

Desarrollo de modelos matemáticos de balance de materia y energía en evaporación de múltiple efecto para ser implementados en el prototipo de un simulador para el programa ingeniería de alimentos de la universidad nacional abierta y a distancia

Presentado por:
Jhon Henry Barrios Velásquez

Tesis o trabajo de investigación presentada(o) como requisito para optar al título de:
Ingeniero de Alimentos

Asesor:
Ingeniería Química, Carolina León Virgüez

Línea de Investigación: Ingeniería de Procesos de Alimentos y Biomateriales
Grupo de Investigación: GIEPRONAL

Universidad Nacional Abierta y a Distancia
Bogotá, Colombia
2021

Dedicatoria

Expreso mis sinceros agradecimientos:

A mi esposa y a mi hija, por acompañarme y apoyarme en los momentos que más lo necesitaba, donde por mis turnos el poco tiempo que me quedaba me comprendieron y siempre estaban allí diciéndome animo amor y papá tu eres el mejor

A mis padres por estar pendiente de cualquier cosa que necesitara y la hora que fuera para poder lograr la meta

A la empresa Bioenergy y compañeros que siempre me apoyaron y facilitaron los permisos para poder realizar mis trabajos y practicas

A la Tutora Carolina León Virgüez que siempre estuvo allí en todo momento en el proyecto, creyó en mí y fue una guía para poder finalizar mi ciclo profesional con éxito

Contenido

Título	4
Planteamiento del problema	5
Justificación	7
Objetivos	10
<i>Objetivo General</i>	10
<i>Objetivos Específicos</i>	10
Marco conceptual y teórico	11
<i>Simuladores</i>	11
<i>Uso de simuladores en la enseñanza</i>	11
<i>Uso de simuladores como herramientas de apoyo en la enseñanza de Ingeniería de Alimentos</i>	13
<i>Evaporación</i>	16
<i>Tipos generales de evaporadores</i>	17
<i>Métodos de operación para evaporadores</i>	20
<i>Transferencia de calor en los evaporadores</i>	23
<i>Coefficiente global de transferencia de calor</i>	24
<i>Factores que afectan el proceso de evaporación</i>	24
<i>Capacidad y economía de evaporación</i>	26
<i>Importancia de la evaporación en la industria de alimentos</i>	26
<i>Aspectos importantes en la evaporación</i>	29
Metodología	30
<i>Explicación de sentidos de la evaporación</i>	31
<i>Modelo matemático</i>	31
<i>Nomenclatura y desarrollo de ecuaciones</i>	32
<i>Balance Global</i>	32
<i>Balance de sólidos</i>	33
<i>Balance de energía</i>	36
Resultados	38
Análisis de resultados	45
Conclusiones	48
Recomendaciones	49
Bibliografía	50
Anexos	53

Título

Desarrollo de modelos matemáticos de balance de materia y energía en evaporación de múltiple efecto para ser implementados en el prototipo de un simulador para el programa ingeniería de alimentos de la universidad nacional abierta y a distancia (UNAD).

Planteamiento del problema

De forma constante se evidencia por parte de los estudiantes la carencia en habilidades para resolver cálculos matemáticos, aun cuando estas competencias representan la base de la formación de un ingeniero, esto se refiere realmente al desconocimiento de la aplicación de fundamentos matemáticos en los propósitos de formación. Cuando la enseñanza de la matemática no es para un matemático puro, es más valioso el pensamiento analítico, estructural, cuantitativo, sistemático, que puede ser aplicado al mundo real y generar observaciones de gran valor; reflejado en la simulación que incluya variables matemáticas (Romo, 2014) (Sharhorodska, 2017).

Cursos como balance de materia y energía son la base de la ruta de formación para los fenómenos de transporte y la proyección a partir de operaciones algebraicas que le dan las competencias a un ingeniero de alimentos para calcular capacidades de producción, capacidades de equipos, capacidades de instalación donde se requiere que el estudiante vaya más allá del concepto teórico concibiendo y diseñando en su mente.

Actualmente el estudiante para desarrollar la parte práctica de este curso debe trasladarse hasta el centro de gestión académica, definido como el espacio local articulado a un nodo y dotado con recurso humano e infraestructura física y tecnológica para la gestión académica de su región según la división geográfica de la UNAD, con los correspondientes gastos que esto implica. Los elementos para desarrollar el laboratorio son equipos de precisión costosos y que requieren calibraciones periódicas además del acompañamiento por parte de un profesional calificado que solo se encuentra en los centros de gestión académica.

Se desea mediante este trabajo analizar la operación unitaria evaporación que es un fenómeno físico, el cual consiste en separar parcialmente el disolvente volátil del soluto no volátil presente en una disolución, mediante el diseño de un simulador, se pretende promover el análisis de las diferentes variables que intervienen en una evaporación y sus usos a nivel industrial, en Colombia es ampliamente usada en la industria azucarera, panelera y en jugos

concentrados y algunas hortalizas. La evaporación es una operación que proporciona una estabilidad microbiológica en estos productos y permite reducir los costos de almacenamiento y transporte, además de prolongar su tiempo de vida útil (Díaz & Orozco, 2018).

El objetivo de este trabajo es construir una herramienta que permita al estudiante de ingeniería de alimentos simular una evaporación múltiple y analizar los principales factores que afectan el proceso de evaporación, de esta forma podrá establecer las condiciones ideales de alimentación y podrá comprobar con el algoritmo de cálculo el balance de materia y energía con el fin de analizar el consumo de vapor y la economía del evaporador.

El aprendizaje es una acción continua que nunca se detiene, y puede romper el contexto de la presencialidad y el uso de un aula de clase, la incorporación de tecnologías en el modelo educacional permite ampliar la línea del aprendizaje. El estudiante organiza la información, la analiza, se plantea preguntas y actúa. El aprendizaje mediado por las TICs canaliza algunos procesos de aprendizaje, facilita otros y expande diversas habilidades. De la anterior descripción del problema que es evidente que se requiere una solución desde el área tecnológica, por lo cual se propone la siguiente pregunta de investigación:

¿Cómo representar los principios de conservación de materia y energía involucrados en una evaporación de múltiple como apoyo en el componente práctico del curso balance de materia y energía mediante el diseño y modelado conceptual de un prototipo de un simulador?

Justificación

Actualmente, en el país cerca de 500 instituciones de educación superior cuentan con aval del Ministerio de Educación Nacional para la oferta de programas bajo la modalidad a distancia y con metodología virtual (MEN, 2017), dichas instituciones garantizan la formación del profesional idóneo y deseado de acuerdo a su respectivo proyecto educativo, de tal forma que se cumplan los objetivos de formación, definidos por la Ley 30 de 1992 de educación superior, en su artículo 6º, (Toro & Vitale, 2013). La educación en modalidad a distancia y con metodología virtual es inclusiva, de calidad, y se encuentra a la altura de las instituciones universitarias presenciales en las tipologías de cursos teóricos y prácticos. El campo de formación se detalla según la clasificación internacional normalizada de la educación “Campos de Educación y Formación Adaptada para Colombia (CINE-F 2013 A.C.),(DANE, 2018), la formación de procesos de alimentos se imparte actualmente por diez y ocho universidades que ofertan el programa de ingeniería de alimentos de manera presencial, siendo la Universidad Nacional Abierta y a Distancia de aquí en adelante UNAD, la única institución que oferta el programa de ingeniera de alimentos en modalidad a distancia y con metodología virtual y cubrimiento nacional (ACOFI, 2019) .

La UNAD ha diseñado un currículo basado en su Modelo Pedagógico con un microcurrículo para cada curso, plasmado en un propósito de formación, utilizando estrategias de aprendizaje y el desarrollo de componente práctico en diferentes escenarios, entre ellos, escenarios con apoyo tecnológico, que integran aplicativos y ejercicios de simulación para poder acceder a niveles de aprendizajes más profundos y prácticos (UNESCO, 2004). Como actores de la formación virtual y líderes en el área de la educación, el Modelo Pedagógico Unadista enfrenta diferente situaciones relacionadas con una cobertura nacional en los diferentes departamentos del país y en cada uno de los sesenta y cuatro centros donde hace presencia la UNAD, la aparición de matrícula en centros donde históricamente no registraba estudiantes en el programa de alimentos, por ejemplo, en Unidades de Desarrollo Regional- UDR como Sahagún, Leticia, Yopal, El Banco, Aguachica, el Plato, la Guajira Curumani, San Vicente del Caguán, Puerto Asís, Vélez Cubar

y Tumaco, en donde la población estudiantil oscila entre uno y ocho estudiantes. Se requiere cubrir las actividades prácticas para los veintidós cursos del plan de estudios del programa de ingeniería de alimentos, con un alto porcentaje de componente práctico, teniendo en cuenta que no se cuenta con infraestructura y que la población estudiantil es baja e insuficiente, de tal forma que no es posible justificar la adecuación de infraestructura física. Es por esto que se hace imperativo desarrollar alternativas que brinden la posibilidad de realización de las actividades prácticas de manera oportuna, eficiente, y con la debida accesibilidad y adecuación a las prácticas planteadas en las guías acordes con el MPU.

Cursos como balance de materia y energía son la base de la ruta de formación para los fenómenos de transporte, y fundamentan las competencias del ingeniero de alimentos para evaluar. Diseñar y controlar procesos de alimentos, donde se requiere que el estudiante vaya más allá del concepto teórico concibiendo y diseñando en su mente.

Actualmente el estudiante debe trasladarse hasta el centro de gestión académica para desarrollar la parte práctica de este curso, invirtiendo tiempo en cada recorrido, con los correspondientes gastos que esto implica. Los elementos para desarrollar el laboratorio son equipos de precisión costosos y que requieren calibraciones periódicas, además del acompañamiento por parte de un profesional calificado que solo se encuentra en los centros de gestión académica.

En el mercado existen algunos programas de uso libre o con licencia que están desarrollados con algunas limitaciones o con especificidades para el área química como ASPEN, SuperPro Designer, adicionalmente requieren licenciamiento y no dan solución real a la necesidad.

