

Desarrollo de un Material Educativo Computarizado (MEC) para la simulación de los fenómenos de transferencia de calor e hidrodinámica en un evaporador de termosifón vertical a escala laboratorio

Dana Alexandra Almeida Rincón y Jully Melissa Pérez Ríos

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniera Química

Director

Crisóstomo Barajas Ferreira

M. Sc. Ingeniería Química

Codirector

Diana Marcela Ibarra Mojica

M. Sc. Ingeniería química

Ingeniería Sanitaria y Ambiental

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Fisicoquímicas

Escuela de Ingeniería Química

Bucaramanga

2021

Agradecimientos

Le doy gracias a mi mamá Ingret Rincón y a mi padre Víctor Hugo Almeida por su gran amor, apoyo, paciencia y por la oportunidad de brindarme una buena educación durante toda mi vida, por esto y más los amo.

A mi tío Herber por siempre estar en mi vida acompañándome, aconsejándome y brindándome lo mejor que tiene en sus manos, a mi nona y al tata por su amor y su interés en todos mi proyectos y mi vida.

Le agradezco al profesor Crisóstomo Barajas Ferreira por su dedicación para con nosotras y con este proyecto a pesar de las circunstancias en todo momento estuvo pendiente, al tanto y fuerte; me llevo los mejores conocimientos, consejos y la satisfacción de haber trabajado de la mano con uno de los mejores profesores.

A Martha Matiz por su apoyo y confianza al dejarme formar parte de la Revista ION, aprendí cosas magnificas en cuanto a procesos, normas editoriales y moral en el trabajo de la mano con paciencia, tinto y muchas sonrisas.

A Camilo Porras por acompañarme durante lo largo de mi carrera, por estar siempre pendiente con sus palabras y acciones llenas de fuerza encaminadas a siempre entregar lo mejor de mí.

Finalmente a mis queridos amigos los cuales conocí en los últimos semestres de mi carrera, en especial a Jully por escogerme como su compañera de proyecto, por su amistad sincera y a pesar de la demora, la incertidumbre o los enojos nunca dejo su sonrisa de lado llenando de armonía nuestro ambiente de trabajo.

A todos los mencionados y a los que en algún momento se cruzaron en mi vida apoyándome les doy gracias por dejarme formar parte de la suya.

Dana Almeida Rincón

Le agradezco a Dios por darme una segunda oportunidad, por ser mi soporte en momentos difíciles y permitir que viviera y terminara mi experiencia en la universidad.

Le doy gracias a mi mamá Rud Piedad, a mi papá Elber Orlando quienes son mi mayor modelo, mis primeros formadores como persona y quienes me apoyaron y motivaron durante mi proceso de formación académica.

A mi hermano David quien fue una guía desde mis primeros pasos y quien me orientó en mi inicio en la universidad, mi hermana María quien espero siga nuestros pasos y trabaje en conseguir sus metas.

A mi sensei Juan José por haber sido una inspiración para perseverar, resistir y creer en mí y en lo que puedo lograr, no solo dentro del dojo sino también en la vida.

Le agradezco al profesor Crisóstomo quien fue de mucha ayuda para la realización y culminación del proyecto, quien a pesar de las dificultades siempre estuvo atento a nuestras dudas y a resolverlas.

A todos los amigos que la universidad me dio, con quienes superé y tuve muchas anécdotas que me llevo en el corazón, muchas gracias por ayudarme y confiar en mí, en especial a Dana quien no pensé que de ser mi compañera se convertiría en una gran amiga, muchas gracias por su paciencia, dedicación y entrega no solo con el proyecto si no también conmigo.

