



Evaluación del desempeño del sistema experimental de calentamiento Cenicaña, en condiciones operativas de la industria de caña de azúcar colombiana.

David Duque Uribe

Informe de practica para optar por el título de Ingeniero Mecánico

Asesor

Andrés Felipe Agudelo Santamaria, Doctor (PhD) Energías renovables y eficiencia energética

Andrés Felipe Ospina Patiño, Ingeniero Mecánico master en administración de empresas (MBA)

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Ingeniería Mecánica

Medellín, Antioquia, Colombia

2022

Cita	Duque Uribe [1]
Referencia	[1] D. Duque Uribe “Evaluación del desempeño del sistema experimental de calentamiento Cenicaña, en condiciones operativas de la industria de caña de azúcar colombiana.”, Trabajo de grado profesional, Ingeniería Mecánica, Universidad de Antioquia, Medellín, Antioquia, Colombia, 2022.
Estilo IEEE (2020)	



Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia - Cenicaña



Centro de Documentación de Ingeniería (CENDOI)

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

Rector: John Jairo Arboleda Céspedes.

Decano/Director: Jesús Francisco Vargas Bonilla.

Jefe departamento: Pedro León Simanca.

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

“El conocimiento es poder. La información es libertadora. La educación es la premisa del progreso, en toda sociedad, en toda familia” – Kofi Annan

Agradecimientos

A mi familia, a la Universidad de Antioquia y a Cenicaña por esta grata oportunidad y experiencia, llena de aprendizajes y buenos momentos.

Contenido	
Resumen	7
Abstract	8
1. Introducción	9
2. Planteamiento del problema	10
3. Objetivos	11
3.1. Objetivo general	11
3.2. Objetivos específicos	11
4. Marco teórico	11
5. Estado del arte	14
6. Metodología	17
6.1. Descripción del sistema experimental de calentamiento	17
6.1.1. Intercambiador de calor de placas	18
6.2. Retrolavado	19
6.3. Limpieza in situ (<i>Cleaning in place</i>)	19
6.3.1. Prueba soluciones de limpieza	20
6.4. Pruebas de fugas	20
6.5. Análisis intercambiador de calor de placas	20
6.5.1. Formular el problema	21
6.5.2. Modelar la geometría y el dominio del flujo	21
6.5.3. Establecer las condiciones de frontera	21
6.5.4. Generar la malla	22
6.5.5. Establecer la estrategia de simulación	22
6.6. Análisis intercambiador de calor	23
7. Análisis de resultados	23
7.1. Diseño, construcción e instalación de piezas para el retrolavado y CIP	23
7.1.1. Base válvula 3 vías	23
7.1.2. Base válvula on-off	25
7.1.3. Base tanques CIP	27
7.2. Pruebas de fugas	29
7.3. Pruebas de conductividad en incrustaciones	29
7.4. Análisis CFD del sistema experimental de calentamiento	30
7.4.1. Modelo CAD del intercambiador de calor.	30

7.4.2. Análisis CFD	31
8. Conclusiones	34
9. Bibliografía	35

Índice de figuras.

Figura 1. Procesos de la caña de azúcar [20].	12
Figura 2. Principio de operación intercambiador de calor de placas [32].	13
Figura 3. Retrolavado en intercambiadores de calor de placas [29].....	14
Figura 4. Patrones geométricos en las placas del intercambiador de calor [34].....	14
Figura 5. Sistema experimental de calentamiento previo a modificaciones.....	18
Figura 6. Intercambiador de calor de placas Alfa Laval TL3.....	19
Figura 7. Retrolavado en el intercambiador de calor.	19
Figura 8. CIP en el SEC.	20
Figura 9. Diseño y simulación base válvula 3 vías.	25
Figura 10. Diseño y simulación base válvula on-off.....	27
Figura 11. Diseño y simulación plataforma CIP.	28
Figura 12. Pruebas de pH y conductividad.....	29
Figura 13. Conductividad vs incrustaciones.....	30
Figura 14. Geometría CAD del modelo simulado.....	31
Figura 15. Perfiles de temperatura y velocidad en el intercambiador de calor.	33
Figura 16. Coeficiente de transferencia de calor y caída de presión en el intercambiador de calor..	34

Índice de tablas.

Tabla 1. Propiedades del jugo de caña.	21
Tabla 2. Condiciones de frontera del modelo.....	22
Tabla 3. Información malla del modelo.	22
Tabla 4. Temperaturas de los fluidos en el intercambiador de calor.....	33

Resumen

Esta memoria de prácticas presenta la evaluación del sistema experimental de calentamiento de jugo de caña de azúcar (SEC) de Cenicaña, compuesto principalmente de un intercambiador de placas. Para su correcta operación se plantearon cambios del flujo en el sistema, para esto se diseñaron, construyeron e instalaron las nuevas piezas, mediante las cuales será posible realizar operaciones de limpieza automática, con menor intervención del personal, lo cual permita aumentar el tiempo de operación del sistema. Por otra parte, se evaluó la respuesta de las propiedades de pH y conductividad en función de la concentración de las soluciones de limpieza (soda caustica y ácido fosfórico), se concluyó que la medida de conductividad puede ofrecer mejores respuestas para dosificar las soluciones de limpieza en el proceso. Finalmente, se desarrolló un modelo de dinámica de fluidos computacional (CFD) para evaluar los cambios del coeficiente de transferencia de calor y caída de presión en función del ángulo Chevron (30° , 45° y 60°) de las placas del intercambiador de calor. Se concluyó que el ángulo de 30° fue el más eficiente debido a que presenta un alto coeficiente de transferencia de calor $1014 \text{ [W/m}^2\text{K]}$ y la menor caída de presión de los tres, 1227 Pa .

Palabras clave: Eficiencia energética, bagazo, vapor, intercambiador de calor, cogeneración.

Abstract

This practice report presents the evaluation of the experimental system for heating sugar cane juice (SEC) of Cenicaña, mainly composed of a plate heat exchanger. For its correct operation, changes of the flow in the system were proposed, this the new parts were designed, built and installed, through which it will be possible to carry out automatic cleaning operations, with less intervention of the personnel, which allows to increase the time of operation of the system. The response of the pH and conductivity properties was evaluated based on the concentration of the cleaning solutions (caustic soda and phosphoric acid), it was concluded that the conductivity measurement can offer better answers than pH to dose the cleaning solutions in the process. Finally, a computational fluid dynamics (CFD) model was developed to evaluate the changes in the heat transfer coefficient and pressure drop as a function of the Chevron angle (30°, 45° and 60°) on the heat exchanger plates. It was concluded that the 30° angle was the most efficient because it has a high heat transfer coefficient of 1014 [W/m²K] and the lowest pressure drop of them, (1227 Pa).

Keywords: Energy efficiency, bagasse, steam, heat exchanger, cogeneration.

1. Introducción

La sacarosa, comúnmente llamada “Azúcar”, es un disacárido formado por una molécula de glucosa y una de fructosa, la cual se obtiene principalmente de caña de azúcar (73%) y de remolacha (27%) [1]. El azúcar de caña es aquél que se obtiene a partir de la caña de azúcar, extraído de la planta mediante una serie de procesos: preparación de la caña, molienda, calentamiento, clarificación, filtración, evaporación, cristalización, centrifugación, y secado, así como generación de vapor y electricidad [2][3]. El procesamiento de la caña se realiza en los Ingenios Azucareros, los cuales son una serie de instalaciones industriales que cuentan con los equipos y personal necesario para llevar a cabo la extracción y transformación de la caña [4]. Cabe mencionar que la industria azucarera, además de producir azúcar, también genera energía térmica y eléctrica, así como etanol antiséptico y combustible. Adicionalmente, de los residuos del proceso se puede producir papel, tableros aglomerados y alimento para animales [5].

Colombia es uno de los principales productores de azúcar a nivel mundial, debido a condiciones climáticas excepcionales que permiten una producción continua durante todo el año, ubicando al país en el puesto número 13 del ranking mundial de productores de azúcar. La industria azucarera colombiana se ubica en el valle del río Cauca, desde Santander de Quilichao, al norte del departamento del Cauca, atravesando la zona plana del Valle del Cauca, hasta la Virginia, en el departamento de Risaralda, para un total de 47 municipios productores y 225.560 hectáreas sembradas de caña de azúcar [6][7][8]. Por otra parte, es una industria de alta importancia en la economía nacional, la cual en el 2017 generó el 0.7% del PIB de Colombia, generando 188.000 empleos directos y beneficiando a 1.200.000 familias [9].

La importancia de esta industria no se basa solamente en la producción de alimentos, también en la generación de energía por parte de los ingenios, la cual tiene una participación marginal en la matriz energética de Colombia, donde en el 2018 el 0.8% de la canasta de generación en el país correspondió al bagazo de caña [10]. En ese sentido, los ingenios azucareros, mediante procesos de cogeneración, producen de forma simultánea energía mecánica, térmica y eléctrica, aprovechando el bagazo, un subproducto de procesos de cosecha y molienda de la caña [11]. Por medio de la combustión del bagazo se transforma la energía química del combustible en energía térmica presente en los gases de combustión, la cual se transfiere al fluido (agua) para producir vapor a alta presión y temperatura. Este vapor se utiliza en procesos de generación de energía, y fundamentalmente en la transformación de la caña. Debido a esto, la industria azucarera direcciona sus objetivos a procesos de alta eficiencia energética, que buscan reducir el consumo energético en los diversos procesos, permitiendo obtener productos de gran calidad con el mínimo consumo energético posible.

Consecuentemente, CENICANÑA desarrolló el sistema experimental de calentamiento, el cual consiste en una planta piloto para calentar el jugo claro extraído de caña mediante un intercambiador de calor de placas, que promete ser más eficiente que las tecnologías utilizadas actualmente. El sistema experimental de calentamiento está construido sobre una plataforma móvil que permite transportarlo a los diferentes ingenios, operando en paralelo a

la producción en ingenio, pero a una escala menor. De esta manera es posible evaluar la viabilidad del uso de intercambiadores de calor de placas para el calentamiento de jugo claro, así como sus impactos en la eficiencia energética.

2. Planteamiento del problema

El centro de investigación de la caña de azúcar (Cenicaña) es una corporación privada sin ánimo de lucro, financiada por las donaciones realizadas por los ingenios azucareros Carmelita, Central Tumaco, Incauca, La Cabaña, Manuelita, María Luisa, Mayagüez, Pichichí, Providencia, Riopaila-Castilla, Risaralda y San Carlos, y sus proveedores de caña. El centro favorece la innovación en la agroindustria mediante procesos de investigación y desarrollo en variedades, agronomía y procesos de fábrica. En los procesos de fábrica, Cenicaña busca contribuir al mejoramiento de los procesos productivos del sector azucarero, siguiendo los principios de sostenibilidad ambiental, optimización tecnológica y rentabilidad económica [12].

La energía térmica es un pilar fundamental del proceso de transformación de la caña, donde el vapor obtenido de la transferencia de calor de la combustión del bagazo se usa como fluido calefactor para el proceso de evaporación, que busca eliminar el agua del jugo de caña, para posteriormente cristalizar los granos de azúcar. Con miras a aumentar la eficiencia del proceso de evaporación, existe un proceso previo de limpieza, donde se da un precalentamiento del jugo de caña. Cenicaña identificó la oportunidad de mejorar la eficiencia del proceso de calentamiento del jugo, y desarrolló un sistema experimental de calentamiento (SEC), el cual mediante un intercambiador de calor de placas, procura reducir el consumo de vapor de alta calidad, buscando sustituirlo por vapor de escape de otros procesos, o incluso realizar este calentamiento con los condensados disponibles de los procesos de fábrica [13].

Por otra parte, Colombia, comprometida con el Acuerdo de París 2015, se ha propuesto reducir las emisiones de gases efecto invernadero entre el 20% y 51% para el 2030. Para esto el país busca 3 objetivos principales: (i) migrar hacia un sistema energético competitivo, eficiente y resiliente, (ii) eliminar las brechas energéticas, introduciendo nuevos modelos de negocio y nuevas tecnologías para acelerar el servicio de energía eléctrica y gas combustible en todo el territorio y (iii) liderar la lucha contra el cambio climático, priorizando la movilidad sostenible con la introducción masiva de combustibles de cero y bajas emisiones de efecto invernadero, y creando políticas de eficiencia energética [14].

Debido a lo anteriormente expuesto, el proyecto SEC se desarrolla en torno a cumplir los objetivos de la transición energética del país y mejorar las condiciones energéticas operativas del proceso de caña, ofreciendo soluciones y mejoras tecnológicas a la industria azucarera. El proyecto busca reducir el consumo específico de vapor en fábrica, y como consecuencia, tener una mayor cantidad de vapor disponible para los procesos de cogeneración, exportando más energía a la red. Con esto se reducirían el consumo de combustible y la emisión de gases efecto invernadero, lo cual tiene efectos positivos en indicadores medioambientales y económicos.

3. Objetivos

3.1. Objetivo general

Desarrollar las adaptaciones necesarias para la operación del sistema experimental de calentamiento acoplado en línea al proceso industrial, y caracterizar su funcionamiento bajo diferentes condiciones operativas.