Debido a esto se propone el desarrollo en diferentes fases del diseño conceptual de software para simular operaciones y procesos en los diferentes cursos, de tal forma que sea administrado por la universidad con la robustez y flexibilidad necesarias, y que permita su actualización según el avance de la ruta de formación trazada en los cursos, desarrollando

habilidades de programación en un lenguaje simple que lleve al estudiante a la simulación; atendiendo de esta forma el principio de la e-mediación y las necesidades del sector productivo, que ha incursionado en la cuarta revolución industrial generando en la calificación de los ingenieros de alimentos una reestructuración educativa integral, moderna, flexible, con miras al futuro e inspirada en el cambio y la innovación. Se requieren ingenieros con competencias en el uso y análisis de simuladores, con capacidad de responder a estas tendencias tecnológicas bajo el concepto de educación 4.0.

El presente trabajo de grado se enmarca dentro de un proyecto más amplio, consiste en una primera fase de desarrollos tecnológicos tendientes a la generación de herramientas virtuales que sirvan de apoyo en la formación de Ingeniera de alimentos en la UNAD como base para el diseño de otros módulos relacionados con las operaciones unitarias, diseño de equipos e ingeniería de planta.

Objetivos

Objetivo General

Desarrollar modelos matemáticos de Balance de materia y energía en evaporación de múltiple efecto para ser implementados en el prototipo de un simulador para el programa Ingeniería de alimentos de la Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD)

Objetivos Específicos

Recopilar la información para el análisis y estudio documental que permita la definición de las matrices alimentarias más relevantes y los procesos de transformación convenientes para ser simulados.

Definir las variables de entrada, salida y especificaciones de los equipos de evaporación de efecto múltiple para ser simuladas.

Recolectar información relacionada en bases de datos para correlaciones de propiedades fisicoquímicas y térmicas de las matrices alimentarias, y características de materiales de los equipos definidos en el paso anterior.

Desarrollar los algoritmos matemáticos para la resolución de los balances de materia y energía de la evaporación múltiple con base en la información recolectada respecto a los modelos matemáticos.

Marco conceptual y teórico

A continuación, se presentan los principales aspectos conceptuales y teóricos que fundamentan la presente propuesta

Simuladores

En esencia, un simulador se define como aquella herramienta que permite representar los principios fundamentales que rigen el comportamiento de determinadas variables, el usuario propone unos valores de entrada al simulador y obtiene unos resultados de salida que le permiten estimar la conducta de un sistema. Los simuladores están constituidos por una serie de algoritmos informáticos que modelan fenómenos reales, ya sea a nivel cuantitativo o cualitativo (Grodzki et al., 2018). Los modelos que integran el simulador realizan la predicción de ciertas variables a partir de información que se encuentra alojada en bases de datos.

Uso de simuladores en la enseñanza

De acuerdo con (Cataldi et al., 2013) hoy en día los docentes pueden configurar nuevos escenarios educativos, con el uso de las Tecnologías de la información (TICs), contribuyendo al cambio necesario de los espacios tradicionales, integrando nuevos elementos de hardware y software, que se utilizan con el fin de construir estrategias de transmisión de la información.

El uso de simuladores en la academia, representa diversas ventajas para las instituciones, se evidencia un ahorro en los costos de materiales y reactivos, los estudiantes pueden acceder de forma simultánea desde sus equipos de cómputo, las prácticas simuladas son flexibles permitiendo la manipulación y análisis del comportamiento de diferentes materiales (Potkonjak et al., 2016), y no menos importante, aunque requieren actualizaciones, su tiempo de vida es adecuado siempre y cuando se realice el mantenimiento necesario.

Según estudios desarrollados por algunos docentes de ingeniería (Macías et al., 2015), (Trujillo-Cayado & Carrillo, 2015), (Paola et al., 2012), (Rasteiro et al., 2009), (Grodzki et al., 2018), (Potkonjak et al., 2016) los ejercicios de simulación que se integran en algunos cursos de los programas de ingeniería, facilitan la comprensión de los fundamentos básicos por parte de los estudiantes, adicionalmente, promueven la capacidad de predecir y analizar resultados experimentales, y generan mayor interés y motivación en los cursos (Barber et al., 2013). La simulación en los cursos de Ingeniería química fue analizada por (Savelski et al., 2001) concluyendo que los simuladores constituyen una herramienta efectiva en la enseñanza del diseño de procesos, pero no es usada significativamente durante todo del plan de estudios, por ello recomiendan la implementación de módulos a través de todos los cursos.

La colaboración de las Universidades de Combría y Porto han generado el simulador LABVIRTUAL para la enseñanza de programas de ingeniería química, el simulador recibe y valida la entrada de datos, ejecuta y administra los cálculos y servicios web necesarios, a partir de rutinas numéricas desarrolladas en varios lenguajes de programación (Matlab, FORTRAN, Octave o JAVA) que describen los modelos matemáticos de procesos químicos (Granjo & Rasteiro, 2020). Al evaluar el impacto del uso de la herramienta sobre la autonomía de los estudiantes, los investigadores encontraron que el uso de estas plataformas mejora su autonomía de estudio, así como la capacidad para abordar con pensamiento crítico nuevos problemas.

La integración de simuladores como apoyo tecnológico en cursos de los programas de Ingeniería química e Ingeniería de alimentos, ha sido desarrollada y evaluada por algunos docentes (Trujillo-Cayado & Carrillo, 2015) usando un simulador comercial en la enseñanza de Transferencia de calor, los autores encuentran que la herramienta promueve en los estudiantes la comprensión de los conceptos teóricos de la práctica experimental, y por otro lado, se presenta como una herramienta útil para su futuro desarrollo profesional. La integración de un laboratorio virtual de química en la enseñanza de la ciencia para programas

de Ingeniería química demostró que el aprendizaje experiencial afecta la motivación del aprendizaje y el logro académico (Su & Cheng, 2019).

En una revisión sobre el estado del arte del uso de simuladores en la enseñanza de ingeniería, se resalta como requerimientos esenciales, el uso de variables y ecuaciones que permitan una representación fiel de los fenómenos a simular, una interfaz amigable que permita que los estudiante visualicen de forma clara las variables de entrada y salida y la representación gráfica de lo que ocurre al interior de la operación y de ser posible, un entorno 3D que mejore la comunicación ((Potkonjak et al., 2016)

Uso de simuladores como herramientas de apoyo en la enseñanza de Ingeniería de Alimentos

En el área de la ingeniería de alimentos, uno de los intereses principales es la simulación de las operaciones unitarias que intervienen a lo largo de un proceso de transformación; cada una de estas operaciones puede simularse de manera aislada como un módulo individual, o de forma integral, en donde se deberá contemplar la interacción entre operaciones (Trujillo-Cayado & Carrillo, 2015). Para este último caso, se requiere la construcción de una base de propiedades fisicoquímicas y termodinámicas robusta, que alimente la ejecución de modelos matemáticos robustos, de esta forma, los resultados generados en la simulación describirán con mayor precisión el comportamiento de los fenómenos reales que se intentan representar.

Los laboratorios virtuales constituidos por simuladores de operaciones unitarias proporcionan un entorno de aprendizaje dinámico, que tiene como protagonista al estudiante, permitiéndole interactuar con un modelo del proceso industrial explorando diversas situaciones, que de otra forma, no se podrían conocer, dados los altos costos que significarían en caso de llevarse a cabo de forma presencial (Trujillo-Cayado & Carrillo, 2015). Aunque los simuladores constituyen una excelente herramienta de apoyo, no debe desconocerse la importancia de la realización de prácticas presenciales e las que el estudiante corrobore y complemente el desarrollo de sus competencias.

El surgimiento de la cuarta revolución industrial ha puesto sobre la mesa diferentes retos a todas las industrias que temen quedar rezagadas, pero también ha presentado un reto en la formación de Ingenieros que respondan a estas tendencias tecnológicas, es por esta razón que (Joshua Grodotzki*, Tobias R. Ortelt, A. Erman Tekkaya) plantean el concepto de educación 4.0, como aquel horizonte que debe replantearse por parte de las universidades, específicamente en los programas de ingeniería. Se requieren ingenieros con competencias en el uso y análisis de simuladores, profesionales que estén en capacidad de manejar otras formas de tecnología y de comprender procesos a partir de información que llega a través de nuevas herramientas. Es así que el uso de simuladores en los procesos de enseñanza de la ingeniería no solo representa un aporte en la construcción de aprendizaje significativo, sino que, a largo plazo, permiten que el estudiante reconozca y comprenda el uso de plataformas informativas que le permitan tomar mejores decisiones, desarrollando habilidades de análisis e interpretación de datos.

Balances de materia y energía.

En la industria alimentaria, el balance de materia y energía constituye una herramienta matemática indispensable a la hora de diseñar, controlar, optimizar y evaluar procesos de transformación de alimentos (Franco, 2006). El balance de materia permite cuantificar cada una de las corrientes que intervienen en una operación o proceso, tanto en su ingreso como en su egreso, de tal forma que se garantice el principio máximo de conservación de la materia. El balance de masa es aplicable tanto a un proceso como a cada una de las operaciones unitarias. Resolver balances de materia requiere por parte del ingeniero la habilidad de formular y solucionar sistemas de ecuaciones algebraicas (Francisco & Carranza, 2008). Por su parte, los balances de energía, estrechamente ligados a los de materia, permiten cuantificar los requerimientos energéticos de una operación, o las pérdidas que se generan durante esta, en la formulación de los balances de energía es imprescindible seguir la Ley de conservación de la energía (Trystram, 2012), las ecuaciones que definen este tipo de balances, no son tan numerosas como las que podrían definir un balance de materia, pero resultan un

complemento ideal para la resolución de los sistemas ya que proporcionan información adicional sobre el sistema.

En el programa de Ingeniería de Alimentos de la Universidad Nacional Abierta y a Distancia, el curso de Balance de Materia y Energía, se oferta en el tercer periodo académico, los estudiantes deben tener conocimientos previos en Álgebra y Química general, el curso representa el ingreso a la Red curricular de fenómenos de transporte y promueve las competencias requeridas para afrontar los cursos posteriores de operaciones unitarias y procesos.

