isotérmicas. 2009;