3.2. Objetivos específicos

- 3.2.1.** Diseñar, adaptar e instalar los componentes necesarios para el correcto funcionamiento del sistema experimental de calentamiento acoplado al proceso industrial en el ingenio.
- 3.2.2.** Realizar pruebas preliminares de funcionamiento del sistema experimental de calentamiento en condiciones controladas en Cenicaña, garantizando una operación sin fugas.
- 3.2.3.** Caracterizar mediante simulación CFD el desempeño del intercambiador de calor de placas del sistema experimental de calentamiento.

4. Marco teórico

Los sistemas de cogeneración consisten en la producción simultánea de dos o más formas de energía aprovechable. La industria sucro-energética transforma principalmente la energía química disponible en la biomasa de caña y el carbón, en energía mecánica, eléctrica y térmica. De esta manera, los ingenios azucareros producen energía suficiente, no sólo para su propio consumo, sino también para la venta a la red [15]. El bagazo de caña es uno de los residuos del proceso de fabricación del azúcar a partir de la caña: el remanente de los tallos de la caña después de extraerse el jugo azucarado. El bagazo se utiliza para la producción de papel (la fibra de mayor tamaño) y como combustible que alimenta las calderas (la fibra de tamaños inferiores) [16].

El proceso de obtención del azúcar se puede clasificar en siete procesos básicos, mencionados a continuación. (i) Preparación de la caña: este proceso consta de la recolección y transporte de la caña desde el campo hasta el ingenio, donde se corta y se desfibra la caña, procurando exponer la sacarosa y proveer una mejor tasa de alimentación a los molinos. (ii) La molienda, la cual permite la extracción del jugo de caña por medio de una presión ejercida por las mazas o rodillos dentados del molino. Con el objetivo de mejorar la eficiencia de la molienda, se adiciona agua al bagazo del último molino, este subproceso es llamado imbibición, que se define como el desplazamiento de un fluido viscoso por otro inmiscible con éste, jugo de caña y agua respectivamente. Además, el jugo extraído de cada molino se recircula al anterior con el mismo objetivo. (iii) Generación de vapor y electricidad: este proceso se lleva a cabo mediante el bagazo obtenido del último molino, el cual es el combustible que alimenta las calderas para producir vapor utilizado en la generación de energía mecánica y eléctrica a partir de turbogeneradores. El vapor de salida del proceso se usa como energía térmica en fases de calentamiento y cocción. (iv) Clarificación: en este proceso el jugo extraído de la molienda se transporta por medio de bombas centrífugas para pasar a otros subprocesos, tales como calentamiento, sulfatación, alcalización y filtración, los cuales, por la acción de la temperatura e insumos como dióxido

de azufre, lechada de cal y floculante, forman puentes con las impurezas presentes en el jugo, generando moléculas más pesadas y que son extraídas por sedimentación. (v) Evaporación: este proceso elimina un 80% del agua contenida en el jugo clarificado, a través del sistema de evaporación en serie que utiliza vapor de escape. (vi) Cristalización: en esta fase la meladura de caña se envía hacia los tachos al vacío, donde se cristaliza la sacarosa, con ayuda de núcleos de sacarosa previamente formados. Posteriormente, se lleva a cabo el proceso de centrifugación. Con equipos que giran a altas velocidades se separa la miel del proceso y los granos de azúcar. (vii) Secado, es la fase en la cual se elimina la humedad ligada al cristal a través del contacto entre los granos de azúcar y el aire [13][17][18][19], ver Figura 1.

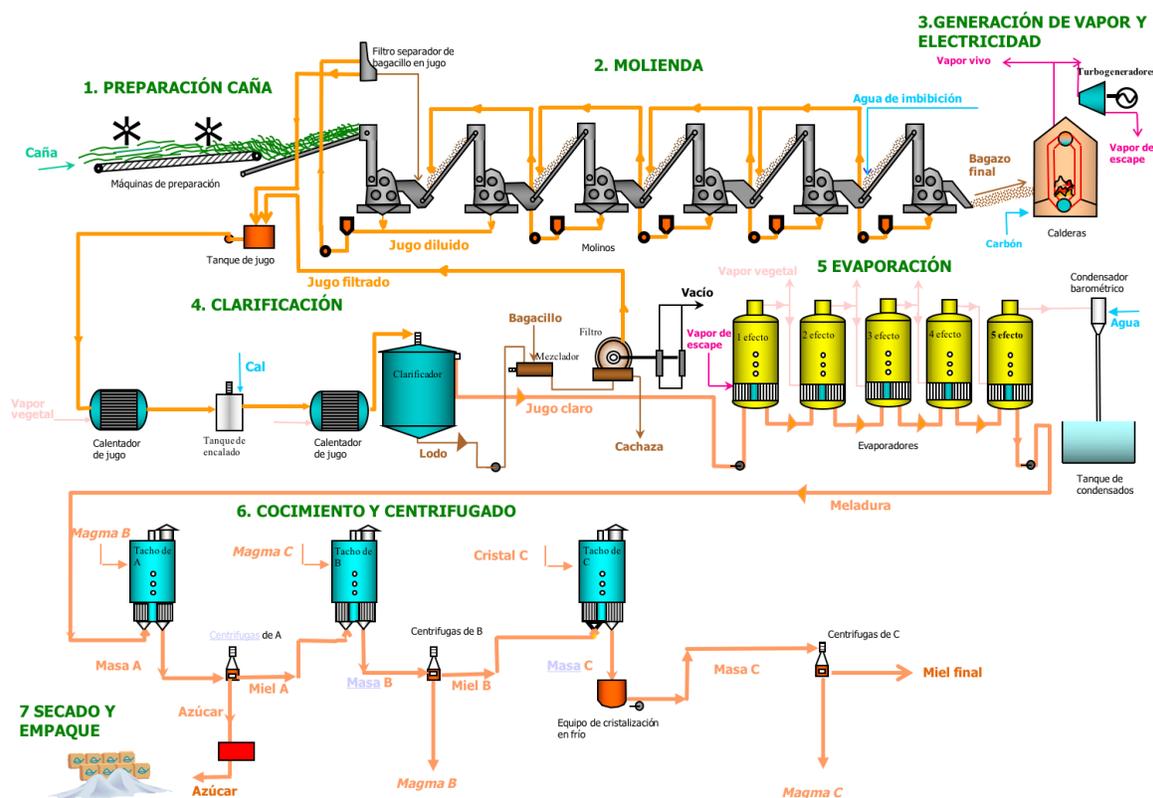


Figura 1. Procesos de la caña de azúcar [20].

A continuación, se presentan algunos conceptos importantes para la comprensión de este trabajo. En la industria el vapor vivo se encuentra a alta presión y temperatura justo a la salida de la caldera. El vapor de escape, que es un vapor a alta temperatura, pero baja presión, se obtiene luego de expandir el vapor en los turbogeneradores, y el vapor vegetal es el que se obtiene de la evaporación del agua del jugo de caña [13]. Los grados brix, cuantifican la cantidad de sólidos solubles (fructosa, glucosa y sacarosa) en el jugo extraído de caña [21]. La pureza de la caña es el porcentaje de sacarosa en los sólidos totales del jugo [22]. Estas características definen posteriormente otras propiedades fisicoquímicas del producto.

En el proceso de clarificación, se calienta el jugo para promover las reacciones en el proceso de clarificación y eliminar los gases presentes en el éste [23]. El SEC está constituido principalmente por un intercambiador de calor de placas, que consiste en una serie de placas corrugadas soportadas en un marco y separadas por empaques entre ellas, a través de las cuales fluyen de manera intercalada el fluido calefactor y el fluido a calentar [24][25], ver Figura 2. Uno de los inconvenientes en la operación de intercambiadores de calor son las incrustaciones, las cuales son depósitos formados por agregados solidos en el fluido, los cuales se adhieren a las superficies de los intercambiadores y reducen la eficiencia energética del proceso, debido al incremento de la resistencia térmica y a un aumento en la caída de presión, lo cual limita su tiempo de operación [25][26]. Con el objetivo de disminuir este inconveniente, se proponen alternativas de limpieza como el retrolavado, que consiste en cambiar la dirección del fluido a través del intercambiador de calor, fluyendo en dirección opuesta a la habitual, lo que permite remover algunos residuos sólidos formados en las incrustaciones [27], debido a que éstas suelen formarse en las áreas de baja velocidad. Por lo tanto, al cambiar la dirección del fluido, estas zonas pasan a ser de mayor velocidad, removiendo las incrustaciones formadas previamente [28][29][30], ver Figura 3. Otra de las alternativas es la “Limpieza in situ” o “CIP” (por sus siglas en ingles), en la cual se realiza la limpieza de los equipos sin la necesidad de desmontar o abrir, y sin interacción humana. Consiste en circular soluciones de limpieza con altas velocidades y turbulencias, lo que permite remover las impurezas de las superficies de los equipos [31]. Dichas alternativas de limpieza permiten aumentar la vida útil de los equipos y los tiempos de operación, reduciendo las paradas y tiempos muertos de limpieza, además de mejorar la calidad, higiene y limpieza de los productos [25][31].

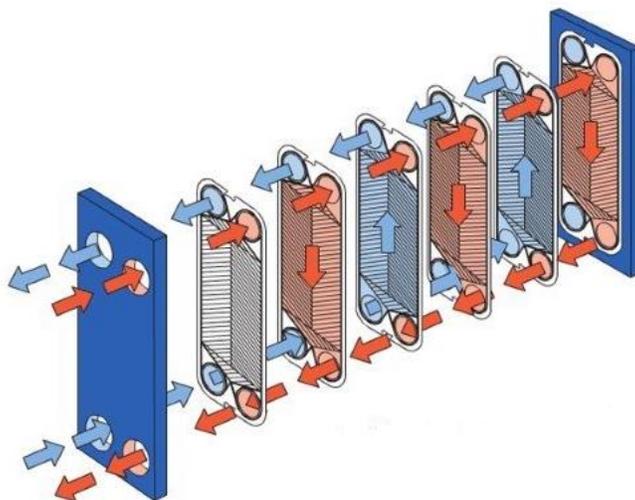
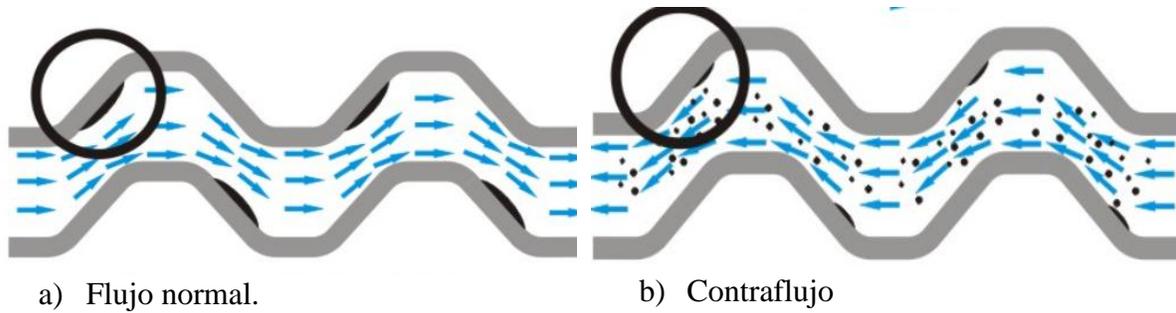


Figura 2. Principio de operación intercambiador de calor de placas [32].



a) Flujo normal. b) Contraflujo
 Figura 3. Retrolavado en intercambiadores de calor de placas [29].

En las placas de los intercambiadores de calor hay una serie de patrones corrugados y canales, con el objetivo de aumentar la turbulencia en el fluido e incrementar el coeficiente de transferencia de calor, lo cual mejora la transferencia de calor, pero a su vez requiere una mayor potencia de bombeo [33]. El ángulo Chevron (β) indica el ángulo de inclinación de los canales que se encuentran en las placas del intercambiador de calor, los cuales permiten aumentar la turbulencia y mejorar el mezclado del fluido, incrementando el coeficiente de transferencia de calor [33], ver Figura 4.

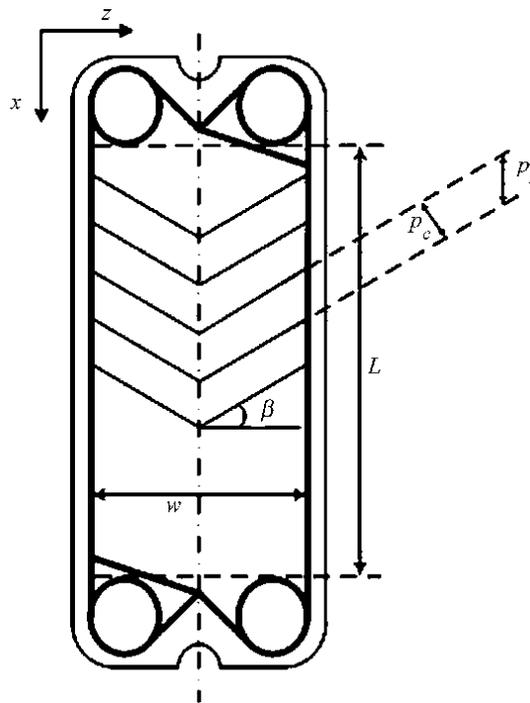


Figura 4. Patrones geométricos en las placas del intercambiador de calor [34].