Jully Pérez Ríos

Tabla de Contenido	Pág.
Introducción	10
1. Objetivos	11
1.1 Objetivo General	11
1.2 Objetivos Específicos	11
2. Cuerpo del trabajo	12
2.1 Estado del arte	12
2.2 Metodología	13
2.2.1 Análisis de la necesidad	14
2.2.2 Selección del software	15
2.2.3 Estructuración del contenido del MEC	16
2.2.4 Creación de las ayudas multimedia para el MEC	19
2.2.5 Diseño de botones interactivos	21
2.2.6 Diseño y montaje del MEC	22
2.2.7 Prueba y ajuste del MEC	27
2.3 Resultados	27
3. Conclusiones	28
4. Recomendaciones	29
Referencias Bibliográficas	30
Apéndice	34

Lista de tablas	Pág.
Tabla 1. Listado de softwares usados para la creación de la MEC	15
Tabla 2. Dimensiones del interior del evaporador	39
Tabla 3. Longitud y material del evaporador	40
Tabla 4. Dimensiones de los tubos del condensador	60
Tabla 5. Dimensiones de la coraza del condensador	60

Lista de Figuras	Pág.
Figura 1. Etapas de la metodología para la creación y montaje del MEC	14
Figura 2. Gif del equipo de laboratorio de procesos	19
Figura 3. Video de la presentación del equipo.....	20
Figura 4. Mapa mental de tipos de condensadores	20
Figura 5. Imagen borrador capítulo hidrodinámica	21
Figura 6. Descripción emergente	22
Figura 7. Visualización de la acción para cambiar de página.....	22
Figura 8. Secuencia de creación de la imagen del equipo de laboratorio en Edraw max	23
Figura 9. Página inicio del MEC	25
Figura 10. Índice del MEC	25
Figura 11. Imagen del equipo indicando sus accesorios.....	26
Figura 12. Secuencia desarrollo de la práctica	26
Figura 13. Equipo de laboratorio	34
Figura 14. Vista de los conceptos básicos en el MEC	38
Figura 15. Vista del contenido del evaporador en el MEC.....	42
Figura 16. Equipo de laboratorio indicando las alturas para la caída de presión hidrostática	43
Figura 17. Vista del contenido del condensador en el MEC	61
Figura 18. Vista de los accesorios del equipo en el MEC	63

Lista de Apéndices

Apéndice A. Manual de operación – contenido teórico de los capítulos del MEC..... 34

Resumen

Título: Desarrollo de un Material Educativo Computarizado (MEC) para la simulación de los fenómenos de transferencia de calor e hidrodinámica en un evaporador de termosifón vertical a escala laboratorio *

Autor: Dana Alexandra Almeida Rincón, Jully Melissa Pérez Ríos †

Palabras Clave: Material educativo computarizado, termosifón, Genially, TICs.

Descripción: La creación del material educativo computarizado (MEC) tiene como propósito ser una herramienta que permita a los estudiantes de la escuela de Ingeniería Química-UIS, aclarar y revisar los contenidos teóricos que tiene la práctica del evaporador de termosifón vertical, presentándose de manera organizada para un adecuado estudio y realización de la práctica en el laboratorio.

El MEC tiene una presentación dinámica y didáctica que posee: una introducción del equipo, los conocimientos teóricos trabajados en fenómenos de transporte, termodinámica y manejo de fluidos y sólidos, terminando con una guía del paso a paso para el desarrollo de la práctica. Estos conocimientos se despliegan en el programa Genially que facilita el uso de herramientas interactivas con fines educativos, el cual fue seleccionado previamente al realizar una búsqueda detallada entre programas que permiten la realización de contenidos TICs.

El desarrollo del MEC se logró empleando un diseño tecno-pedagógico, inicialmente se hace un análisis de necesidad dentro de la escuela de Ingeniería Química, continuando con la selección del programa adecuado en el cual se estructura el contenido; permitiendo agregar enlaces de interés como complemento, preguntas de conocimiento, videos y animaciones que conservan el espacio didáctico que quiere dar el MEC, luego se realizó el diseño de la interfaz y el montaje de los contenidos, culminando con pruebas y ajustes para corroborar el correcto funcionamiento del MEC.

* Trabajo de Grado

† Facultad de Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: Crisóstomo Barajas Ferreira. M. Sc. Ingeniería Química. Codirector: Diana Marcela Ibarra Mojica. M. Sc. Ingeniería Química.