Simuladores de balance de materia y energía

La simulación de procesos puede aplicarse inicialmente en estado estacionario, a partir de balances de materia y energía de procesos en equilibrio. Sin embargo, cuando se tiene en cuenta acumulación de materia o energía a lo largo del tiempo, es necesario considerar el uso de simulaciones dinámicas que permitan una descripción más cercana a la realidad al considerar el tiempo como una variable como determinante en la predicción de procesos reales (Pink & Razul, 2014). Las simulaciones en estado transitorio resultan más complejas en relación con el modelamiento matemático, se requiere un sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias y una técnica de resolución que permita la evaluación explícita de las variables y su cambio en el tiempo. Entre los métodos de resolución más comunes se encuentra el método de Euler y el de Runge Kutta (Unemi, 2018). La construcción de los algoritmos que permiten solucionar el sistema de ecuaciones asociadas a los balances de materia y energía, debe partir de variables de entrada preferiblemente expresadas como funciones continuas, estas variables estarán alojadas en la base de datos y serán definidas con base en la revisión exhaustiva de la literatura (Francisco & Carranza, 2008). Como parámetros de entrada, se puede manejar temperatura, presión, flujos volumétricos, flujos másicos, composiciones de los componentes que intervienen en el proceso, entre otros; sin embargo, esto se define en la primera fase del proyecto cuando se determinen las variables a manipular por parte del usuario.

Actualmente existen simuladores comerciales que permiten trabajar balances de materia y energía, algunos de acceso libre y otros por licenciamiento, es el caso de Aspen Plus, Aspen Hysys, ProSimPlus, Pro/II y COCO (Madoumier et al., 2015); sin embargo, cuando se usan estos simuladores en el análisis de procesos de la industria alimentaria, se encuentran algunos obstáculos, en primer lugar, las herramientas no poseen modelos de procesos clásicos de transformación de alimentos, adicionalmente, carecen de una base de datos de propiedades fisicoquímicas y termodinámicas de productos alimenticios. Al respecto, Trystram, G. (2012) encuentra que la falta de parámetros apropiados para los modelos representa un reto para la simulación de procesos alimentarios, por su parte (Datta, 2008) menciona la necesidad de desarrollar modelos que integren los fenómenos físicos con el comportamiento de las matrices alimentarias, logrando una representación significativa de varios procesos industriales.

Este proyecto se enmarca dentro del proyecto de investigación Diseño conceptual de un prototipo de software simulador para el curso Balance de materia y energía como apoyo a la gestión del componente práctico en el programa Ingeniería de alimentos de la Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD) avalado en la Convocatoria interna 009.

Evaporación

La evaporación consiste en la adición de calor a una solución para evaporar el disolvente que, por lo general es agua. Usualmente, el calor es suministrado por condensación de un vapor (como vapor de agua) en contacto con una superficie metálica, con el líquido del otro lado de dicha superficie. El tipo de equipo usado depende tanto de la configuración de la superficie para la transferencia de calor como de los medios utilizados para lograr la agitación o circulación del líquido. A continuación, se analizan los tipos generales de equipos (Geankoplis, 2006)

Tipos generales de evaporadores

El tipo de equipo a usar para una operación de evaporación depende principalmente de las características del alimento, del flujo de material a evaporar y de la capacidad requerida en el equipo, en los siguientes párrafos se describen los principales evaporadores de uso industrial.

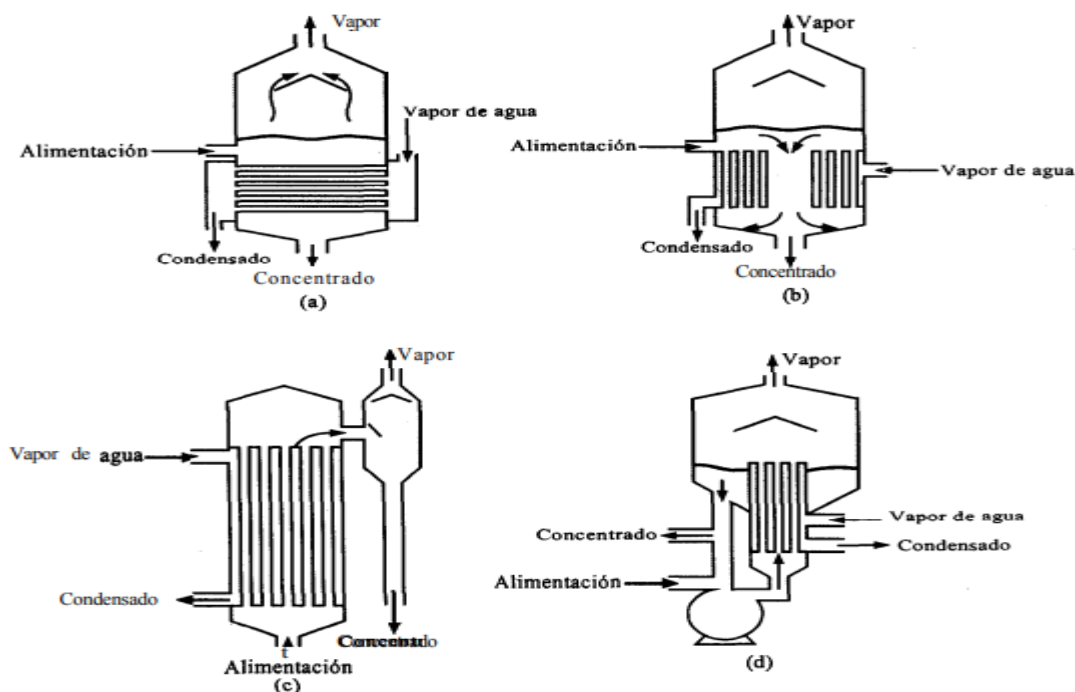
Marmita abierta o artesa. La forma más simple de un evaporador es una marmita abierta o artesa en la cual se hierve el líquido. El suministro de calor proviene de la condensación de vapor de agua en una chaqueta o en serpentines sumergidos en el líquido. En algunos casos, la marmita se calienta a fuego directo. Estos evaporadores son económicos y de operación simple, pero el desperdicio de calor es excesivo. En ciertos equipos se usan paletas o raspadores para agitar el líquido.

Evaporador de tubos horizontales con circulación natural. En la figura 1a se muestra un evaporador de tubos horizontales con circulación natural. El banco horizontal de tubos de calentamiento es similar al banco de tubos de un intercambiador de calor. El vapor de agua entra a los tubos y se condensa; el condensado sale por el otro extremo de los tubos. La solución a ebullición está por fuera de ellos. El vapor se desprende de la superficie líquida; después, casi siempre se hace pasar por dispositivos de tipo deflector para impedir el arrastre de gotas de líquido y sale por la parte superior. Este equipo, relativamente económico, puede utilizarse para líquidos no viscosos con altos coeficientes de transferencia de calor y para líquidos que no formen incrustaciones. Puesto que la circulación del líquido no es muy buena, son poco adecuados para materiales viscosos. En casi todos los casos, tanto este evaporador como los que se estudian después operan con régimen continuo, con alimentación a velocidad constante y salida de concentrado a velocidad constante

Evaporador vertical con circulación natural. En este tipo de evaporador se usan tubos verticales en lugar de horizontales y el líquido está dentro de los tubos, por lo que el vapor se condensa en el exterior. Debido a la ebullición y a la disminución de densidad, el

líquido se eleva en los tubos por circulación natural, tal como se muestra en la figura 1b, y fluye hacia abajo a través de un espacio central abierto grande, o bajada. Esta circulación natural incrementa el coeficiente de transferencia de calor. No es útil con líquidos viscosos. Este equipo se llama con frecuencia evaporador de tubos cortos. Una variación de este modelo es el evaporador de canasta, que usa tubos verticales, pero el elemento de calentamiento se cuelga en el cuerpo, de tal manera que haya un espacio anular que sirva de bajada. El modelo de canasta difiere del evaporador vertical de circulación natural, pues éste tiene un espacio central en vez del anular como bajada. Este tipo se usa con frecuencia en las industrias del azúcar, la sal y la sosa cáustica.

Figura 1. Diferentes tipos de evaporadores: a) de tubos horizontales, b) de tubos verticales, c) de tubos largos verticales, d) de circulación forzada



Fuente: Adaptado de Geankoplis, 2006.

Evaporador vertical de tubos largos. Puesto que el coeficiente de transferencia de calor del lado del vapor es muy alto en comparación con el del lado del líquido que se

evapora, es conveniente contar con velocidades altas para el líquido. En un evaporador de tipo vertical con tubos largos como el de la figura 1c, el líquido está en el interior de los tubos. Estos miden de 3 a 10 m de alto, lo que ayuda a obtener velocidades de líquido muy altas. Por lo general, el líquido pasa por los tubos una sola vez y no se recircula. Los tiempos de contacto suelen ser bastante breves en este modelo. En algunos casos, como cuando la relación entre la velocidad de alimentación y la velocidad de evaporación es baja, puede emplearse recirculación natural del producto a través del evaporador, añadiendo una conexión de tubería entre la salida del concentrado y la línea de alimentación. Éste es un método muy común en la producción de leche condensada.

Evaporador de caída de película. Una variación del modelo de tubos largos es el evaporador de caída de película, en el cual el líquido se alimenta por la parte superior de los tubos y fluye por Evaporación en sus paredes en forma de película delgada. Por lo general, la separación de vapor y líquido se efectúa en el fondo. Este modelo se usa mucho para la concentración de materiales sensibles al calor, como jugo de naranja y otros zumos de frutas, debido a que el tiempo de retención es bastante bajo (entre 5 y 10 s) y el coeficiente de transferencia de calor es alto.

Evaporador de circulación forzada. El coeficiente de transferencia de calor de la película líquida puede aumentarse por bombeo provocando una circulación forzada del líquido en el interior de los tubos. Para esto se emplea el modelo de tubos verticales largos de la figura 1c~ añadiendo una tubería conectada a una bomba entre las líneas de salida del concentrado y la de alimentación. Sin embargo, los tubos de un evaporador de circulación forzada suelen ser más cortos que los tubos largos, tal como se ilustra en la figura 1d. Además, en otros casos se usa un intercambiador de calor horizontal externo e independiente. Este modelo es muy útil para líquidos viscosos.