5. Estado del arte

Varios estudios en la industria azucarera se han realizado con el objetivo de mejorar y expandir sus condiciones energéticas. Sagastume *et al.* [35] evaluaron la posibilidad de la transición energética de Cuba hacia una economía de bajas emisiones, reemplazando las fuentes actuales de combustibles fósiles por sistemas de generación de energía basados en biomasa de caña de azúcar y la planta invasora *marabu*. Encontraron que la energía basada

en biomasa puede producir entre el 48 y el 99% de la demanda energética predicha para el 2030, reduciendo las emisiones de gases efecto invernadero entre 40 y 81%, comparado con la situación del año 2012. La principal dificultad para la transición energética en Cuba es el embargo económico y su limitada capacidad de inversión. Hofsetz y Silva [36] presentaron un estudio del bagazo de caña para consumo energético (procesos de cogeneración eléctrica) y no energético (producción de vapor y etanol). La caña de azúcar es una fuente importante de energía renovable que representó el 19.3% de la matriz energética de Brasil en 2010, donde se han desarrollado proyectos para una mayor capacidad de generación, mejorando la eficiencia y producción de etanol de segunda generación, mediante hidrólisis del bagazo. Leal *et al.* [37] evaluaron el potencial de utilizar caña de azúcar y caña energética (caña con menos contenido de sacarosa pero mejores propiedades energéticas). La caña energética presentó mejores propiedades para la producción de etanol, proyectando a 2030 entre 14.000 y 22.000 l/ha, excedentes de energía a la red entre 5.2 y 5.4 MWh/ha/año, y una eficiencia de recuperación energética entre 46.7 y 48.4%. Estos autores concluyeron que la caña de azúcar y la caña energética se deben integrar para mejorar el desempeño en términos energéticos y económicos. Birru *et al.* [38] investigaron las posibles mejoras en la eficiencia energética y el potencial de excedentes de energía para venta a la red en Brasil, donde evaluaron los siguientes escenarios: (1) reemplazo de motores de vapor por motores eléctricos y turbinas de contrapresión de mayor capacidad; (2) calderas de alta presión, turbina de condensación con extracción de vapor y motores eléctricos; y (3) las mismas mejoras del caso 2, adicionando secado del bagazo. Los impactos de estas modificaciones mostraron que se produce más energía a medida que los cambios son más avanzados. La eficiencia de cogeneración aumentó 4%, 21% y 31% para los casos 1, 2 y 3, respectivamente. Con dichas mejoras, se podría producir hasta 30% más de energía excedente en comparación con la situación actual. Chantasiriwan [39] desarrolló un análisis de las mejoras del sistema de cogeneración mediante el secado de bagazo con vapor. Encontró que utilizando 1 kg/s de vapor se reduce la humedad del bagazo del 52% al 46.3%, generando un 5% más de potencia y requiriendo un 20% menos de área de intercambio de calor en el calentador de aire, respecto al mismo sistema sin secado del bagazo. Vergara *et al.* [40] encontraron que es viable reemplazar el uso del carbón con fines energéticos en la “Hacienda Lucerna” (Colombia), utilizando el 16.2% del total de residuos agroindustriales generados al mes para la hacienda. Lo cual podría reducir las emisiones de CO₂ en un 40% respecto al consumo de carbón y un 82% respecto al transporte, y adicionalmente generar un ahorro de ~US\$62.000 en 5 años.

Mediante estudios técnicos y modelos de simulación se ha buscado el incremento en la eficiencia energética en la industria. Ensinas *et al.* [41] desarrollaron un análisis técnico-económico optimizando el sistema de evaporación de un ingenio, buscando los mínimos costos de inversión y operación. Mediante la optimización de la estación de evaporación se redujo el consumo de vapor, evaporando la misma cantidad de agua utilizando un 16% menos de energía. Además, los costos de inversión en los equipos se compensan con los costos asociados a la reducción de consumo de vapor. Pina *et al.* [42] evaluaron la reducción de los consumos de vapor y agua, mediante la integración de sistemas térmicos para dos alternativas: en el primer caso todo el jugo de caña se dedica a la producción de

etanol, y en el otro caso, el jugo se divide 50%/50% en producción de azúcar y de etanol. Los autores concluyeron que la integración térmica redujo el consumo de vapor en un 35%, y el de agua entre 13 y 24%. Además, se encontró que calentar el jugo de caña con vapores del primer efecto de evaporación, redujo notablemente las irreversibilidades del proceso. La Madrid *et al.* [43] mediante un análisis CFD (*Computational Fluid Dynamics*) evaluaron la transferencia de calor en intercambiadores de calor abiertos para la evaporación del agua en la producción de panela. Encontraron que el coeficiente de transferencia de calor de ebullición varía entre 1000 y 5500 W/m². Adicionalmente, concluyeron que la planta es autosuficiente a sus requerimientos térmicos mediante la combustión del bagazo remanente del proceso. Higa *et al.* [44] estudiaron la integración térmica del proceso de evaporación de múltiples efectos para el caso de 3 efectos, 4 efectos y 5 efectos en el tren de evaporación. Concluyeron que la extracción de vapor en los últimos efectos tiene un mayor potencial de recuperación energética; siendo el tren de evaporación con 3 efectos el más óptimo térmicamente. Chantasiriwan [45] mediante un modelo matemático, evaluó la optimización del área de transferencia de calor en los últimos dos intercambiadores de calor del calentamiento de jugo y los primeros cuatro efectos de evaporación. Encontró que una distribución óptima del área de transferencia de calor puede incrementar la economía del vapor entre 3.25% y 5.92%. Chantasiriwan [46] comparó mediante un modelo matemático el tren de evaporación de un ingenio azucarero operando con flujo en paralelo y flujo contracorriente. Concluyó que, bajo las mismas condiciones, operar con flujo contracorriente puede ahorrar 12.83 kg/s de vapor, responsables de generar 1.17 MW más de potencia en comparación con el tren de evaporación operando con flujo paralelos, y una eficiencia de cogeneración 3.2% mayor. Chen y Ruan [47] desarrollaron un modelo matemático para evaluar un sistema de evaporación de múltiples efectos. Encontraron que mediante la recompresión térmica de vapor es posible reducir el consumo del mismo en un 46.56%. Sin embargo, se requiere incrementar el área de transferencia de calor en un 24.20%.

Varios autores han evaluado el uso, desempeño y oportunidades en intercambiadores de calor de placas para diversas aplicaciones. Zhang *et al.* [48] realizaron una revisión de la literatura sobre mejoras en los intercambiadores de calor de placas. Concluyeron que los intercambiadores de tipo chevron corrugados presentan una mejora en la transferencia de calor respecto al incremento del ángulo chevron. Sin embargo, esto aumenta la caída de presión en el intercambiador. Nilpueng *et al.* [33] estudiaron el desempeño de un intercambiador de calor de placas, trabajando con agua en una única fase. Encontraron que el ángulo chevron de 30° posee un coeficiente de transferencia de calor y una caída de presión 2.51 y 1.87 veces mayor respectivamente, en comparación con el ángulo chevron de 60°. Dardour *et al.* [49], mediante un modelo matemático, evaluaron el desempeño de un intercambiador de placas líquido/líquido, reduciendo la temperatura de agua caliente de 180°C a 109°C, y elevando la del agua fría de 40°C a 101°C, presentando una eficacia del 50.8%. Zhen *et al.* [50] evaluaron el desempeño de un intercambiador de calor de placas utilizando nano fluidos (agua-CuO, agua-SiC, agua-Al₂O₃ y agua-Fe₃O₄) para flujos en el rango de 3-9 L/min. Encontraron que los cuatro nano fluidos mejoran notablemente la transferencia de calor en comparación con el agua, donde la mezcla agua-Fe₃O₄ y una

concentración del 1.0 wt. % presentó el mayor incremento en el coeficiente de transferencia de calor para un flujo de 8 L/min, 30.8% mayor respecto al agua. Esto se debe al incremento en la conductividad térmica del fluido con el aumento de nanopartículas en el mismo, así como al aumento de los choques e interacción entre las nano partículas del fluido. Kabeel *et al.* [51] mediante un estudio experimental de transferencia de calor utilizando un intercambiador de calor de placas, concluyeron que el coeficiente de transferencia de calor se puede incrementar hasta 13% con el uso de nano fluidos a una concentración de 4%. Sin embargo, esto puede tener efectos negativos, incrementando la caída de presión hasta un 45% para dicha concentración.

Finalmente, otros estudios han investigado efectos y posibles soluciones de las incrustaciones en equipos de transferencia de calor. Bansal y Chen [52] realizaron una revisión de la literatura sobre las incrustaciones en la industria lechera, y concluyeron que las incrustaciones se pueden mitigar con las condiciones térmicas e hidráulicas adecuadas, donde incrementar el flujo y reducir la temperatura del mismo tiende a reducir las incrustaciones. Por otra parte, mencionan que los intercambiadores de calor de placas presentan menores incrustaciones que los intercambiadores de coraza y tubos, debido a una turbulencia mayor en su interior. Steinhagen *et al.* [53] presentaron un estudio de los costos asociados a las incrustaciones en intercambiadores de calor usados en diversos contextos industriales en Nueva Zelanda. Las principales estrategias reportadas para mitigar las incrustaciones fueron: limpieza mecánica (47.6%), limpieza química (35.0%), y limpieza con agua (20.7%). Finalmente, estimaron que los costos asociados a los problemas de incrustación varían entre 30 y 56 millones de dólares. Mohanty *et al.* [54] evaluaron el efecto de las incrustaciones en intercambiadores de calor mediante el factor C ($C = \frac{V}{\sqrt{\Delta P}}$), el cual relaciona la velocidad del fluido y la caída de presión en el intercambiador de calor, las cuales varían a medida que se incrementa o disminuye las incrustaciones según sea el caso. Encontraron que para los intercambiadores con altos niveles de incrustación, el factor C se reduce 43% respecto al factor de diseño, sin embargo, con una adecuada limpieza se puede recuperar hasta el 90%. Dicho factor es una herramienta útil para realizar seguimientos y programar el mantenimiento a los equipos de transferencia de calor.

6. Metodología

Con el uso de herramientas computacionales CAD y CAE como Autodesk Inventor y ANSYS con sus diversos modelos, se diseñan y simulan las piezas necesarias para las modificaciones en el sistema experimental de calentamiento, las cuales posteriormente se construyen e instalan. Adicionalmente se realizan pruebas en laboratorio para la selección y adecuación de sensores y el sistema de control del SEC. Finalmente, se desarrolla un modelo CFD que permite evaluar el sistema experimental de calentamiento de Cenicaña. con este modelo se caracteriza la operación del intercambiador de calor y sus variables de operación más relevantes.

6.1.Descripción del sistema experimental de calentamiento

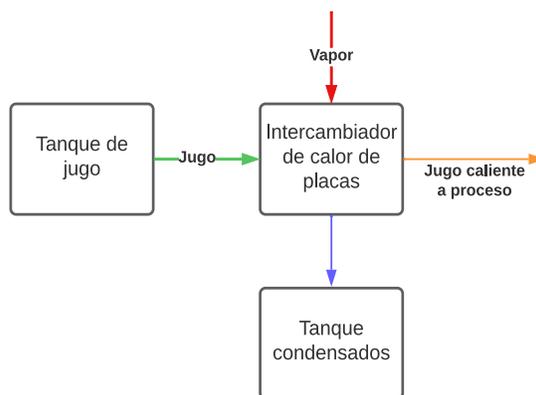
El sistema experimental de calentamiento (SEC) está compuesto por un tanque de recepción de jugo claro, desde el cual, mediante la acción de una bomba centrífuga, se

envía el jugo al intercambiador de calor de placas, donde se produce la transferencia de calor entre los condensados de vapor de escape a temperatura de 105°C, y el jugo claro con un flujo de 3 t/h, y temperatura de 45°C. Finalmente, el jugo claro caliente se envía al proceso y el vapor condensado se recolecta en un tanque para posteriormente recircular.

Adicionalmente, el SEC está instrumentado con un medidor de flujo, así como con sensores de presión y temperatura, ver Figura 5.



a) SEC Cenicaña



b) Operación SEC

Figura 5. Sistema experimental de calentamiento previo a modificaciones.

6.1.1. Intercambiador de calor de placas

El SEC posee un intercambiador de calor de placas fabricado por Alfa Laval, referencia TL3, ver Figura 6. Este intercambiador es adecuado para sistemas donde se requiere una alta recuperación de calor, y se puede utilizar en aplicaciones de biotecnología y farmacia, energía y suministros, alimentación y bebidas, pulpa y papel, tratamiento de aguas y residuos, entre otros. Adicionalmente, posee ventajas tales como: alta eficiencia energética, configuración flexible que permite modificar el área de transferencia de calor, y fácil instalación debido a su tamaño compacto [55].



Figura 6. Intercambiador de calor de placas Alfa Laval TL3.