Abstract

Title: Development of a Computerized Educational material for the simulation of the phenomena of heat transfer and hydrodynamics in a laboratory scale vertical thermosyphon evaporator*

Author: Dana Alexandra Almeida Rincón, Jully Melissa Pérez Ríos ‡

Key Words: Computerized Educational material, thermosyphon, Genially, TICs.

Description: the creation of the computerized educational material (MEC) is intended to be a tool that allows students of the School of Chemical Engineering-UIS, clarify and review the theoretical contents of the vertical thermosyphon evaporator practice, presenting itself in an organized way for a suitable study and realization of the practice in the laboratory.

The MEC has a dynamic and didactic presentation that has: an introduction to the equipment, the theoretical knowledge worked on transport phenomena, thermodynamics and handling of fluids and solid, ending with a step-by-step guide for the development of the practice. This knowledge is displayed in the Genially program that facilitates the use of interactive tools for educational purpose, which was previously selected when performing a detailed search among programs that allow the realization of TICs content.

The development of the MEC was achieved using a techno-pedagogical design, initially a need analysis is made within the school of Chemical Engineering, continuing with the selection of the appropriate program in which the content is structured; allowing you to add links of interest as a complement, knowledge questions, videos and animations that preserve the didactic space that the MEC wants to give, then the interface design and the content assembly were carried out, culminating with tests and adjustments to corroborate the correct operation of the MEC.

* Degree Work

‡ Faculty of phisicochemistry. School of Chemical Engineering. Director: Crisóstomo Barajas Ferreira. M. Sc. Chemical Engineering. Co-director: Diana Marcela Ibarra Mojica. M. Sc. Chemical Engineering.

Introducción

La educación virtual ha tomado gran fuerza en el último año demostrando que es indispensable el uso de diferentes materiales interactivos para poder llegar al estudiante de la forma más completa y breve posible, sin dejar de un lado la mejor calidad en la enseñanza, es aquí donde todas las herramientas tecnológicas adquieren un papel importante como una forma de generar ambientes más interactivos de aprendizaje.

Por este motivo se quiere implementar un Material Educativo Computarizado (MEC) de la mano con las nuevas Tecnologías de Información y Comunicación (TICs) en el laboratorio de procesos I, para el equipo evaporador de termosifón vertical; ya que estas tecnologías representan una oportunidad única para que la formación académica sea mucho más dinámica e interactiva, facilitando el reconocimiento de los equipos y su funcionamiento, hecho que además, refuerza los conocimientos adquiridos previamente en las aulas de clase.

El desarrollo de un material educativo computarizado para el equipo de laboratorio, se crea para incentivar el proceso de aprendizaje autónomo que permita aflorar en el estudiante nuevas habilidades y competencias, promoviendo que el estudiante sea el que maneja su tiempo y su propio ritmo de estudio, de tal forma que la apropiación del tema sea más consiente y duradera durante toda la formación restante del futuro ingeniero químico. De igual manera, en este proyecto es valioso el acompañamiento docente promoviendo el uso de este medio de aprendizaje en el laboratorio.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Desarrollar una herramienta informática interactiva, establecida en un entorno web, que contenga toda la información relevante para el estudio de los fenómenos de transferencia de calor e hidrodinámica en un evaporador de termosifón vertical.

1.2 Objetivos Específicos

Suministrar una herramienta educativa (MEC), con el fin de que los estudiantes puedan comprender el funcionamiento y manejo de un evaporador de termosifón vertical.

Recopilar el fundamento teórico referente a los fenómenos de transferencia de calor e hidrodinámica en un evaporador de termosifón vertical

Crear un software computarizado interactivo en conjunto con las TICs, que facilite la enseñanza y sirva como soporte para el docente en la operación de un termosifón vertical.

2. Cuerpo del trabajo

2.1 Estado del arte

En los últimos años se han creado herramientas computarizadas con el objetivo de ser un soporte para la enseñanza, estas poseen un patrón para mostrar contenido donde cada una de sus actividades abarcan diferentes niveles de dificultad según sea el tipo de persona a la que va dirigida (Pere Marquès, 2020), las cuales comúnmente son estudiantes de educación básica y superior.