Evaporador de película agitada. La principal resistencia a la transferencia de calor en un evaporador corresponde al líquido. Por tanto, un método para aumentar la turbulencia de la película líquida y el coeficiente de transferencia de calor, consiste en la agitación

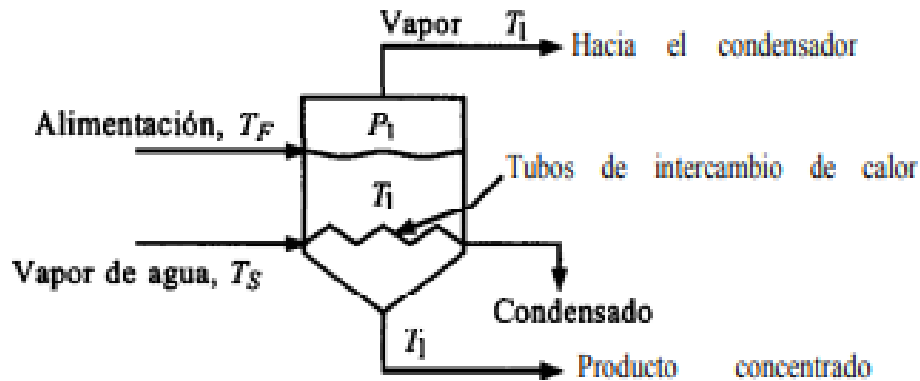
mecánica de dicha película. Esto se lleva a cabo en un evaporador de caída de película modificado, usando un solo tubo grande enchaquetado que contiene un agitador interno. El líquido penetra por la parte superior del tubo y a medida que fluye hacia abajo se dispersa en forma de película turbulenta por la acción de aspas de agitación vertical. La solución concentrada sale por el fondo y el vapor pasa por un separador para salir por la parte superior. Este tipo de evaporador es práctico para materiales muy viscosos, pues el coeficiente de transferencia de calor es mayor que en los modelos de circulación forzada. Se usa para materiales viscosos sensibles al calor como látex de caucho, gelatina, antibióticos y jugos de frutas. Sin embargo, tiene costo alto y capacidad baja.

Evaporador solar de artesa abierta. Un proceso muy antiguo pero que todavía se usa es la evaporación solar en artesas abiertas. El agua salina se introduce en artesas o bateas abiertas y de poca profundidad y se deja evaporar lentamente al sol hasta que cristalice.

Métodos de operación para evaporadores

Evaporadores de efecto simple. En la figura 2 se muestra un diagrama simplificado del evaporador de una sola etapa o de efecto simple. La alimentación entra a una temperatura T_F y en la sección de intercambio de calor entra vapor saturado a una temperatura T_s . El vapor condensado sale en forma de pequeños chorros. Puesto que se supone que la solución del evaporador está completamente mezclada, el producto concentrado y la solución del evaporador tienen la misma composición y temperatura T_1 , que corresponde al punto de ebullición de la solución. La temperatura del vapor también es T_1 , pues está en equilibrio con la solución en ebullición. La presión es P_t , que es la presión de vapor de la solución a T_1 . Si se supone que la solución que se va a evaporar es bastante diluida y parecida al agua, 1 kg de vapor de agua producirá aproximadamente 1 kg de vapor al condensarse. Esto ocurrirá siempre que la alimentación tenga una temperatura T_F cercana al punto de ebullición. En el cálculo de la velocidad de transferencia de calor en un evaporador se emplea el concepto de un coeficiente total de transferencia de calor. Se establece entonces la siguiente: ecuación $Q = UA \Delta T = U A (T_s - T_F)$

Figura 2. Diagrama simplificado de un evaporador de efecto simple



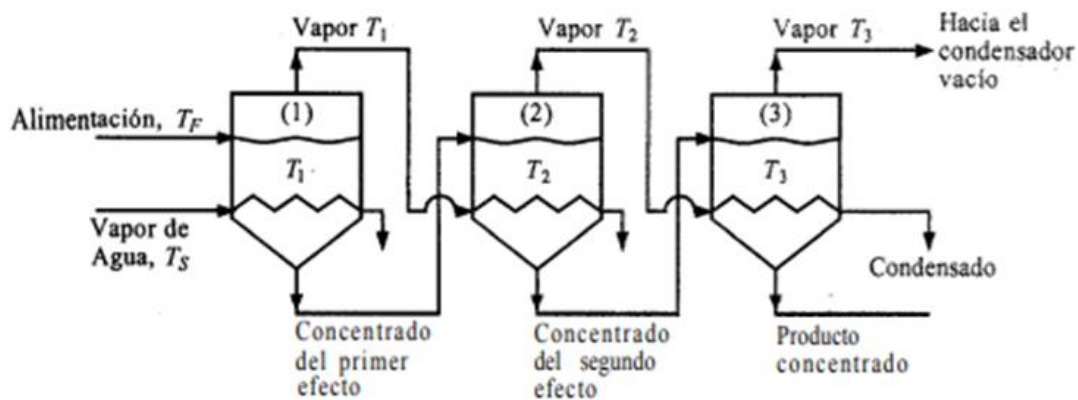
Fuente: Adaptado de Geankoplis, 2006.

Donde q es la velocidad de transferencia de calor en W (BTU/h), U es el coeficiente total de transferencia de calor en $W/m^2 \cdot K$ (BTU/h $pie^2 \cdot ^\circ F$), A es el área de transferencia de calor en m^2 (pie^2), T_s es la temperatura del vapor que se condensa en K ($^\circ F$) y T_I es el punto de ebullición del líquido en K ($^\circ F$). Los evaporadores de efecto simple se usan con frecuencia cuando la capacidad necesaria de operación es relativamente pequeña o el costo del vapor es relativamente barato comparado con el costo del evaporador. Sin embargo, la operación de gran capacidad, al usar más de un efecto, reducirá de manera significativa los costos del vapor.

Evaporadores de efecto múltiple con alimentación hacia adelante. Un evaporador de efecto simple como el que se muestra en la figura 2. Desperdicia bastante energía, pues el calor latente del vapor que sale no se utiliza. No obstante, una buena parte de este calor latente se recupera y se utiliza al emplear evaporadores de efecto múltiple. En la figura 3 se muestra el diagrama simplificado de un evaporador de efecto triple con alimentación hacia adelante. Si la alimentación del primer efecto está a una temperatura cercana al punto de ebullición y a la presión de operación de dicho efecto, 1 kg de vapor de agua evaporará casi 1 kg de agua.

El primer efecto opera a una temperatura suficientemente alta como para que el agua que se evapora sirva como medio de calentamiento del segundo efecto. Nuevamente, en el segundo efecto se evapora casi 1 kg de agua, que se emplea como medio de calentamiento del tercer efecto. De manera aproximada, en un evaporador de efecto triple se evaporan 3 kg de agua por kilogramo de vapor de agua usado. Por consiguiente, el resultado es un aumento de la economía de vapor de agua, que es kg de vapor evaporado/kg de vapor de agua usado. Esto también resulta cierto de forma aproximada para más de tres efectos. Sin embargo, este aumento de la economía del vapor de agua en un evaporador de efecto múltiple se logra a expensas de mayor inversión en el equipo. En la operación de alimentación hacia adelante que se muestra en la figura 3, la alimentación se introduce en el primer efecto y fluye hacia el siguiente en el mismo sentido del flujo del vapor. Éste es el método de operación que se emplea cuando la alimentación está caliente o cuando el producto concentrado final puede deteriorarse a temperaturas elevadas. Las temperaturas de ebullición van disminuyendo de efecto a efecto. Esto significa que si el primer efecto está a $P = 1$ atm abs de presión, el último estará al vacío, a presión P_3 .

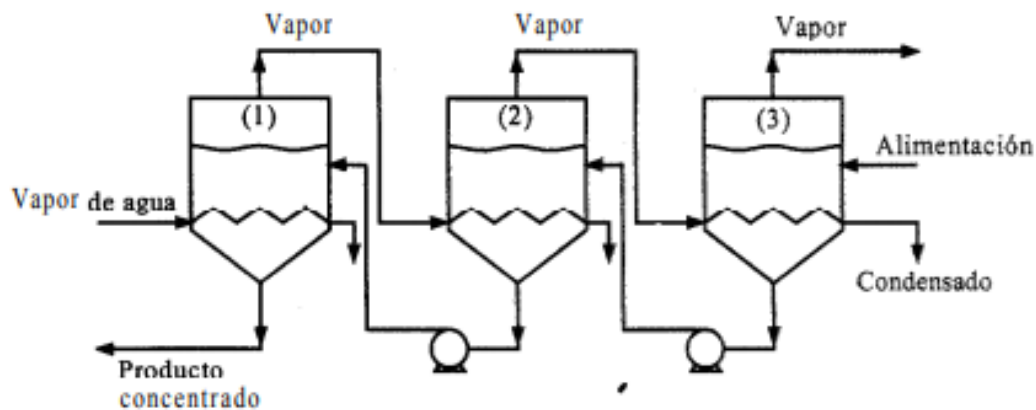
Figura 3. Diagrama simplificado de un triple evaporador de triple efecto con alimentación hacia adelante



Fuente: Adaptado de Geankoplis, 2006.

Evaporadores de efecto múltiple con alimentación en retroceso. En la operación de alimentación en contracorriente que se muestra para el evaporador de efecto triple de la figura 4, la alimentación entra al último efecto, que es el más frío, y continua hacia atrás hasta que el producto concentrado sale por el primer efecto. Este método de alimentación en contracorriente tiene ventajas cuando la alimentación es fría, pues la cantidad de líquido que debe calentarse a temperaturas más altas en el segundo y primer efecto es más pequeña. Sin embargo, es necesario usar una bomba más potente en cada efecto, pues el flujo va de baja a alta presión. Este método también es muy útil cuando el producto concentrado es bastante viscoso. Las altas temperaturas de los primeros efectos reducen la viscosidad y permiten coeficientes de transferencia de calor de valor razonable.

Figura 4. Diagrama simplificado de un evaporador de efecto triple con alimentación en retroceso



Fuente: Adaptado de Geankoplis, 2006.