6.2. Retrolavado

Para llevar a cabo el retrolavado de manera automática se requiere principalmente una válvula de 3 vías, la cual permita cambiar la dirección del fluido del jugo en el intercambiador de calor, además de otras válvulas que permitan terminar de direccionar el jugo, ver Figura 7. En la Figura 7, las líneas sólidas representan el camino que sigue el fluido en cada operación, mientras que las líneas discontinuas representan el camino que podría seguir al accionarse la válvula para cambiar su modo de operación de normal a retrolavado, y viceversa.

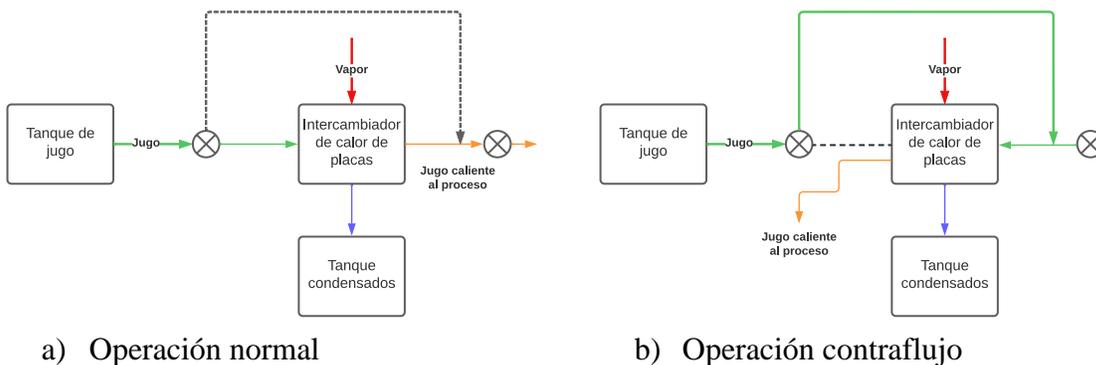


Figura 7. Retrolavado en el intercambiador de calor.

6.3. Limpieza in situ (*Cleaning in place*)

Para la operación de un sistema CIP se requieren recipientes que contengan y recuperen las soluciones de limpieza, así como válvulas, bombas, tuberías, y la instrumentación correcta para llevar a cabo la limpieza de manera autónoma [56]. El CIP en el SEC requiere de 2 soluciones de limpieza: ácido fosfórico y soda caustica, que permiten eliminar las incrustaciones inorgánicas y orgánicas, respectivamente. Debido a esto, se requiere la instalación de dos tanques que contengan cada solución por separado, y cada uno debe estar adecuado con una bomba dosificadora que permita enviar la cantidad de solución requerida

al SEC para hacer su limpieza. Adicionalmente, se debe instalar un sensor a la salida del intercambiador de calor, mediante el cual se identifica el momento en el cual el CIP debe entrar en operación.

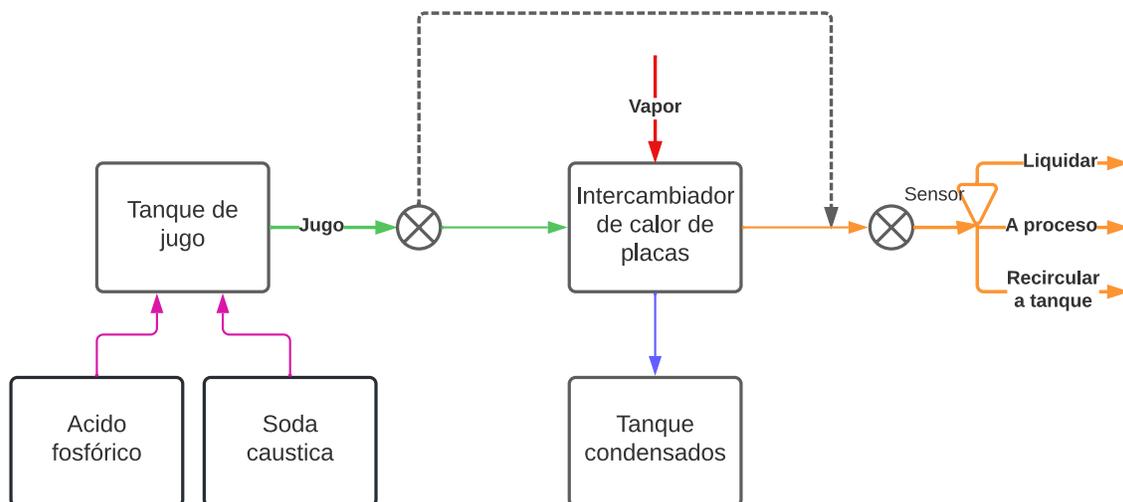


Figura 8. CIP en el SEC.

6.3.1. Prueba soluciones de limpieza

Con el objetivo de evaluar las soluciones de limpieza, se realizó una prueba de titulación para el ácido fosfórico y soda caustica, añadiendo cantidades conocidas del ácido y/o la soda con una micropipeta volumétrica. De esta manera es posible conocer y controlar la cantidad de sustancia añadida a un recipiente con agua desionizada. Dentro de la solución se sumergen un medidor de pH y de conductividad, con el fin de medir y cuantificar los cambios en estas propiedades (pH y conductividad) en función de la concentración de la solución.

6.4. Pruebas de fugas

Debido a los cambios e instalaciones realizadas en el SEC, es importante evaluar que la nueva configuración pueda transportar los fluidos a través de ella sin fugas que representen pérdidas del sistema. Cabe mencionar que las pruebas de fuga sólo se realizaron en la tubería que transporta el jugo de caña, puesto que fue la sección intervenida. Por el contrario, la sección correspondiente al fluido calefactor no se intervino.

Para la prueba de fugas se hace circular agua a temperatura ambiente a través de la tubería por un tiempo entre 5 y 10 minutos, de esta manera identificar en que zonas están las posibles fugas y realizar las respectivas correcciones, las cuales pueden variar desde realizar un mejor ajuste mecánico (ajustar las uniones roscadas), instalar y/o reforzar la aplicación de teflón como sellante, o con la aplicación de sellador de roscas (shelac).

6.5. Análisis intercambiador de calor de placas

Debido a dificultades externas en el tiempo de entrega del sistema de control electrónico del SEC, no fue posible realizar la evaluación del sistema de transferencia de calor en condiciones de operación real. Por este motivo, se procedió con la alternativa de evaluar el

intercambiador de calor mediante un análisis CFD, en el cual se pueden estudiar perfiles de temperatura, caídas de presión, velocidad y direcciones del fluido.

El análisis CFD (dinámica de fluidos computacional) se desarrolló mediante el uso del software ANSYS, con el módulo *Fluent*, el cual es un software ampliamente usado en la industria, academia e investigación. Este programa permite el desarrollo y solución de problemas de dinámica de fluidos, para modelar flujos, turbulencias, transferencia de calor, combustión, etc. El análisis CFD se implementó mediante el método numérico de volúmenes finitos, el cual aproxima la solución de ecuaciones diferenciales parciales subdividiendo el dominio en partes menores, llamadas volúmenes finitos. Para obtener una simulación CFD correcta, así como un análisis adecuado de los resultados, se recomienda seguir los pasos a continuación [57][58].

6.5.1. Formular el problema

Para ello es recomendable responder las siguientes preguntas que permitan entender el problema.

- ¿Cuál es el objetivo del análisis?

Desarrollar un modelo que permita evaluar la transferencia de calor y entender el comportamiento de los fluidos al interior del intercambiador de calor de placas.

- ¿Qué geometría utilizar?

La geometría debe replicar lo más fielmente posible las condiciones del intercambiador de calor de placas de la sección 6.1.1. Además, se evalúa la diferencia en el comportamiento del fluido variando el ángulo de los canales (chevron) 30°, 45° y 60°.

- ¿Qué tipo de modelo utilizar?

Se utiliza un modelo estacionario, asumiendo que las condiciones se mantienen estables durante la operación.

6.5.2. Modelar la geometría y el dominio del flujo

Consiste en construir el modelo geométrico CAD, el cual contenga las características más importantes del cuerpo y a la vez simplificar las no necesarias. Para este modelo se utiliza el software Autodesk Inventor para su construcción y ensamble, y posteriormente se carga al software ANSYS.

6.5.3. Establecer las condiciones de frontera

Las propiedades del jugo de caña se definen en la Tabla 1. Por otra parte, las propiedades del fluido calefactor (agua) y de las paredes del intercambiador de calor (acero) se toman de la base de datos del software.

Tabla 1. Propiedades del jugo de caña.

Densidad [kg/m ³]	1036.3
Calor específico [kJ/kg·K]	3890

Conductividad térmica [W/m·K]	0.6
Viscosidad [Pa·s]	0.00089

Las condiciones de frontera del modelo se presentan en la Tabla 2. Adicionalmente, en el modelo se asume que hay condiciones de estado estacionario, el fluido es viscoso y turbulento, las paredes del intercambiador son adiabáticas, excepto la placa que separa los dos fluidos. Se considera que la velocidad del fluido es constante y uniforme en las entradas del intercambiador y no hay cambios de fase en los fluidos [59][60].

Tabla 2. Condiciones de frontera del modelo.

Frontera	Condición y valor
Entrada de jugo	Flujo masico = 0.83 kg/s
	Temperatura = 318.15°K
Entrada de agua	Flujo masico = 0.83 kg/s
	Temperatura = 378.15°K
Salida de jugo	Presión estática = 0 atm
Salida de agua	Presión estática = 0 atm
Paredes externas del intercambiador	Stationary, Heat flux = 0
Pared compartida del intercambiador	Stationary, coupled, thickness = 1 mm

6.5.4. Generar la malla

Consiste en discretizar el dominio en una “malla”, la cual subdivide el volumen de control en dominios menores, en los cuales se resuelven las ecuaciones del modelo. Para ello se seleccionaron elementos tetraédricos con un tamaño de 3 mm. El número total de nodos y elementos para cada modelo se presenta en la Tabla 3.

Tabla 3. Información malla del modelo.

	Nodos	Elementos
Chevron 30°	142372	601303
Chevron 45°	139698	590466
Chevron 60°	141543	598125

6.5.5. Establecer la estrategia de simulación

A continuación, se presentan las ecuaciones de Navier-Stokes que gobiernan el modelo, donde u, ρ, t, p, μ, T, k y C_p representan la velocidad, densidad, tiempo, presión, viscosidad dinámica, temperatura, conductividad térmica, y calor específico, respectivamente [59][61][60].

Conservación de la masa:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad \text{Ecuación 1}$$

Conservación de la cantidad de movimiento:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - (\rho \overline{u_i u_j}) \right] \quad \text{Ecuación 2}$$

Conservación de la energía:

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho C_p T u_i) = -\frac{\partial}{\partial x_i} \left(-k \frac{\partial T}{\partial x_i} + \rho C_p \overline{u_i T} \right) \quad \text{Ecuación 3}$$

El flujo del modelo es turbulento, por lo cual, adicionalmente a las ecuaciones de conservación se deben solucionar 2 ecuaciones de transporte del modelo k-épsilon, el cual es un modelo semi empírico, robusto y preciso. El modelo representa las ecuaciones de energía cinética (k) y su tasa de disipación (ϵ) en la turbulencia [59][60][62].

6.6. Análisis intercambiador de calor

La Ecuación 4 representa la cantidad de calor que intercambia una sustancia con un flujo másico \dot{m} , y las ecuaciones 5 y 6, presentan las ecuaciones para evaluar la transferencia de calor en intercambiadores.

$$Q = \dot{m} \cdot C_p \cdot \Delta T \quad \text{Ecuación 4}$$

$$Q = U \cdot A \cdot \Delta T_{Ln} \quad \text{Ecuación 5}$$

$$\Delta T_{Ln} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2} \right)} \quad \text{Ecuación 6}$$

7. Análisis de resultados

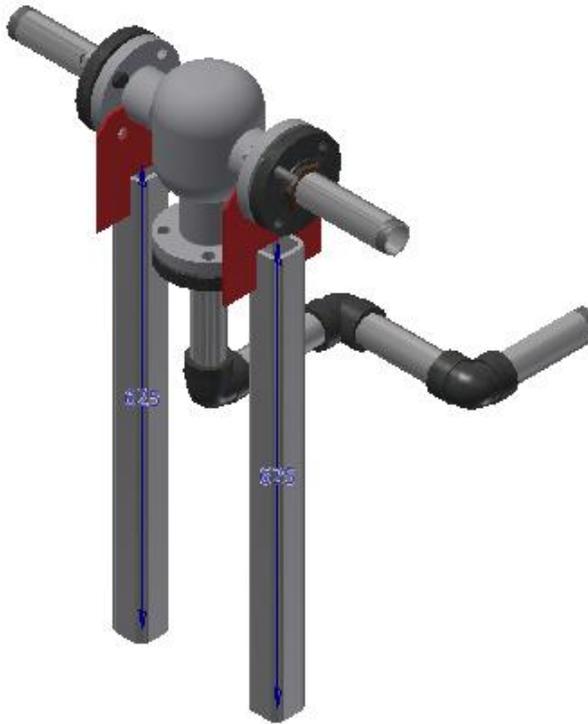
7.1. Diseño, construcción e instalación de piezas para el retrolavado y CIP

Mediante el uso del software Autodesk Inventor se realizó el diseño de las piezas necesarias para el montaje y adecuación del proceso de retrolavado y CIP, y las piezas fueron simuladas con ayuda del software ANSYS y su módulo *Static structural* para comprobar su resistencia ante las cargas que debe soportar en su operación.

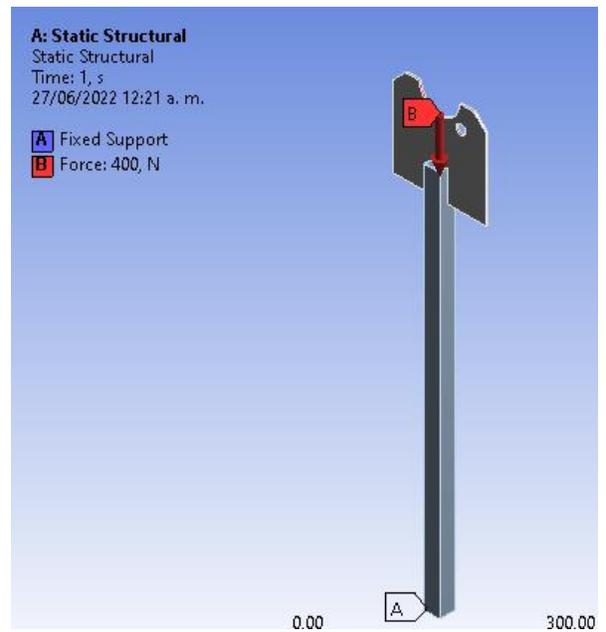
7.1.1. Base válvula 3 vías

Esta base permite cargar y soportar la válvula de 3 vías encargada de direccionar el fluido al retrolavado y operación normal. La base debe soportar la masa de la válvula de aproximadamente 40 kg, permitiéndole permanecer centrada respecto al resto de tuberías, ver Figura 9a y b. La estructura fue calculada y diseñada en acero estructural A36, y los resultados de la simulación estructural se presentan en la Figura 9c, la cual muestra los

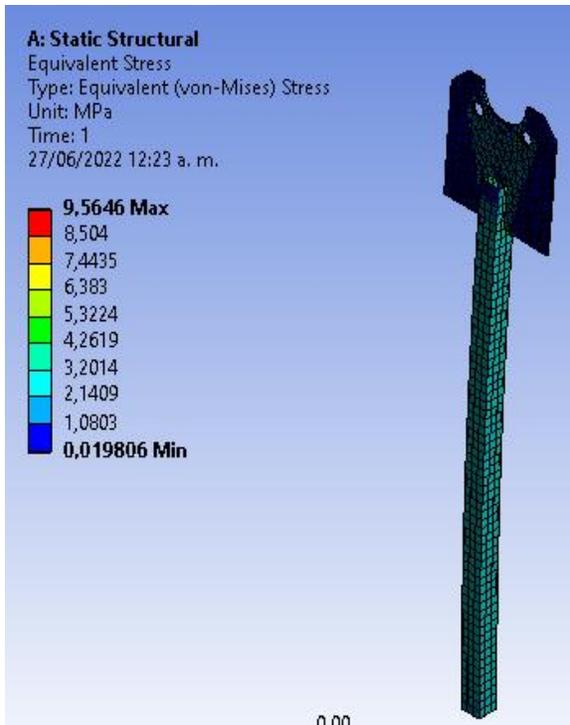
esfuerzos a los que se ve sometida la estructura. Se observa que el máximo esfuerzo es de 9.56 MPa. Debido a que el límite de diseño es de 250 MPa [63], se concluye que la base puede soportar las cargas de diseño sin poner en riesgo la integridad de su estructura. Este resultado se corrobora con la Figura 9d, donde se observa que el factor de seguridad es mayor a 15 en toda la estructura. Por lo anteriormente mencionado, se procede a la fabricación y montaje de la base de la válvula 3 vías, ver Figura 9e y f.



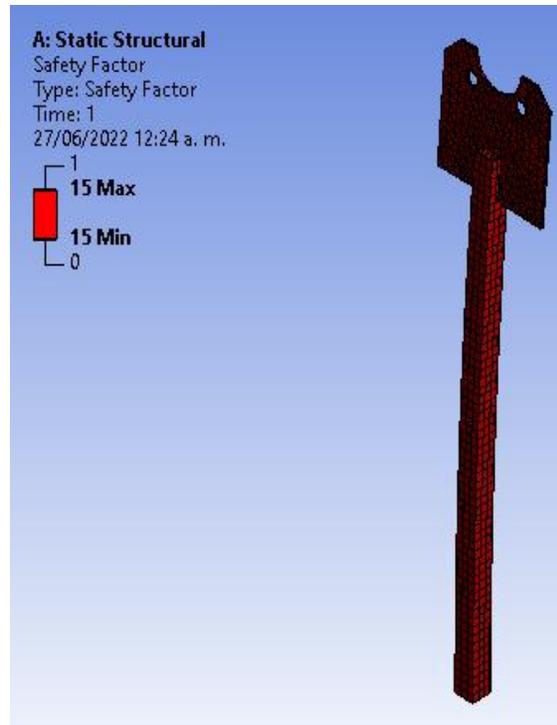
a) Diseño base válvula 3 vías



b) Condiciones de simulación



c) Esfuerzos equivalentes



d) Factor de seguridad



e) Montaje base válvula 3 vías



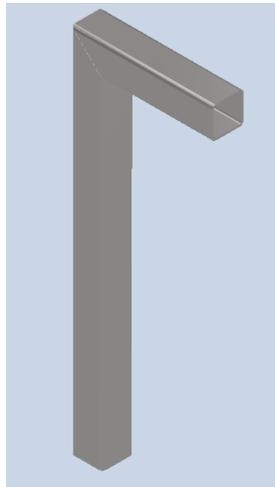
f) Instalación en el SEC

Figura 9. Diseño y simulación base válvula 3 vías.

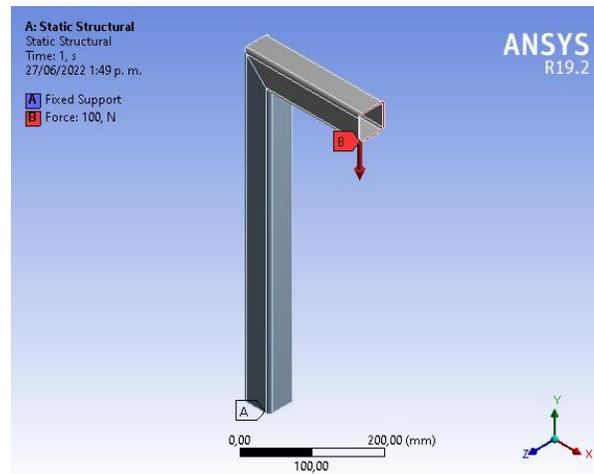
7.1.2. Base válvula on-off

La válvula on-off, es una válvula complementaria en el proceso del retrolavado, cuya función es cerrar el paso al fluido en la dirección habitual. De esta manera, el fluido se ve

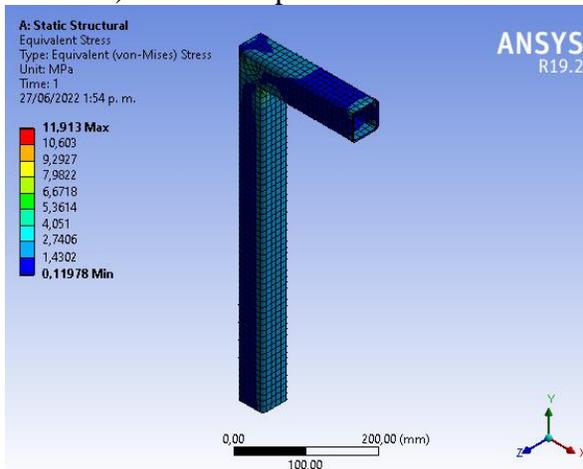
forzado a atravesar en la dirección opuesta a la habitual el intercambiador de calor de placas, promoviendo la remoción de partículas sólidas retenidas y/o acumuladas en las paredes del intercambiador de calor. La válvula tiene una masa de aproximadamente 10 kg, y la estructura fue diseñada con perfil de acero estructural A36 1”x1”x1/8”. La Figura 10 presenta el proceso de diseño y simulación de la base para la válvula on-off, donde la Figura 10a y b, presentan el diseño y las condiciones de carga a las que se somete la estructura, respectivamente. La Figura 10c presenta los esfuerzos equivalentes que debe soportar la estructura, y se observa que el esfuerzo máximo a soportar es 11.9 MPa. Sin embargo, el acero estructural A36 soporta máximo hasta 250 MPa [63], lo cual deriva en un alto factor de seguridad, superior a 15 (ver Figura 10d). Como consecuencia, se concluye que la estructura cumple sus requerimientos estructurales y se procede a la fabricación e instalación (ver Figura 10e).



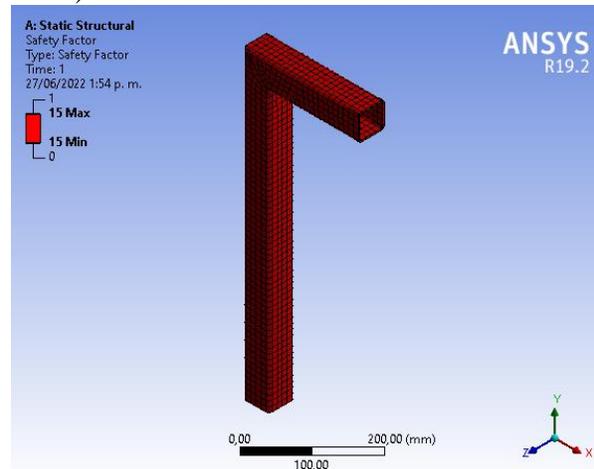
a) Diseño soporte válvula on-off



b) Condiciones de simulación



c) Esfuerzos equivalentes



d) Factor de seguridad

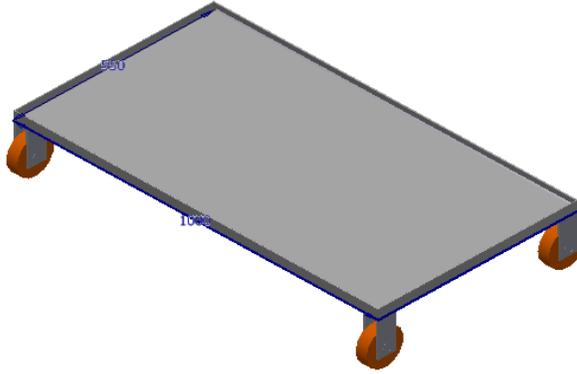


e) Montaje válvula on-off

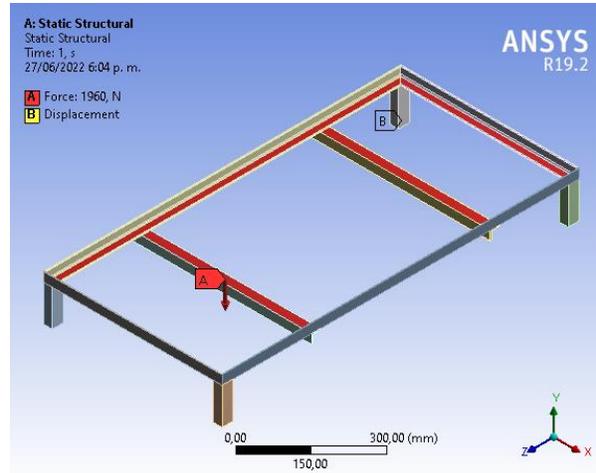
Figura 10. Diseño y simulación base válvula on-off.

7.1.3. Base tanques CIP

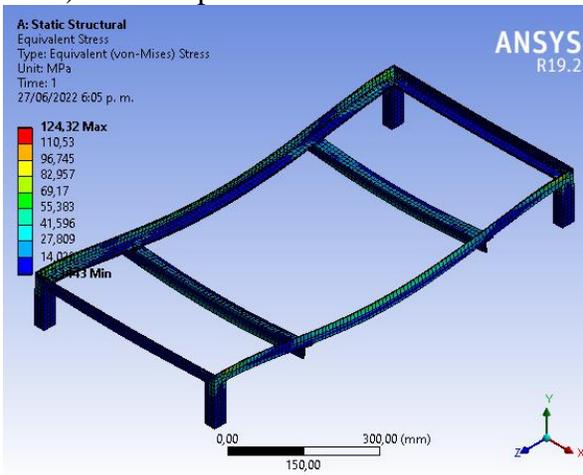
Como se mencionó en la sección 6.3, la implementación del CIP requiere de dos tanques para almacenar las soluciones de limpieza, teniendo en cuenta que el objetivo del SEC es que sea una plataforma móvil que permita experimentar en diferentes ingenios, se diseñó una plataforma móvil donde se ubican los tanques y sus bombas dosificadores y que sea de fácil adaptación a los diferentes ambientes de trabajo. Por lo tanto, la plataforma se diseñó para estar soportada sobre unos rodachines (ver Figura 11a). La plataforma fue diseñada con ángulos de acero estructural A36 1"x1"x1/8". La Figura 11b presenta las condiciones de carga y diseño de la plataforma, la cual debe cargar máximo 200kg (capacidad máxima de los tanques). Sin embargo, por economía de insumos, los tanques en operación normal no se llenarán al máximo. Pese a esto, el diseño debe soportar la carga máxima. La Figura 11c presenta el máximo esfuerzo que debe soportar la plataforma, el cual es de 124MPa. Ya que el acero A36 soporta hasta 250 MPa [63], la plataforma en su punto más crítico y con la máxima carga posible presenta un factor de seguridad mínimo de 2 (Figura 11d). Se concluye que es un diseño seguro, y se procede a su fabricación e instalación (Figura 11e). Por otra parte, se seleccionaron los rodachines de acuerdo a las cargas de diseño: rodachines de 4" que soportan hasta 110 kg cada una, de acuerdo a la información del fabricante [64].