Transferencia de calor en los evaporadores

Según (Rodríguez, 2017) la transferencia de calor es el fenómeno más importante al momento de diseñar estos equipos, esto se debe a que la superficie de calentamiento representa el mayor costo de un evaporador, su costo va en función del área, los materiales

de construcción y el tipo de evaporador, resaltando que la velocidad de transmisión de calor está dada por tres factores: área de superficie de transmisión de calor, coeficiente global de transferencia y el gradiente de temperatura

Coeficiente global de transferencia de calor

El coeficiente global de transferencia de calor (U) en un evaporador, se determina en función de los coeficientes de película de ebullición y condensación respectivamente. La experiencia ha demostrado que el coeficiente global depende de las propiedades de la disolución, del medio de calentamiento, de la geometría de la superficie y del tipo de evaporador. Estos coeficientes pueden encontrar en la literatura especializada según el tipo de fluido. (McCabe et al., 2007)

Tabla 1. Coeficientes globales típicos de evaporadores.

<i>Tipo de evaporador</i>	<i>Coeficiente global U ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)</i>
Tubo vertical corto, circulación natural	1100 - 2800
Tubo horizontal, circulación natural	1100 - 2800
Tubo vertical largo, circulación natural	1100 - 400
Tubo vertical largo, circulación forzada	2300 - 11000
Película con agitación	680 - 2300

Fuente: Adaptado de Geankoplis, 2006.

Factores que afectan el proceso de evaporación

Según (Díaz & Orozco, 2018) existen varios factores que afectan el proceso de evaporación, primordialmente aquellos en los cuales se involucran propiedades fisicoquímicas de la disolución a concentrar y las condiciones operacionales del proceso. Entre los más importantes se pueden mencionar las siguientes:

Formación de espuma. Ciertos materiales pueden formar espuma durante la evaporación y esto podría causar una disminución de la velocidad de transferencia de calor, adicionalmente, el vapor que sale del evaporador podría arrastrar parte del líquido, esto se soluciona con métodos mecánicos o con una simple disminución del líquido de entrada, así como la utilización de antiespumantes.

Sensibilidad térmica de los materiales. La mayor parte de alimentos en particular los jugos y pulpas de frutas vegetales tienden a deteriorarse cuando se someten a altas temperaturas durante cortos periodos de tiempo, por lo tanto para concentrar estos alimentos es necesario reducir la temperatura del líquido como el tiempo de calentamiento, por esta razón se hace indispensable conocer el comportamiento de estos tipo de sustancias frente a la temperatura pues con estos datos se puede fijar la temperatura máxima de operación del evaporador.

Solubilidad. Las sustancias sólidas, poseen una solubilidad máxima en agua, este es un factor que se debe tener en consideración para la disolución que se evapora, hay una región de saturación, si se sobrepasa esta zona, se llega a la región de sobresaturación donde se da la precipitación o cristalización. Por lo que se debe evaluar la factibilidad de alcanzar una determinada concentración, de lo contrario puede ocurrir una cristalización dentro del evaporador, lo cual afecta su funcionamiento y las características organolépticas del producto, la formación de cristales provoca obstrucciones e incrustaciones sobre la superficie de transferencia de calor.

Concentración de la disolución. Cuando la disolución se concentra, las propiedades de esta cambian drásticamente. La densidad y la viscosidad pueden incrementarse con el aumento del contenido de sólidos disueltos, lo que impide una adecuada transferencia de calor entre el agente de calentamiento y la disolución.

Materiales de construcción. Al momento de seleccionar los materiales adecuados de un evaporador es un aspecto muy importante evitar problemas de corrosión y contaminación del producto. El costo de la mayoría de los materiales, como el cobre, níquel

y acero inoxidable es elevado, por ello resulta deseable obtener altas velocidades de transferencia de calor, con el fin de minimizar los costos del equipo.

Capacidad y economía de evaporación

La capacidad de un evaporador es el número de kilogramos de agua que puede evaporar por unidad de tiempo, la economía es el número de kilogramos de agua evaporada en todos los efectos por el kilogramo de vapor primario utilizado. En un evaporador de efectos múltiples, la capacidad es la misma que en uno de efecto simple que tenga el mismo coeficiente global de transferencia de calor, la misma superficie de calefacción y que opere con una diferencia de temperatura igual a la diferencia total de temperatura con la que opera el sistema de múltiple efecto. Por tanto, la capacidad por metro cuadrado de superficie en un evaporador de N efectos es aproximadamente igual a $1/N$ veces la capacidad del evaporador de efecto simple. Como la entalpía de vaporización es prácticamente constante en el rango de presiones utilizado, existe una proporcionalidad entre la cantidad de líquido evaporado y la cantidad de calor transmitido (Díaz & Orozco, 2018)

En la evaporación de múltiple efecto se consigue una excelente economía debido a que la variación en la entalpía de vaporización al pasar de un efecto a otra es pequeña, cuando se logra condensar un kilogramo de vapor de calefacción, se evapora en la disolución hirviente aproximadamente un kilogramo de agua, y así, aumenta la economía N veces. La capacidad de estos sistemas, también se ve reducida por la elevación del punto de ebullición de la disolución, pero no así la economía, ya que ésta depende del balance de energía en cada efecto y no de la velocidad de transmisión del calor (Díaz & Orozco, 2018)

Importancia de la evaporación en la industria de alimentos

En la industria de la panela (denominada azúcar sin centrifugar por la FAO), se estima que los evaporadores de múltiple efecto (EME), permiten un mayor control e incrementan en un 36% la eficiencia global del proceso. No obstante, la implementación de estas tecnologías

requiere que, además del ajuste técnico del proceso, también se mantenga la calidad de la panela obtenida en los sistemas de evaporación abierta. Esto ha generado un objeto de estudio importante respecto a la influencia de las complejas reacciones que ocurren durante la evaporación y concentración del jugo sobre las características de la miel de caña y la panela (Forero & Bernal, 2015)

Es una operación muy empleada en diversas industrias, ya sea para tomar provecho de la concentración de la disolución (por ejemplo, la concentración de la leche), o para aprovechar el disolvente evaporado (por ejemplo, la obtención de agua desalinizada por ebullición del agua del mar y posterior condensación del vapor de agua). Normalmente se tiene varios evaporadores combinados, en los que se emplea el vapor generado en un evaporador como medio de calefacción del siguiente (se denominan evaporadores de múltiple efecto).

En la industria de elaboración de pasta de tomate es utilizada ampliamente debido a que la obtención de la misma se hace mediante la concentración de sus sólidos solubles, esta concentración se la hace generalmente en equipos al vacío, como los

evaporadores de múltiple efecto, donde se controlan las variables del proceso para conseguir que el producto elaborado tenga mejores características (Bonilla, 2019)

Para la producción de zumos de frutos, panela y azúcar la evaporación de múltiple efecto es muy común ya que mejora los tiempos de proceso y optimiza recursos, este tipo de evaporador trabaja con los vapores teniendo en cuenta las temperaturas de ebullición y transferencia de calor, mientras en cada etapa de evaporación se disminuye el porcentaje de agua, el funcionamiento básico de la evaporación múltiple consiste en el funcionamiento por etapas donde el vapor producido es llevado a un condensador, estos evaporadores son muy eficientes en términos de tiempo (Bonilla, 2019)

La evaporación en procesos con elaboración de jugos concentrados se basa en una operación en la cual se busca concentrar los sólidos disueltos de un líquido, la disolución se

pone a una temperatura de ebullición de tal forma de que el líquido se vaporice y se deje un sólido más concentrado en la solución remanente. Con lo que se logra una reducción de la actividad de agua (A_w) del alimento entre 0,6 y 0,8; con estos valores el desarrollo de microorganismos y velocidad de reacciones bioquímicas y enzimáticas pueden reducirse, pero nunca se va a inhibir por completo, para lograr tal proceso se suministra calor a las soluciones y se procede a separar los vapores formados. Esto promueve la eliminación de gran parte del agua del alimento en forma de vapor mediante el calor suficiente para poder elevar la temperatura del producto hasta su punto de ebullición con el calor sensible y para evaporar agua del alimento mediante el calor latente (Cedeño, 2017)

Para una operación eficiente en la evaporación de alimentos, se recomienda realizar el proceso al vacío, así se logra que la ebullición se efectúe a temperaturas más bajas y se pueda prevenir la descomposición de los materiales orgánicos, el medio de calentamiento más usado es el vapor de agua saturado el cual sede su calor latente, comúnmente en la industria de alimentos se utiliza vapor saturado, por ejemplo en el proceso de jugos de fruta, por lo general los jugos poseen un 70- 95 % de agua, pero la mayor ventaja es su aporte nutricional como vitaminas, minerales, enzimas y fibra. Sin embargo, los responsables del contenido nutricional y sensorial son termosensibles y el uso inapropiado en la concentración provoca pérdidas considerables de las vitaminas, se deteriora el color, aroma y el sabor.

La evaporación de jugos de fruta es parte fundamental en la producción de jugos concentrados. Los jugos son sensibles al calor y su viscosidad aumenta a medida que el agua se va evaporando y los sólidos en suspensión tienden adherirse a la superficie de calentamiento, lo cual causa problemas de sobrecalentamiento que conllevan a carbonizaciones y el deterioro del material, por esta razón se debe buscar disminuir los tiempos de residencia, aumentar las velocidad de circulación y simultáneamente se debe operar con temperaturas bajas, esto se logra cuando se crea vacío, por esta razón cuando el alimento es muy sensible se usa un evaporador de un solo efecto (Cedeño, 2017)

Aspectos importantes en la evaporación

- ✓ Calidad del producto evaporado: mínimo daño térmico, recuperación de aromas
- ✓ Eficiencia de la evaporación: Alta velocidad de evaporación
- ✓ Economía del proceso: Bajo gasto de vapor de calentamiento

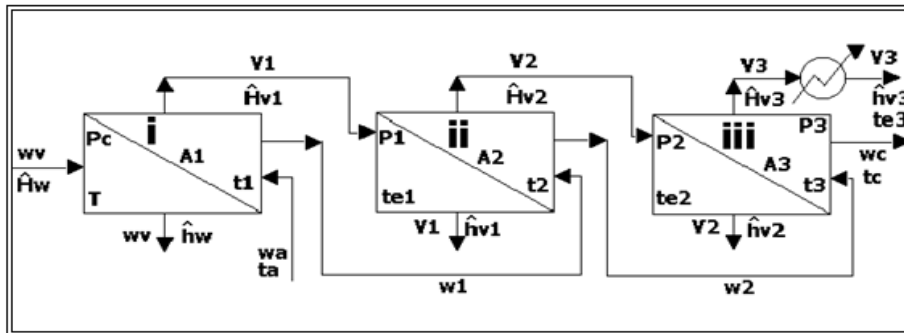
Metodología

En la evaporación se busca el aprovechamiento de vapor desprendido de la cámara de evaporación con el fin de utilizarlo como el fluido calefactor en otro evaporador, en la figura 1 se encuentra esquematizado un sistema de evaporación de tres efectos, en el cual puede observarse que el vapor desprendido del primer evaporador sirve como el fluido calefactor del segundo, mientras el vapor que se desprende en este efecto se utiliza como calefactor para el tercero. Por último, el vapor desprendido del último efecto se lleva al condensador (Fito, 2006)