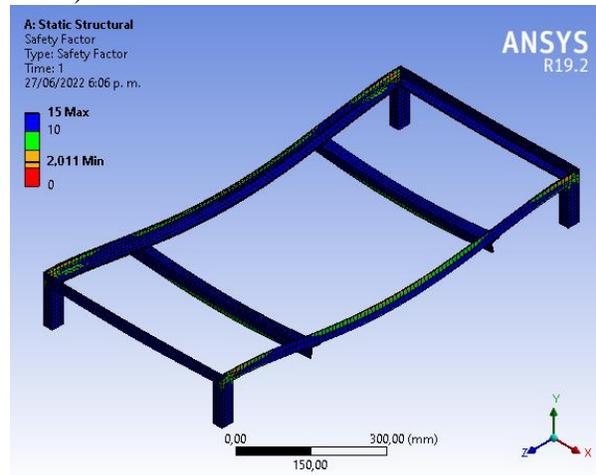
a) Diseño plataforma CIP



b) Condiciones de simulación



c) Esfuerzos equivalentes



d) Factor de seguridad



e) Montaje soporte y tanques CIP

Figura 11. Diseño y simulación plataforma CIP.

7.2. Pruebas de fugas

Mediante una prueba de fugas en una zona parcial del SEC se observó una operación con fugas menores a la entrada del medidor de flujo y del intercambiador de calor, las cuales fueron corregidas mediante la aplicación de teflón, sellante y reforzando su ajuste. Posteriormente se verificaron nuevamente las fugas en el SEC, y se puede afirmar que no se observaron fugas representativas en su operación, lo cual indica que el sistema está listo para sus futuras evaluaciones completas del sistema y posteriormente ser llevado a planta.

7.3. Pruebas de conductividad en incrustaciones

Se realizaron pruebas de conductividad y pH evaluando los cambios al variar la concentración de las soluciones de limpieza (soda caustica y ácido fosfórico). Como se observa en la Figura 12 para ambas soluciones, al incrementar la concentración en las soluciones, los cambios en el pH son grandes al inicio, pero tienden a estabilizar rápidamente lo cual dificulta identificar esos cambios mediante sensores de pH y dosificar las soluciones de limpieza requeriría sensores de alta sensibilidad. Caso contrario, al evaluar la conductividad en las soluciones de limpieza a diferentes concentraciones, donde se observa que cambios representativos en la conductividad al incrementar la concentración de la solución, lo cual permite identificar cambios con un sensor menos sensible y poder tomar decisiones en la dosificación de las soluciones.

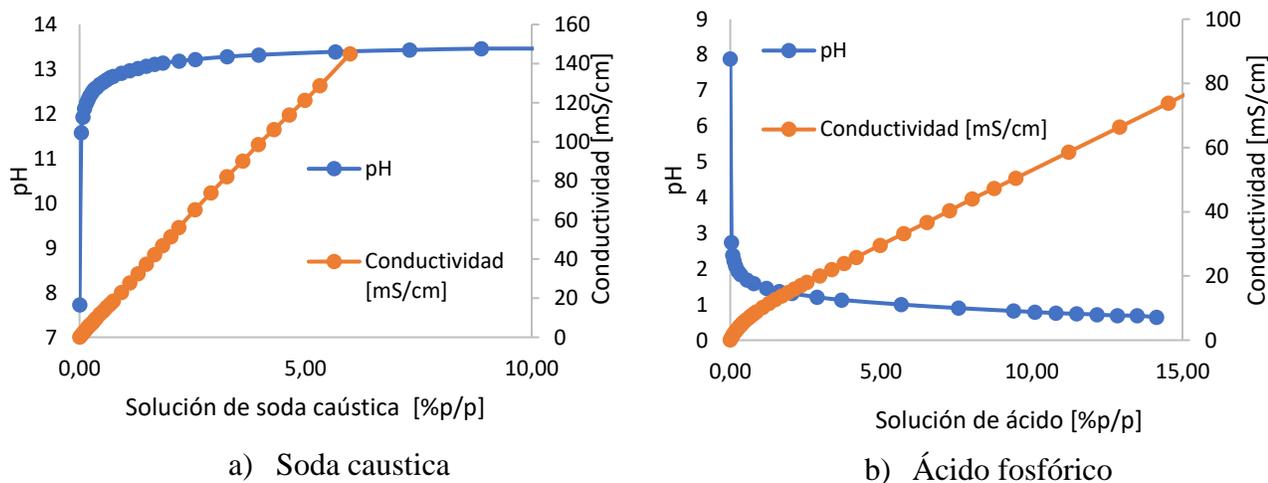


Figura 12. Pruebas de pH y conductividad.

La Figura 13 presenta la evaluación de la conductividad en la solución de ácido fosfórico con la adición de incrustaciones comunes en intercambiadores de calor, se observa que, con el incremento de la concentración de incrustaciones en la solución de ácido fosfórico, la conductividad aumenta notablemente, lo cual permite tomar decisiones de limpieza en función de la conductividad de la solución. Por otra parte, la misma prueba se realizó, pero con solución de limpieza de soda caustica, donde se evidenció que la conductividad no se ve afectada con la adición de incrustaciones en la solución. Cabe mencionar, que ambas pruebas se realizaron en un entorno controlado de laboratorio. Sin embargo, se deben validar en contexto operacional real, para poder definir las condiciones de limpieza y operación.

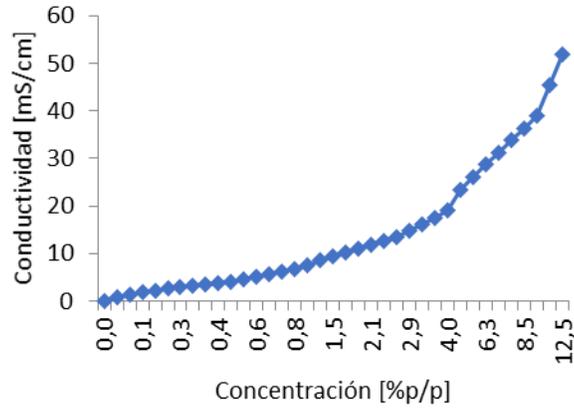


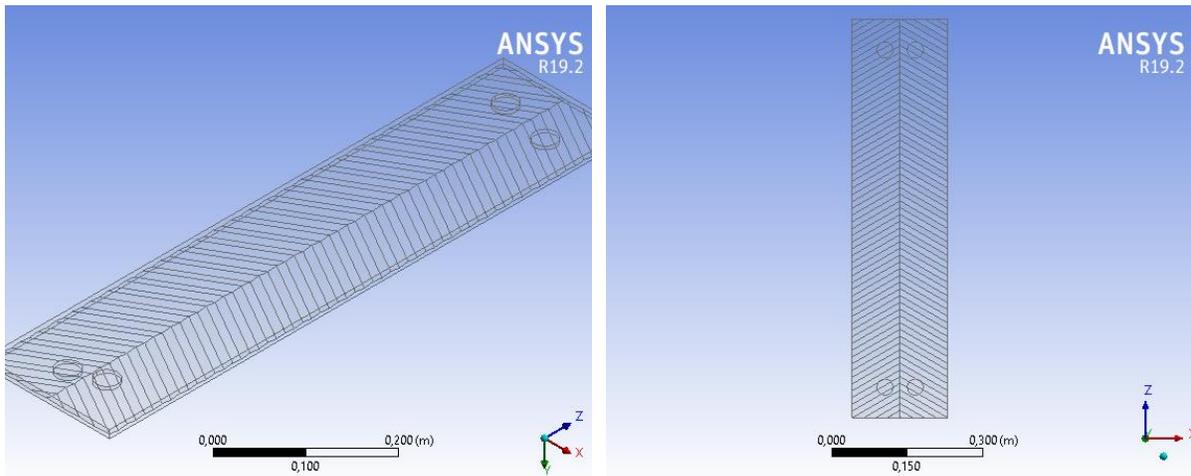
Figura 13. Conductividad vs incrustaciones.

7.4. Análisis CFD del sistema experimental de calentamiento

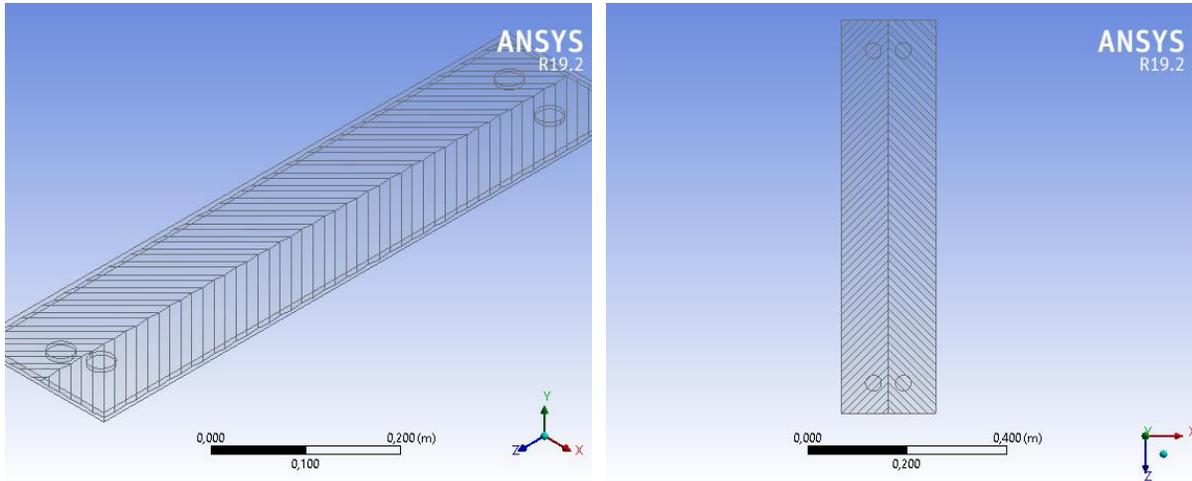
En esta sección se presentan el modelo y los resultados del análisis del intercambiador de calor de placas mediante modelado CFD. Para el modelo sólo se tuvieron en cuenta dos placas del intercambiador de calor, con el objetivo de reducir el consumo de recursos computacionales.

7.4.1. Modelo CAD del intercambiador de calor.

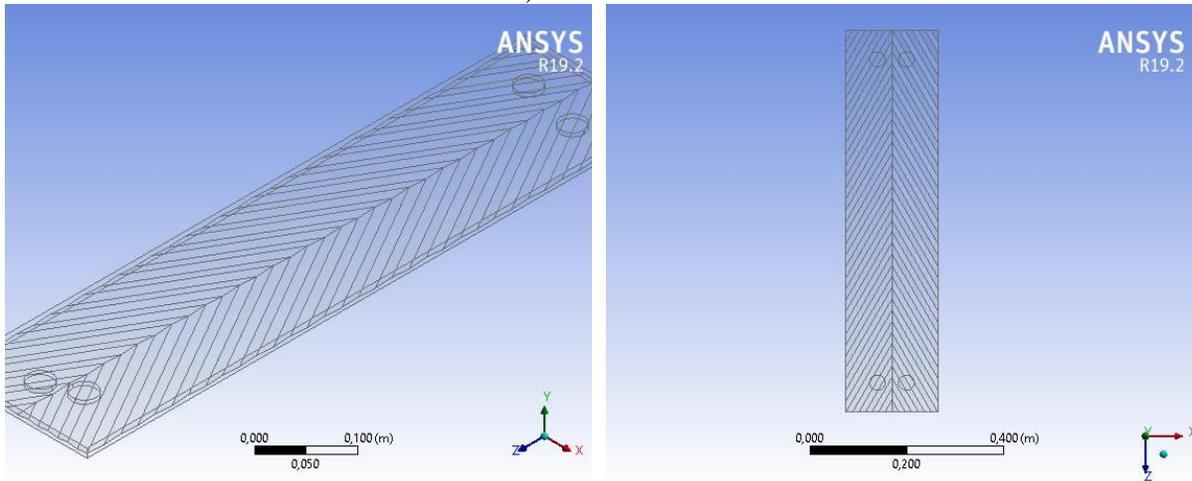
La geometría y diseño del modelo CAD utilizados en la simulación se presentan en la Figura 14, la cual presenta las 3 geometrías seleccionadas para el diseño variando el ángulo Chevron entre 30°, 45° y 60° en las placas del intercambiador.



a) Chevron 30°



b) Chevron 45°

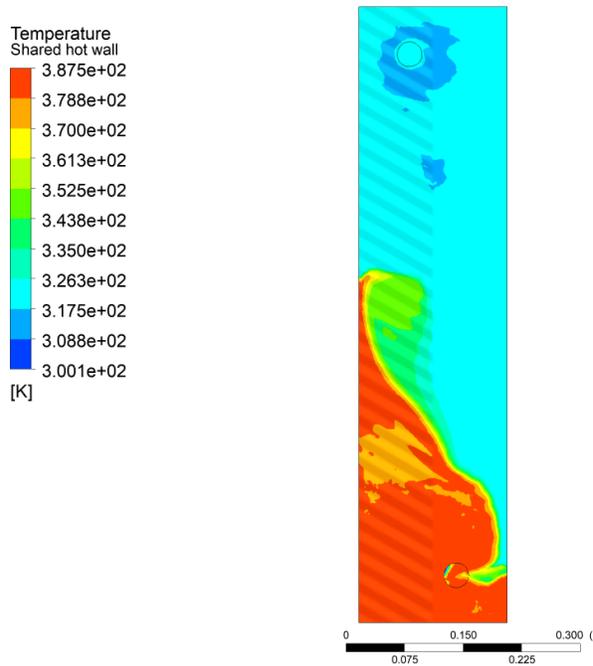


c) Chevron 60°

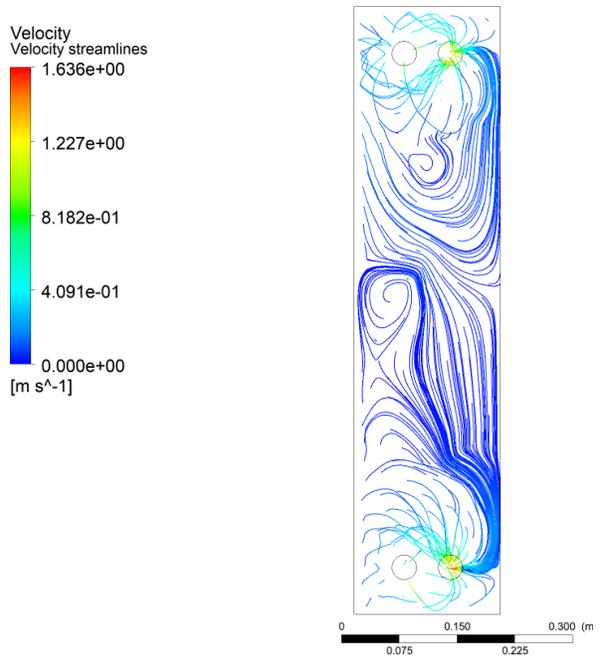
Figura 14. Geometría CAD del modelo simulado.

7.4.2. Análisis CFD

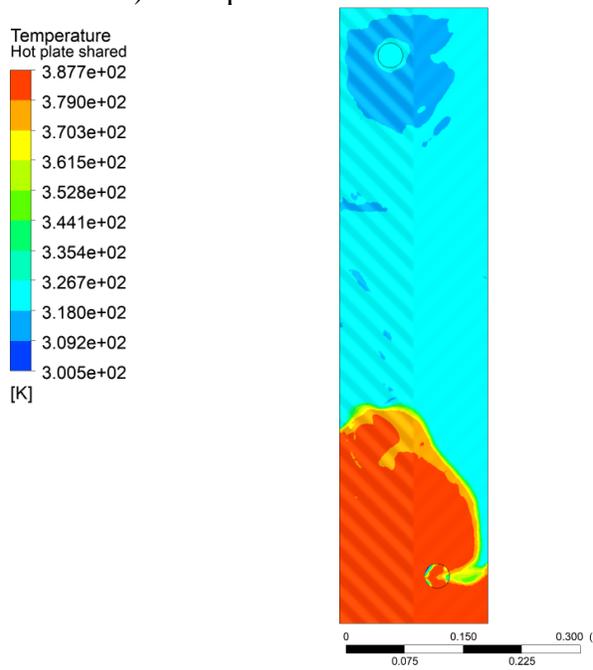
La Figura 15 presenta los perfiles de temperatura y velocidad en el intercambiador de calor para los diferentes ángulos Chevron. Se observa que para los ángulos 30° y 60° existe una zona mayor de temperaturas diferentes (ver Figura 15 a y e), lo cual indica que la transferencia de calor entre el fluido calefactor y el jugo de caña se lleva a cabo en más zonas del intercambiador. Por el contrario, para el ángulo de 45°, la zona donde existen varias temperaturas es menor, y por lo tanto el jugo recibe el calor del fluido calefactor en una menor área. Por otra parte, al evaluar la velocidad y dirección de los flujos en el intercambiador, se observa que para ángulos de 30° y 60° hay un mayor cambio de dirección en el fluido, lo cual obliga a los fluidos a recorrer un área mayor del intercambiador, desencadenando en una mayor transferencia de calor entre éstos, en comparación con el ángulo de 45° (ver Figura 15 b, d y f).



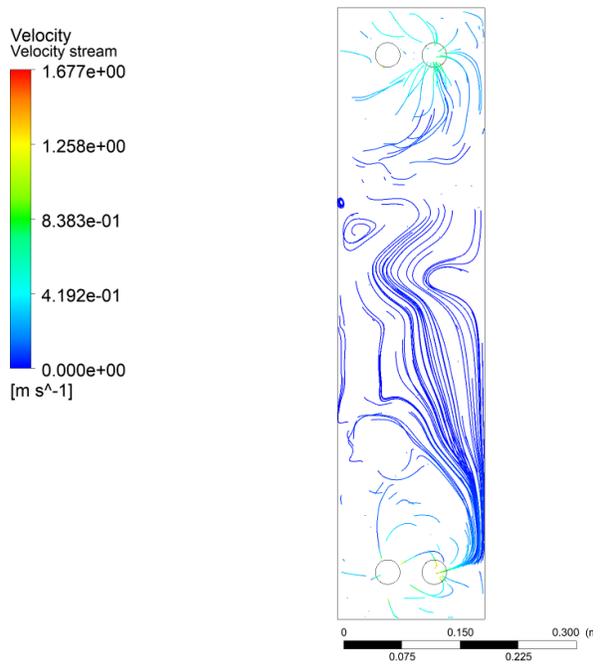
a) Temperaturas Chevron 30°



b) Velocidad Chevron 30°



c) Temperaturas Chevron 45°



d) Velocidad Chevron 45°

el de 30°, puesto que provee un alto coeficiente de transferencia de calor con una baja caída de presión.

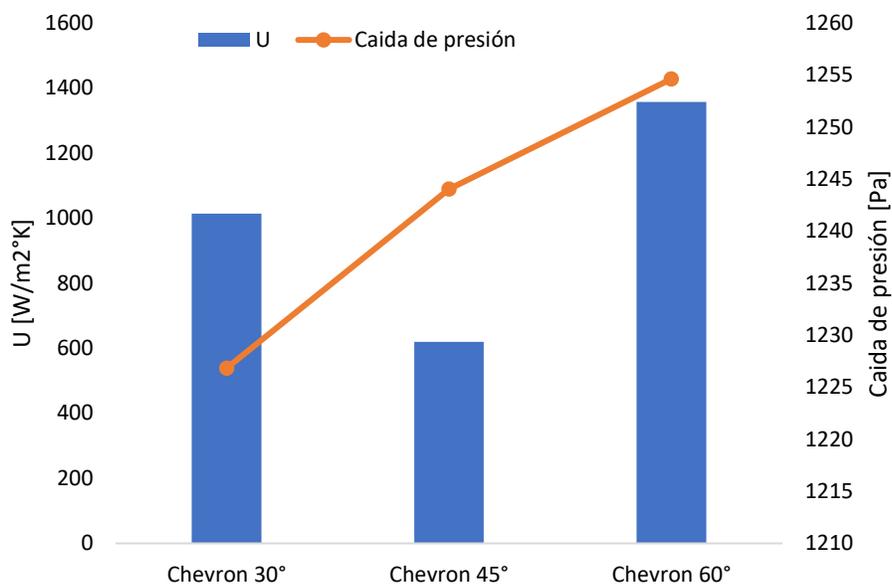


Figura 16. Coeficiente de transferencia de calor y caída de presión en el intercambiador de calor.

8. Conclusiones

El sistema experimental de calentamiento provee una herramienta móvil para la evaluación y adecuación de nuevas tecnologías en la industria de la caña de azúcar. El SEC fue modificado y adecuado para sus futuras operaciones y evaluaciones, en un contexto operacional real en ingenios. Mediante el uso de herramientas de diseño CAD y CAE se realizó el diseño y evaluación del sistema.

- Las piezas necesarias para los cambios en el SEC fueron diseñadas y simuladas mediante el uso del software Autodesk Inventor y Ansys. Todas las piezas diseñadas pueden soportar las cargas de diseño sin comprometer su integridad, y adicionalmente cuentan con un factor de seguridad superior a 2.
- Se construyeron e instalaron las piezas necesarias para las modificaciones del SEC. Adicionalmente se realizaron las pruebas parciales de fugas, y se dejó el SEC listo para finalizar su adecuación, para finalmente evaluarlo en condiciones industriales de operación.
- Se realizaron pruebas de laboratorio para la selección del sensor para monitorear las condiciones de suciedad de la solución. Se concluyó que el sensor más adecuado es el de conductividad, debido a los cambios más significativos en función de la concentración de las soluciones. De esta manera es posible una operación autónoma del SEC con ciclos de limpieza.

- Los intercambiadores de calor de placas son una alternativa para incrementar la eficiencia energética en el proceso debido a sus altos coeficientes de transferencia de calor, lo que resulta en una alta transferencia de calor al fluido del proceso.
- El ángulo Chevron influye directamente en el proceso de transferencia de calor, donde se evidenció que los ángulos de 30° y 60° son más eficientes con una transferencia de calor 1.6% y 2.3% mayor respecto al ángulo de 45°.
- La caída de presión se ve directamente afectada con el incremento del ángulo de Chevron, el cual para un ángulo de 60° presentó la mayor caída de presión (1255 Pa) y el ángulo de 30° la menor (1227 Pa).
- El ángulo Chevron 30° se considera el más óptimo para el proceso, puesto que proporciona un alto coeficiente de transferencia de calor de 1014 [W/m²K] y la menor caída de presión (1227 Pa) en comparación con los otros ángulos.

9. Bibliografía

- [1] la enciclopedia libre Wikipedia, “Azúcar,” 2022. <https://es.wikipedia.org/wiki/Azúcar> (accessed Feb. 25, 2022).
- [2] la enciclopedia libre Wikipedia, “Azúcar de caña,” 2021. https://es.wikipedia.org/wiki/Azúcar_de_caña (accessed Feb. 25, 2022).
- [3] CENICAÑA, “Proceso de obtención de azúcar,” 2014, 2014. <https://www.cenicana.org/proceso-de-obtencion-de-azucar/> (accessed Feb. 20, 2022).
- [4] la enciclopedia libre Wikipedia, “Ingenio azucarero,” 2022. https://es.wikipedia.org/wiki/Ingenio_azucarero (accessed Feb. 22, 2022).
- [5] Procana, “Subproductos y Derivados de la Caña.” <https://procana.org/site/subproductos-y-derivados-de-la-cana/> (accessed Feb. 23, 2022).
- [6] Asocana, “Sector Agroindustrial de la Caña,” *Sector Agroindustrial de la Caña*, 2017. <https://www.asocana.org/publico/info.aspx?Cid=215%0A> (accessed Mar. 01, 2022).
- [7] CIAMSA, “Industria Azucarera Colombiana,” 2017, 2017. <https://www.ciamsa.com/es/unidades-de-negocio/ciamsa-comercializadora/industria-azucarera-colombiana/> (accessed Aug. 31, 2022).
- [8] SICEX, “Azúcar, uno de los grandes motores de la economía en Colombia,” 2019. <https://sicex.com/blog/azucar-uno-de-los-grandes-motores-de-la-economia-en-colombia/> (accessed Feb. 19, 2022).
- [9] Caracol Noticias, “Caña de azúcar, el gran motor de la economía en el Valle del Cauca,” *Noticias Caracol*, 2017. <https://noticias.caracoltv.com/cal/cana-de-azucar-el-gran-motor-de-la-economia-en-el-valle-del-cauca> (accessed Feb. 21, 2022).
- [10] I. D. M. Presidente de la Republica de Colombia, D. M. P. Ministerio de Minas y Energía de Colombia, M. L. R. Viceministro de Energía de Colombia, and S. S. V.