Por nomenclatura, las distintas corrientes llevarán los subíndices correspondientes del efecto que abandonan. Es conveniente resaltar que el vapor desprendido en los diferentes efectos es cada vez de menor temperatura y menor presión; es decir:

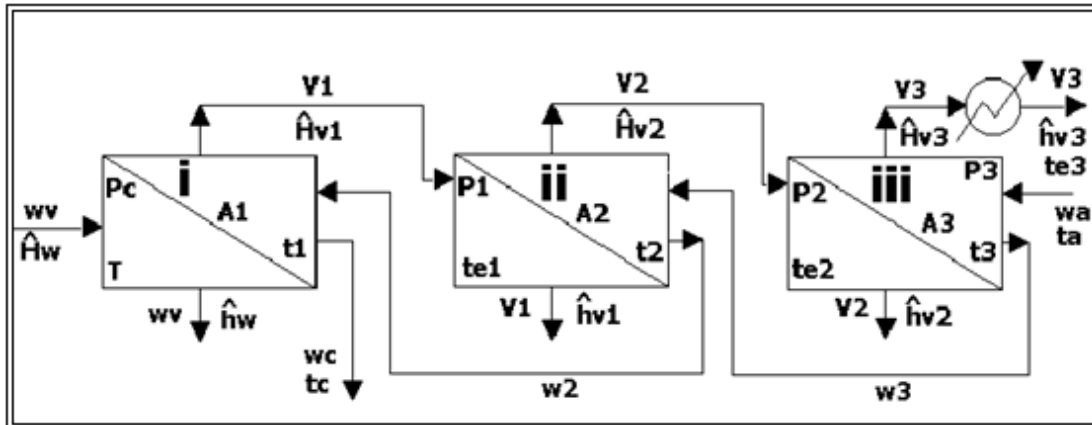
$$P_c > P_1 > P_2 > P_3$$

Figura 5. Evaporador de múltiple efecto en corriente directa.



Fuente: adaptada de (Fito, 2006)

Figura 6. Evaporador de múltiple efecto en contracorriente.



Fuente: adaptada de (Fito, 2006)

Explicación de sentidos de la evaporación

La corriente diluida se alimenta al primer efecto, mientras que la concentrada que abandona cada efecto sirve como alimento del efecto siguiente (Fito, 2006). Se puede observar que las corrientes de vapor y solución concentrada de cada efecto siguen sentidos paralelos. Este sistema de paso es uno de los más utilizados para soluciones en las que el calor las puede afectar, ya que la solución concentrada está en contacto con el vapor de menor temperatura.

Como su nombre indica el sentido de las soluciones a concentrar es en contracorriente con las de vapor (Fito, 2006). La solución diluida se alimenta al último efecto, donde el vapor es de menor energía, mientras que las soluciones concentradas que abandonan cada efecto sirven de alimento al efecto anterior. Este tipo de disposición debe utilizarse con cuidado en el caso de soluciones alimentarias, ya que la solución más concentrada recibe calor del vapor de mayor temperatura y ello puede afectar al alimento.

Modelo matemático

Para el caso a estudiar, se realizó el estudio de una evaporación de corriente directa de tres efectos, el modelo matemático que se plantea y su resolución es análogo al estudio de

una evaporación de más efectos. Para el planteamiento del modelo matemático se realizan balances globales de materia y de componente, balance de energía, cálculo de áreas de cada efecto y economía de vapor.

Nomenclatura y desarrollo de ecuaciones

A continuación, se presenta la nomenclatura usada para describir las variables de operación del evaporador.

S: Flujo de vapor de calentamiento, kJ/kg

F, P₁, P₂ y P₃: Flujo del alimento y productos de cada efecto, kg/h

V₁, V₂ y V₃: Salidas de vapor, kg/h

H: Entalpias, kJ/kg

T, T_s, T₁, T₂, T_{s2}, T₃, T_{s3} y T_{s4}: Temperaturas involucradas en los diferentes efectos, °C

P: Presión, kPa

X_f, X_{p1}, X_{p2}, X_{p3}: Fracción másica del alimento y de los productos de cada efecto

Balance Global

Para iniciar se plantea el balance global en todo el equipo.

$$F + S = V_1 + V_2 + V_3 + P_3 \quad \text{Ecuación 1}$$

Balance de solidos

Luego, se formula el balance específico para sólidos en las corrientes.

$$F + X_F = P_3 X_{P_3} \quad \text{Ecuación 2}$$

Con los valores de F y P₃ se calcula la cantidad total de vapor generado, el cual inicialmente se supone como un dato pivote que permitirá obtener un punto de apoyo para la simulación.

$$F = V_1 + V_2 + V_3 + P_3 \quad \text{Ecuación 3}$$

$$F - P_3 = V_1 + V_2 + V_3$$

$$V_T = V_1 + V_2 + V_3$$

Donde V_T es el vapor total.

Debido a que se pretende analizar el comportamiento de tres efectos, se propone suponer inicialmente que el flujo de vapor es igual para cada efecto.

$$V_1 = V_2 = V_3 = \frac{V_T}{3}$$

Con base en los valores fijados de vapor para cada efecto Se realiza un balance de materia en cada uno de ellos.

Efecto 1

$$F = P_1 + V_1 \quad \text{Ecuación 4}$$

Efecto 2

$$V_1 = P_2 + V_2 \quad \text{Ecuación 5}$$

Efecto 3

$$P_2 = V_3 + P_3 \quad \text{Ecuación 6}$$

De las ecuaciones 4, 5 y 6 se despejan F, P₁ Y P₂

Posteriormente, es necesario realizar un balance de sólidos en cada efecto

Efecto 1

$$FX_F = P_1X_{P1} \quad \text{Ecuación 7}$$

Efecto 2

$$P_1X_{P1} = P_2X_{P2} \quad \text{Ecuación 8}$$

Efecto 3

$$P_2X_{P2} = P_3X_{P3} \quad \text{Ecuación 9}$$

Es necesario calcular la elevación del punto de ebullición en cada efecto según la siguiente ecuación, donde x corresponde a la fracción másica de sólidos del alimento en cada efecto.

$$EPE(^{\circ}C) = 1.78x^2 + 6.22x \quad \text{Ecuación 10}$$

Ahora se calcula la caída de temperatura en cada efecto:

$$\sum \Delta T = T_s - T_2 - \sum EPE \quad \text{Ecuación 11}$$

A continuación, se procede a calcular los valores de cambio de temperatura de ebullición para cada efecto ΔT_1 , ΔT_2 y ΔT_3 .

$$\Delta T_1 = \sum \Delta T \frac{(1/U_1)}{\left(\frac{1}{U_1} + \frac{1}{U_2} + \frac{1}{U_3}\right)} \quad \text{Ecuación 12}$$

$$\Delta T_2 = \sum \Delta T \frac{(1/U_2)}{\left(\frac{1}{U_1} + \frac{1}{U_2} + \frac{1}{U_3}\right)} \quad \text{Ecuación 13}$$

$$\Delta T_3 = \sum \Delta T \frac{(1/U_3)}{\left(\frac{1}{U_1} + \frac{1}{U_2} + \frac{1}{U_3}\right)} \quad \text{Ecuación 14}$$

Con estas relaciones se calculan las temperaturas involucradas en los tres efectos y sus correspondientes entalpías. Para esto se programaron los valores de entalpías de agua saturada en una hoja de cálculo adicional.

Ahora para calcular el Cp de los alimentos se usa la fracción másica de cada efecto con la siguiente ecuación según (Fito, 2006)

$$C_p = 4.18 - 3.34x_w \left(\frac{kJ}{kg^{\circ}C} \right) \quad \text{Ecuación 15}$$

Balance de energía

Se procede a formular el balance de energía para el efecto 1:

$$FCp_f(T_f - 0) + S(h_g - h_f) = L_1Cp_1(T_1 - 0) + (F - L_1)h_gV_1 \quad \text{Ecuación 16}$$

Balance de energía efecto 2:

$$P_1Cp_1(T_1 - 0) + V_1(h_g - h_f) = P_2Cp_2(T_2 - 0) + (L_1 - L_2)hV_2 \quad \text{Ecuación 17}$$

Balance de energía efecto 3:

$$P_2Cp_2(T_2 - 0) + (P_1 - P_2)(h_g - h_f) = P_3Cp_3(T_3 - 0) + (P_2 - P_3)hV_3 \quad \text{Ecuación 18}$$

De la ecuación 18 se despeja P_2 y se reemplaza en la ecuación 17 y se obtienen los verdaderos valores de P_1 Y P_2 . Se reemplazan los valores hallados en la ecuación 16 y se despeja (S) para obtener el vapor requerido. Con los valores hallados de P_1 Y P_2 se calculan los valores finales de V_1 , V_2 y V_3 .

Para calcular el calor transferido en cada uno de los efectos se aplican las siguientes ecuaciones:

$$q_1 = S (h_g - h_f) \quad \text{Ecuación 19}$$

$$q_2 = V_1 (h_g - h_f) \quad \text{Ecuación 20}$$

$$q_1 = V_2 (h_g - h_f) \quad \text{Ecuación 21}$$

Para calcular el área de cada efecto se utiliza la siguiente ecuación:

$$A = \frac{q}{U \Delta T} \quad \text{Ecuación 22}$$

Con el área de cada evaporador se estima un área promedio mediante la siguiente ecuación:

$$A = \frac{A_1 + A_2 + A_3}{3} \quad \text{Ecuación 23}$$

Para el cálculo de economía de vapor se usa la siguiente relación:

$$EV = \frac{\text{Agua total evaporada}}{\text{Vapor consumido}} = \frac{V_T}{S} \quad \text{Ecuación 24}$$

Resultados

Con el fin de evaluar los resultados obtenidos en el simulador, se realizaron diferentes corridas, inicialmente se varió el flujo de alimento que ingresa al efecto 1, los datos obtenidos se presentan a continuación.

Tabla 2. Variando el flujo de alimento

Flujo de alimento(kg/h)	Fracción entrada	Fracción salida	Presión de vapor de calentamiento (Kpa)	Vapor de calentamiento	Presión de evaporador 3 (Kpa)	Efecto	vapor de cada efecto (Kg/h)	Calor (W)	Área (m ²)	Economía
100	0,04	0,15	150	37,34	12,6	1	22,492	23089,82	0,652	1,964
						2	24,455	15330,14	0,433	
						3	26,386	16880,75	0,477	
200	0,04	0,15	150	69,60	12,6	1	44,984	43036,90	1,218	1,964
						2	48,911	27799,30	0,787	
						3	52,771	31203,75	0,883	
10000	0,05	0,15	150	3734,15	12,6	1	2249,211	2308981,94	65,292	1,964
						2	2445,542	1533014,28	43,349	
						3	2638,579402	1688074,99	47,734	

Fuente: Autor, 2021

Posteriormente, se evaluaron los cambios generados al variar la fracción másica de sólidos en la entrada de alimentación.

Tabla 3. Variando fracción de entrada

Flujo de alimento (kg/h)	Fracción entrada	Fracción salida	Presión de vapor de calentamiento (kPa)	Vapor de calentamiento (kg/h)	Presión de evaporador 3 (Kpa)	Efecto	Vapor de cada efecto (kg/h)	Calor (W)	Área (m ²)	Economía
100	0,04	0,15	150	37,34	12,6	1	22,49211 472	23089,82	0,653	1,964
						2	24,45542 459	15330,14	0,433	
						3	26,38579 402	16880,75	0,477	
100	0,05	0,15	150	34,80	12,6	1	20,10770 938	21518,45	0,609	1,916
						2	22,17299 036	13899,65	0,393	
						3	24,38596 693	15601,87	0,441	
100	0,07	0,15	150	29,72	12,6	1	15,33966 481	18375,44	0,521	1,795
						2	17,60844 996	11038,72	0,313	
						3	20,38521 856	13043,07	0,3708	

Fuente: Autor, 2021

La herramienta también permite evaluar los cambios generados por una variación en la fracción másica de salida, variable que resulta de gran interés cuando se tiene como objetivo llegar a una concentración definida.

Tabla 4. Variando la fracción de salida

Flujo de alimento (kg/h)	Fracción entrada	Fracción salida	Presión de vapor de calentamiento (kPa)	Vapor de calentamiento	Presión de evaporador 3 (Kpa)	Efecto	Vapor de cada efecto (Kg/h)	Calor (W)	Área (m²)	Economía
100	0,04	0,15	150	37,34	12,6	1	22,492	23089,82	0,653	1,964
						2	24,455	15330,14	0,433	
						3	26,386	16880,75	0,477	
100	0,04	0,25	150	41,29	12,6	1	26,372	25532,48	0,728	2,034
						2	28,119	17624,76	0,502	
						3	29,509	18875,06	0,538	
100	0,04	0,5	150	44,32	12,6	1	29,311	27404,46	0,803	2,076
						2	30,860	19336,43	0,567	
						3	31,829	20341,82	0,596	

Fuente: Autor, 2021

A continuación, se presentan los resultados obtenidos al variar la presión del vapor de servicio.

Tabla 5. Variando la presión de vapor calentamiento

Flujo de alimento (kg/h)	Fracción entrada	Fracción salida	Presión de vapor de calentamiento (Kpa)	Vapor de calentamiento	Presión de evaporador 3 (Kpa)	Efecto	Vapor de cada efecto (Kg/h)	Calor (W)	Área (m²)	Economía
100	0,04	0,15	150	37,34	12,6	1	22,492	23089,82	0,653	1,964
						2	24,455	15330,14	0,433	
						3	26,386	16880,75	0,477	
100	0,04	0,15	205	38,68	12,6	1	22,160	23633,03	0,576	1,896
						2	24,460	15191,12	0,370	
						3	26,713	16995,79	0,414	
100	0,04	0,15	250	39,60	12,6	1	21,936	23993,32	0,536	1,852
						2	24,463	15097,10	0,337	
						3	26,933	17072,29	0,381	

Fuente: Autor, 2021

En las tablas 6, 7 y 8 se presentan los resultados obtenidos al variar la presión del evaporador 3 y diferentes combinaciones entre variables de entrada como flujo de alimentación y fracción del alimento.

Tabla 6. Variando presión del evaporador 3

Flujo de alimento(kg/h)	Fracción entrada	Fracción salida	Presión de vapor de calentamiento (Kpa)	Vapor de calentamiento	Presión de evaporador 3 (Kpa)	Efecto	Vapor de cada efecto (Kg/h)	Calor (W)	Área (m ²)	Economía
100	0,04	0,15	150	37,34	12,6	1	22,492	23089,82	0,653	1,964
						2	24,455	15330,14	0,433	
						3	26,386	16880,75	0,477	
100	0,04	0,15	150	37,44	13,65	1	22,546	23153,30	0,673	1,896
						2	24,455	15324,37	0,445	
						3	26,332	16831,90	0,489	
100	0,04	0,15	150	37,57	15	1	22,610	23228,96	0,698	1,852
						2	24,454	15317,49	0,460	
						3	26,268	16773,71	0,504	

Fuente: Autor, 2021

Tabla 7. Variando flujo de alimento y fracción de entrada

Flujo de alimento(kg/h)	Fracción entrada	Fracción salida	Presión de vapor de calentamiento (Kpa)	Vapor de calentamiento	Presión de evaporador 3 (Kpa)	Efecto	Vapor de cada efecto (Kg/h)	Calor (W)	Área (m²)	Economía
100	0,04	0,15	150	37,34	12,6	1	22,492	23089,82	0,653	1,964
						2	24,455	15330,14	0,433	
						3	26,386	16880,75	0,4773	
500	0,05	0,15	150	174,00	12,6	1	100,538	107592,24	3,045	1,916
						2	110,865	69498,25	1,967	
						3	121,929	78009,37	2,208	
10000	0,07	0,15	150	2971,73	12,6	1	1533,966	1837544,04	52,11	1,795
						2	1760,845	1103871,81	31,305	
						3	2038,522	1304307,42	36,989	

Fuente: Autor, 2021

Tabla 8. Variando flujo, fracción entrada y salida

Flujo de alimento(kg/h)	Fracción entrada	Fracción salida	Presión de vapor de calentamiento (Kpa)	Vapor de calentamiento	Presión de evaporador 3(Kpa)	Efecto	vapor de cada efecto (Kg/h)	Calor (W)	Área (m²)	Economía
100	0,04	0,15	150	37,34	12,6	1	22,492	23089,82	0,653	1,964
						2	24,455	15330,14	0,433	
						3	26,386	16880,75	0,477	
500	0,05	0,25	150	198,66	12,6	1	124,776	122842,76	3,506	2,013
						2	133,761	83843,26	2,393	
						3	141,463	90488,96	2,582	
10000	0,07	0,5	150	4185,23	12,6	1	2723,498	2587903,74	52,111	1,795
						2	2882,181	1806014,48	31,305	
						3	2994,321	1914030,15	36,989	

Fuente: Autor, 2021

Análisis de resultados

Para predecir el comportamiento de las diferentes variables de salida de la evaporación, se hicieron modelaciones a partir de cambios en las variables de entrada, de esta forma, fue posible evidenciar que cuando se varía la cantidad de flujo de alimento, como se observa en la tabla 2, el vapor de calentamiento requerido presenta un comportamiento directamente proporcional, por lo tanto el vapor de cada efecto aumenta en proporción al vapor de entrada, como resultado, la economía de vapor se mantiene en un valor de 1,964 en las diferentes proporciones, ya que se utiliza el vapor de manera eficiente, este resultado concuerda con lo expuesto por (Geankopli, 1998), quien afirma que un evaporador de efecto simple desperdicia bastante vapor de agua, pues no se utiliza el calor latente del vapor que sale del evaporador. Sin embargo, este costo puede reducirse en evaporadores de efecto múltiple que recuperan el calor latente del vapor que se desprende y lo vuelven a utilizar.

Otro punto importante a resaltar es que, al modificar la velocidad de flujo del primer evaporador, se modifica la concentración final del alimento; cuando un evaporador de efecto múltiple opera en estado estacionario, la velocidad de flujo y la de evaporación son constantes en cada efecto. Las presiones, las temperaturas y las velocidades del flujo interno se mantienen constantes de manera automática por las condiciones de estado estacionario del propio proceso. Para modificar la concentración del efecto final, es indispensable variar la velocidad de alimentación al primer efecto, es necesario que se satisfaga el balance total de materia del sistema general y el de cada evaporador. Si la solución final está demasiado concentrada, se aumenta la velocidad de alimentación y viceversa; entonces, la solución final alcanzará un nuevo estado estacionario a la concentración deseada (Geankopli, 1998).

En la tabla 3 se modifica la fracción base sólida y se observa la siguiente tendencia a medida que se aumenta la fracción de sólidos en la entrada del primer efecto, se requiere menor cantidad de vapor de calentamiento por la siguiente razón, el alimento tiene menor cantidad de agua a remover por lo tanto se usa menor cantidad de vapor en cada efecto y se ve reflejado en la economía del vapor que disminuye.

Al aumentar la fracción de sólidos a la salida del último efecto como se observa en la tabla 4, se evidencia mayor cantidad de agua a remover para poder lograr una evaporación eficiente, por lo tanto, se debe usar mayor cantidad de vapor de calentamiento y se debe aumentar el área de cada evaporador y su economía aumenta.

Analizando la tabla 5 donde se aumenta la presión de vapor de calentamiento, cuando se usa vapor de agua saturado a presión más alta, el valor de ΔT aumenta, con lo cual disminuye el tamaño y el costo del evaporador, de esta forma se requiere menor área en los evaporadores a medida que se aumenta la presión, sin embargo, el vapor de alta presión cuesta más y suele ser más valioso como fuente de potencia en otros equipos. Por consiguiente, la presión óptima del vapor de agua se determina mediante un balance económico general (Geankopli, 1998).