- Viceministra de Minas de Colombia, “Transición energética: un legado para el presente y el futuro de Colombia Iván Duque Márquez Presidente de la República,” *Minist. Minas y Energía, Colomb. Banco Interam. Desarro. BID*, p. 128, 2021.
- [11] Asocaña, “El Sector Azucarero Colombiano, más que azúcar, una fuente de energía renovable para el país,” *Cogeneración*, 2015. <http://www.asocana.org/modules/documentos/10392.aspx> (accessed Feb. 18, 2022).
- [12] CENICANA, “Programa de Procesos de Fábrica,” 2016. <https://www.cenicana.org/programa-de-procesos-de-fabrica/> (accessed Mar. 01, 2022).
- [13] Ingenio Carmelita, “Procesos Azúcar y Derivados.” <https://ingeniocarmelita.com/procesosazucaryderivados/> (accessed Mar. 01, 2022).
- [14] E. UNIVERSAL, “Transición energética en Colombia.” <https://www.eluniversal.com.co/opinion/columna/transicion-energetica-en-colombia-XA6103176> (accessed Feb. 24, 2022).
- [15] M. de Roure, “Cogeração de Energia na Indústria Sucroalcooleira - Instrumentação e Controle.” <https://instrumentacaoecontrole.com.br/cogeracao-de-energia-na-industria-sucroalcooleira/> (accessed Feb. 23, 2022).
- [16] N. Aguilar-Rivera, “Efecto del almacenamiento de bagazo de caña en las propiedades físicas de celulosa grado papel,” *Ingeniería, investigación y tecnología*, vol. 12, no. 2. pp. 189–197, 2011, doi: 10.22201/fi.25940732e.2011.12n2.019.
- [17] Ingenio Risaralda, “Elaboración.” <https://www.ingeniorisaralda.com/es/elaboracion-PG63> (accessed Feb. 19, 2022).
- [18] Seita, “Proceso de Caña de Azúcar.” <https://www.seita.com.co/aplicaciones/industria-azucarera/proceso-de-cana-de-azucar/> (accessed Mar. 02, 2022).
- [19] la enciclopedia libre Wikipedia, “Imbibición.” <https://es.wikipedia.org/wiki/Imbibición> (accessed Mar. 03, 2022).
- [20] I. Carmelita, “Mapa de Procesos.” <https://ingeniocarmelita.com/wp-content/uploads/2019/02/MapaProcesos-1.png> (accessed May 09, 2022).
- [21] Yara Argentina S.A, “Influir en los niveles de Brix y Pol en caña de azúcar,” *Knowledge Grows*. <https://www.yara.com.ar/nutricion-vegetal/cana-de-azucar/influir-en-los-niveles-de-brix-y-pol-en-cana-de-azucar/> (accessed Mar. 09, 2022).
- [22] Y. Colombia, “Influir en pureza claridad del jugo de caña de azúcar.” <https://www.yara.com.co/nutricion-vegetal/cana-de-azucar/influir-en-pureza-claridad-del-jugo-de-cana-de-azucar/> (accessed Mar. 09, 2022).
- [23] P. Rein, *Cane Sugar Engineering*. Bartens, 2007.
- [24] R. K. Shah and D. P. Sekuli, *Fundamentals of Heat Exchangers Design*. 2003.

- [25] E. Edreis and A. Petrov, “Types of heat exchangers in industry, their advantages and disadvantages, and the study of their parameters.” 2020, doi: 10.1088/1757-899X/963/1/012027.
- [26] T. de A. F. Rocha and A. M. da Silva, “Thermal Evaluation of Shell and Tube Heat Exchangers in the Sugar Industry: Case Study,” *Sugar Tech*, vol. 24, no. 2, pp. 585–592, 2022, doi: 10.1007/s12355-021-01027-w.
- [27] CQMChile, “¿Como funciona SMARTLOOP?” <https://www.cqmchile.cl/como-funciona-smartloop> (accessed May 11, 2022).
- [28] Ekström & Son, “Smart Loop backflushing valve for heat exchangers,” 2012. [Online]. Available: http://smartloop.se/wp-content/uploads/2014/08/es-4-sidfolder_smartloop_webb2.pdf.
- [29] W. Group, “Back Washing Plate Heat Exchangers Shell & Tube Heat Exchanger.” <https://www.watco-group.co/backwashing-plate-heat-exchangers/> (accessed Jun. 26, 2022).
- [30] Watco Group, “Strategies to Achieve Flow Reversal for Back Flushing Heat Exchangers,” 2018. <https://www.watco-group.co/strategies-to-achieve-flow-reversal-for-back-flushing-heat-exchangers/> (accessed Jun. 26, 2022).
- [31] A. Thomas and C. T. Sathian, “Cleaning-In-Place (CIP) System in Dairy Plant-Review,” vol. 8, no. 6, pp. 41–44, 2014.
- [32] Alfa Laval, “How plate heat exchanger work,” 2021. <https://www.alfalaval.sg/products/heat-transfer/plate-heat-exchangers/gasketed-plate-and-frame-heat-exchangers/heat-exchanger/how-plate-heat-exchanger-work/> (accessed May 09, 2022).
- [33] K. Nilpueng, T. Keawkamrop, H. Seon, and S. Wongwises, “Effect of chevron angle and surface roughness on thermal performance of single-phase water flow inside a plate heat exchanger,” *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, vol. 91, no. January, pp. 201–209, 2018, doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2017.12.009.
- [34] C. S. Fernandes, R. P. Dias, J. M. Nóbrega, and J. M. Maia, “Laminar flow in chevron-type plate heat exchangers: CFD analysis of tortuosity, shape factor and friction factor,” *Chem. Eng. Process. Process Intensif.*, vol. 46, no. 9 SPEC. ISS., pp. 825–833, 2007, doi: 10.1016/j.cep.2007.05.011.
- [35] A. Sagastume Gutiérrez, J. J. Cabello Eras, D. Huisingh, C. Vandecasteele, and L. Hens, “The current potential of low-carbon economy and biomass-based electricity in Cuba. The case of sugarcane, energy cane and marabu (*Dichrostachys cinerea*) as biomass sources,” *J. Clean. Prod.*, vol. 172, pp. 2108–2122, 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.11.209.
- [36] K. Hofsetz and M. A. Silva, “Brazilian sugarcane bagasse: Energy and non-energy consumption,” *Biomass and Bioenergy*, vol. 46, pp. 564–573, 2012, doi: 10.1016/j.biombioe.2012.06.038.
- [37] M. R. L. V. Leal, A. S. Walter, and J. E. A. Seabra, “Sugarcane as an energy

- source,” *Biomass Convers. Biorefinery*, vol. 3, no. 1, pp. 17–26, 2013, doi: 10.1007/s13399-012-0055-1.
- [38] E. Birru, C. Erlich, and A. Martin, “Energy performance comparisons and enhancements in the sugar cane industry,” *Biomass Convers. Biorefinery*, vol. 9, no. 2, pp. 267–282, 2019, doi: 10.1007/s13399-018-0349-z.
- [39] S. Chantasiriwan, “Improving energy efficiency of cogeneration system in cane sugar industry by steam dryer,” *Chem. Eng. Trans.*, vol. 87, no. April, pp. 511–516, 2021, doi: 10.3303/CET2187086.
- [40] J. C. Vergara, G. Rojas, and K. Ortegón, “Sugarcane Straw Recovery for Bioenergy Generation: A Case of an Organic Farm in Colombia,” *ACS Omega*, vol. 5, no. 14, pp. 7950–7955, 2020, doi: 10.1021/acsomega.9b04340.
- [41] A. V. Ensinas and S. A. Nebra, “Design of Evaporation Systems and Heaters Networks in Sugar Cane Factories Using a Thermoeconomic Optimization Procedure Design of Evaporation Systems and Heaters Networks in Sugar Cane Factories Using a Thermoeconomic Optimization Procedure *,” no. May 2014, 2007, doi: 10.5541/ijot.193.
- [42] E. A. Pina, R. Palacios-Bereche, M. F. Chavez-Rodriguez, A. V. Ensinas, M. Modesto, and S. A. Nebra, “Reduction of process steam demand and water-usage through heat integration in sugar and ethanol production from sugarcane – Evaluation of different plant configurations,” *Energy*, vol. 138, pp. 1263–1280, 2017, doi: 10.1016/j.energy.2015.06.054.
- [43] R. La Madrid, D. Marcelo, E. M. Orbegoso, and R. Saavedra, “Heat transfer study on open heat exchangers used in jaggery production modules – Computational Fluid Dynamics simulation and field data assessment,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 125, pp. 107–120, 2016, doi: 10.1016/j.enconman.2016.03.005.
- [44] M. Higa, A. J. Freitas, A. C. Bannwart, and R. J. Zemp, “Thermal integration of multiple effect evaporator in sugar plant,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 29, no. 2–3, pp. 515–522, 2009, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2008.03.009.
- [45] S. Chantasiriwan, “Distribution of heating surface areas in sugar juice evaporation process for maximum energy efficiency,” *J. Food Process Eng.*, vol. 42, no. 3, pp. 1–6, 2019, doi: 10.1111/jfpe.12998.
- [46] S. Chantasiriwan, “Increased energy efficiency of a backward-feed multiple-effect evaporator compared with a forward-feed multiple-effect evaporator in the cogeneration system of a sugar factory,” *Processes*, vol. 8, no. 3, 2020, doi: 10.3390/pr8030342.
- [47] T. Chen and Q. Ruan, “Modeling and energy reduction of multiple effect evaporator system with thermal vapor compression,” *Comput. Chem. Eng.*, vol. 92, pp. 204–215, 2016, doi: 10.1016/j.compchemeng.2016.05.011.
- [48] J. Zhang, X. Zhu, M. E. Mondejar, and F. Haglind, “A review of heat transfer enhancement techniques in plate heat exchangers,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol.

- 101, no. December 2017, pp. 305–328, 2019, doi: 10.1016/j.rser.2018.11.017.
- [49] H. Dardour, S. Mazouz, and A. Bellagi, “Numerical Analysis of Plate Heat Exchanger Performance in Co-Current Fluid Flow Configuration,” vol. 3, no. 2, pp. 141–145, 2009, doi: 10.5281/zenodo.1080263.
- [50] D. Zheng, J. Wang, Z. Chen, J. Baleta, and B. Sundén, “Performance analysis of a plate heat exchanger using various nanofluids,” *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 158, p. 119993, 2020, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119993.
- [51] A. E. Kabeel, T. Abou El Maaty, and Y. El Samadony, “The effect of using nanoparticles on corrugated plate heat exchanger performance,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 52, no. 1, pp. 221–229, 2013, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2012.11.027.
- [52] B. Bansal and X. D. Chen, “A Critical Review of Milk Fouling in Heat Exchangers,” vol. 5, pp. 27–33, 2006, doi: 10.1111/j.1541-4337.2006.tb00080.x.
- [53] R. Steinhagen, H. Müller-steinhagen, and K. Maani, “Problems and Costs due to Heat Exchanger Fouling in New Zealand Industries Problems arid Costs due to Heat Exchanger Fouling in New Zealand Industries,” no. August 2015, doi: 10.1080/01457639308939791.
- [54] D. K. Mohanty and P. M. Singru, “Use of C-factor for monitoring of fouling in a shell and tube heat exchanger,” *Energy*, vol. 36, no. 5, pp. 2899–2904, 2011, doi: 10.1016/j.energy.2011.02.032.
- [55] A. Laval, “Alfa Laval TL3.” [Online]. Available: <https://www.goelbra.com/fichastecnicas/alfalaval/TL3.pdf>.
- [56] A. Tamine, *Cleaning-in-Place: Dairy, Food and Beverage Operations*. Blackwell, 2008.
- [57] J. W. Slater, “CFD Analysis Process,” 2017. <https://www.grc.nasa.gov/www/wind/valid/tutorial/process.html> (accessed Jul. 11, 2022).
- [58] G. Mirlisenna, “Método de los elementos finitos: ¿qué es?,” 2021. <https://www.esss.co/es/blog/metodo-de-los-elementos-finitos-que-es/> (accessed Jul. 11, 2022).
- [59] S. Aradag, Y. Genc, and C. Turk, “Comparative gasketed plate heat exchanger performance prediction with computations, experiments, correlations and artificial neural network estimations,” *Eng. Appl. Comput. Fluid Mech.*, vol. 11, no. 1, pp. 467–482, 2017, doi: 10.1080/19942060.2017.1314870.
- [60] E. Ozden and I. Tari, “Shell side CFD analysis of a small shell-and-tube heat exchanger,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 51, no. 5, pp. 1004–1014, 2010, doi: 10.1016/j.enconman.2009.12.003.
- [61] S. W. Hwang, D. H. Kim, J. K. Min, and J. H. Jeong, “CFD analysis of fin tube heat exchanger with a pair of delta winglet vortex generators,” *J. Mech. Sci. Technol.*, vol. 26, no. 9, pp. 2949–2958, 2012, doi: 10.1007/s12206-012-0702-2.

- [62] Simscale, “K-epsilon Turbulence Model | Global Settings | SimScale,” 2021. <https://www.simscale.com/docs/simulation-setup/global-settings/k-epsilon/> (accessed Jul. 11, 2022).
- [63] MatWeb, “ASTM A36 Steel, bar,” *MatWeb*, 2015. <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=d1844977c5c8440cb9a3a967f8909c3a> (accessed Jun. 27, 2022).
- [64] Homecenter, “Rodachina con Freno Plataforma Industrial 4”.” https://www.homecenter.com.co/homecenter-co/product/311170/rodachina-con-freno-plataforma-industrial-4/311170/?kid=bnnext1031763&shop=googleShopping&gclid=CjwKCAjwquWVBhBrEiwAt1Kmwrt7QEZ8p-5kZVMDRue-3V1tEmpiQwdabc--hHWlk_f1SxIWnuUc8xoCG58QAvD_BwE (accessed Jun. 27, 2022).