Según (Forero & Bernal, 2015) también es importante resaltar que la evaporación múltiple aprovecha la energía del vapor producido en el primer efecto, para poder llevar a cabo la evaporación del jugo en el segundo efecto y así sucesivamente por lo tanto en cada efecto se trabaja con una presión inferior a la del efecto anterior, para así garantizar que el vapor de calentamiento se encuentre sobrecalentado y pueda alcanzar la temperatura de ebullición.

Cuando se estudia la presión de salida del último efecto, el vapor de calentamiento y el vapor usado en cada efecto son similares, como se observa en la tabla 6, lo cual conlleva a tener equipos con menor área y esto se debe a que se requieren cambios grandes que se logran con variaciones altas en la presión. Según (Geankopli, 1998), en el primer efecto se usa vapor de agua como medio de calentamiento, temperatura de ebullición T_1 a presión P_1 . El vapor extraído del primer efecto se usa como medio de calentamiento, se condensa en el segundo efecto y se vaporiza agua a temperatura T_2 y presión P_2 en este efecto. Para transferir calor del vapor que se condensa al líquido en ebullición en este segundo efecto, la temperatura de ebullición T_2 debe ser inferior a la de condensación. Esto significa que la

presión P_2 del segundo efecto debe ser menor que la presión P_1 del primer efecto. De manera similar, el vapor del segundo efecto se condensa al calentar el tercer efecto; por consiguiente, la presión P_3 es inferior a P_2 .

En la tabla 7 y 8 suceden varios cambios al realizar el aumento del flujo y la fracción de entrada, el vapor de calentamiento, los vapores de cada efecto y las áreas de cada efecto se aumentan, pero si se analiza la tabla 8, al aumentar la fracción de salida el vapor de calentamiento se aumenta en gran proporción y esto es debido a que se necesita eliminar más cantidad de agua en cada efecto para tener un producto con la humedad requerida.

Al analizar los diferentes escenarios se observan cambios significativos en cuanto al balance de materia, energía y economía del vapor que puede servir como una herramienta para un estudiante del área de ingeniería de alimentos ya que pueden comprobar sus datos y analizar tendencias que son esenciales para su formación profesional.

Este simulador también tiene uso viable a nivel industrial para tener una guía acerca de los procesos industriales y poder tener un control en las variables debido a que en la industria de alimentos, la mayor parte de la evaporación de múltiple efecto usa vapor saturado para la elaboración de jugos de fruta, sin embargo, la termo sensibilidad de los nutrientes hace necesario realizar ensayos previos que permitan controlar las variables que puedan provocar pérdidas indeseadas en color, aroma, contenido nutricional y sabor. Por lo tanto, una empresa puede evaluar los tiempos de residencia, las velocidades de circulación y las temperaturas adecuadas para operar en las mejores condiciones según lo deseado

Conclusiones

Se logro identificar que las variables más relevantes en la evaporación múltiple para controlar el proceso son presión de evaporación, temperatura de operación, flujo de alimento y fracción de sólidos.

Es preciso afirmar que en la evaporación las propiedades térmicas del alimento como su calor específico se pueden modelar en las diferentes matrices en función de la fracción másica del soluto en disolución y así poder tener calores precisos sin la necesidad de involucrar muchos datos o usar bases de datos extensas.

Los simuladores constituyen herramientas de apoyo que permiten desarrollar las competencias del estudiante mediante la manipulación de variables de entrada y el análisis de las variables de salida.

Los algoritmos matemáticos desarrollados para la evaporación fueron robustos y precisos, lo que se puede comprobar al usar un simulador comercial SuperPro Designer.

Recomendaciones

Incluir en la simulación los costos de los fluidos de servicio para poder obtener resultados que permitan tomar decisiones a nivel económico

Evaluar el tipo de matriz alimentaria y poder trabajar con una condición adecuada para no afectar las condiciones organolépticas

Se recomienda usar una interfaz amigable con otro lenguaje de programación.

Bibliografía

- ACOFI. (2019). Capítulo de Ingeniería de alimentos. Recuperado el 08 de 08 de 2020, de <https://www.acofi.edu.co/capitulos/aspectos-generales-capitulo-de-ingenieria-de-alimentos/%0A%0A>
- Barber, R., & Crespo, J. (2013). Control practices using simulink with arduino as low cost hardware. *In IFAC*, 10(1). doi:<https://doi.org/10.3182/20130828-3-UK-2039.00061>
- Bonilla, S. (2019). Operaciones Unitarias: Enfocadas a los evaporadores en la elaboración de productos de consumo humano. *Ciencia Digital*, 3(2), 548-560. doi:<https://doi.org/10.33262/cienciadigital.v3i2.451>
- Cataldi, Z., Bruno, O., & Sánchez, V. (2013). modelos y simuladores en la enseñanza de ingeniería: las estrategias de por descubrimiento. *International Conference on Engineering and Computer Education*, 8, 455-459. doi:<https://doi.org/10.14684/icece.08.2013.455-459>
- Cedeño, L. (2017). *Fundamentos Básicos de cálculos de ingeniería Química* (Vol. 1). Quito, Ecuador: Utmach. Obtenido de www.utmachala.edu.ec
- Díaz, J., & Orozco, J. (2018). La evaporación en equipos de múltiples efectos: Una operación necesaria en industrias procesadoras de frutas y vegetales. *Universidad de Matanzas*, 3. Recuperado el 12 de 23 de 2020, de https://www.researchgate.net/publication/338582673_La_evaporacion_en_equipos_de_multiples_efectos_Una_operacion_necesaria_en_industrias_procesadoras_de_frutas_y_vegetales
- Fito, P. (2006). Desarrollo de herramientas para cálculo de la ingeniería de alimentos. Recuperado el 12 de 08 de 2020, de <https://www.upv.es/dtalim/herraweb.htm>
- Forero, L., & Bernal, H. (2015). Efecto de las variables de evaporación: Presión Y flujo calórico en la calidad de la panela. *Corpoica Cienc. Tecnol. Agropecu.*, 7-23. Obtenido de <http://www.scielo.org.co/pdf/ccta/v16n1/v16n1a02.pdf>
- Francisco, C. (2008). Modelo en programa de ordenador para resolver problemas de balance de materia. *Instituto de Investigación de La Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica*, 22(11), 33-38.

- Franco, J. (2006). Diseño de un simulador por computadora de procesos de evaporación en una línea de evaporadores de múltiple efecto. *Boletín Electrónico*, 04(04), 1-16.
- Geankopli, C. (1998). *Procesos de transporte y operaciones unitarias*. México: Compañía intercontinental. Recuperado el 27 de 10 de 2020, de https://www.google.com/search?q=se+llama+fracci%C3%B3n+solida+en+balance+de+materia&rlz=1C1CHZN_esCO928CO928&oq=se+llama+fracci%C3%B3n+solida+en+balance+de+materia&aqs=chrome..69i57j33i160.23515j0j7&sourceid=chrome&ie=UTF-8
- Granjo, J., & Rasteiro, M. (2020). Enhancing the autonomy of students in chemical engineering education with LABVIRTUAL platform. *Education for Chemical Engineers*, 31, 21-38. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ece.2020.03.002>
- Grodzki, J., Orlet, T., & Tekkaya, A. (2018). emote and Virtual Labs for Engineering Education 4.0: Achievements of the ELLI project at the TU Dortmund University. *Procedia Manufacturing*, 26, 1349-1360. doi:<https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.07.126>
- Macías, J., Contreras, S., & Pérez, C. (2015). Constructivismo aplicado, herramienta básica en la enseñanza de la ingeniería. *ANFEI Digital*, 2, 1-18.
- MEN. (2017). Marco Nacional de cualificaciones, Sector Agrario. Marco Nacional de Cualificaciones. *Sector Agrario*. Recuperado el 12 de 05 de 2020, de [//cms.mineducacion.gov.co/static/cache/binaries/articles-362822_recurso.pdf?binary_rand=9874](https://cms.mineducacion.gov.co/static/cache/binaries/articles-362822_recurso.pdf?binary_rand=9874)
- Paola, A., Osorio Villa, A., Blanca, M., Franco, A., & Jaramillo, A. (2012). El Uso De Simuladores Educativos Para El Desarrollo De Competencias En La Formación Universitaria De Pregrado. *Revista Q*, 1-23. Recuperado el 13 de 08 de 2020, de <http://revistaq.upb.edu.co>
- Potkonjak, V, Gardner, M, Callaghan, V, Mattila, P, Guetl, C., Petrović, V. M., & Jovanović, K. (2016). (2016). Virtual laboratories for education in science, technology, and engineering. *Computers and Education*(95), 309-327. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2016.02.002>

- Rodríguez, M. (2017). *Evaluación de la operación del evaporador de múltiple efecto empleado en el procesamiento de tomates en el Combinado Industrial*. Matanzas, Cuba. Recuperado el 2020 de 12 de 23, de https://www.researchgate.net/publication/328562501_Evaluacion_de_la_operacion_del_evaporador_de_multiple_efecto_empleado_en_el_procesamiento_de_tomates_en_el_Combinado_Industrial_Heroes_de_Giron
- Savelski, M. J, Dahm, K., & Hesketh, R. P. (2001). Is process simulation effectively utilized in chemical engineering courses. *ASCE Annual Conference Proceedings*, 6561–6573.
- Toro, N. A, & Vitale, C. R. (2013). La Educación Superior a distancia y virtual en Colombia: Nuevas Realidades. *In Virtual Educa*. Obtenido de <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324>
- Trujillo-Cayado L. A., & Carrillo, F. (2015). Diseño de una intervención docente para la enseñanza- aprendizaje de operaciones básicas de ingeniería química mediante el uso de la simulación por ordenador. *Afinidad Lxxii*, 101-107.
- Trystram, G. (2012). Modelling of food and food processes. *Journal of Food Engineering*. 110(2), 269–277. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2011.05.001>

Anexos

En el siguiente enlace es posible consultar la herramienta generada y la muestra de cálculo.

[Simulador evaporación](#)