Dentro de los tipos de herramientas computarizadas encontramos las TICs, que aportan crecientes posibilidades a los procesos de enseñanza-aprendizaje como aportaciones a los sistemas convencionales de aula, en la mediación de la comunicación educativa, constituyendo entornos virtuales de formación; esta herramienta se ha diseñado en forma de juegos, videos, multimedia y libros digitales entre otros, que permiten recrear y simular un ambiente interactivo mientras se aprende (Salinas Ibañez, 2008).

El MEC (Material Educativo Computarizado) es una herramienta TIC (Tecnologías de la Información y la Comunicación) enfocada a la educación, ya que favorecen la motivación y la curiosidad intelectual de los estudiantes (Angarita, Duarte, & Fernández, 2018). Según literatura esta herramienta ha sido recreada en universidades de países como España, Argentina y Costa Rica en donde han realizado a su vez estudios para medir el avance en el proceso de aprendizaje de los estudiantes que hacen uso de esta herramienta, observando en su mayoría resultados efectivos. También prestigiosas universidades como La Universidad de Oxford disponen de laboratorios virtuales de manera gratuita (Angarita et al., 2018).

Estas herramientas buscan convertirse en estrategias que mejoren la presentación y comprensión de ciertos tipos de información, fomenten el trabajo cooperativo y aumenten la

accesibilidad, como dice Pozo, "motivar es cambiar las prioridades de una persona" (Fiad & Galarza, 2015).

2.2 Metodología

Considerando el diseño tecno-pedagógico de (Alzate R., Bustamante T., & Monsalve D., 2008), y características que debe contener el MEC, para garantizar un desarrollo óptimo en cada uno de los objetivos propuestos, se plantea dividir la metodología en dos fases:

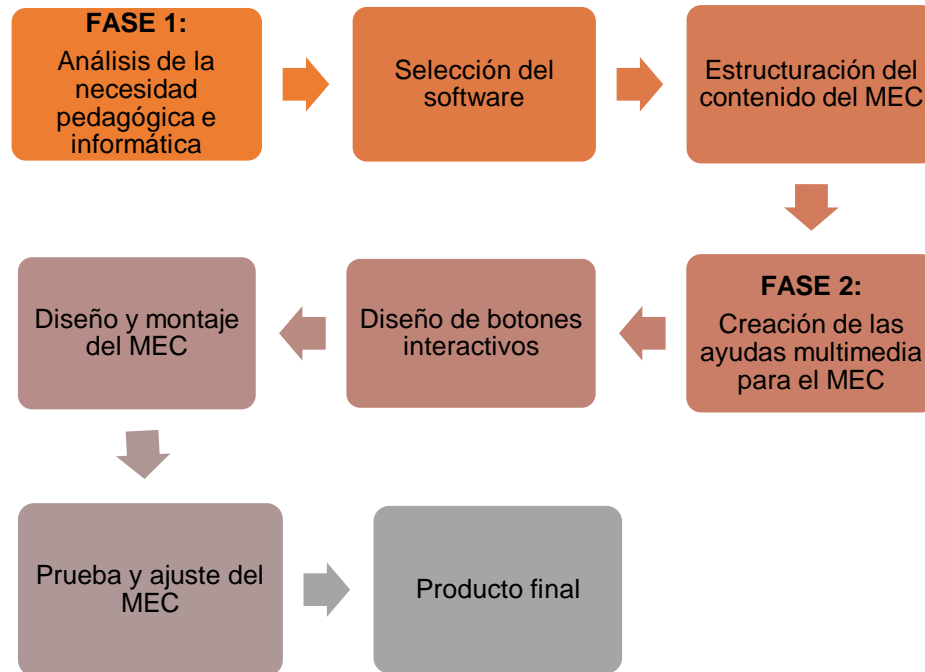
Fase 1: contiene las necesidades pedagógicas del MEC, donde se hace el análisis de la necesidad, selección del software y estructuración o guion del contenido del MEC.

Fase 2: contiene la creación y diseño de la parte técnica, donde incluye la creación de las ayudas multimedia para el MEC, diseño de botones interactivos, montaje del MEC finalizando con la prueba y ajuste del material.

A continuación, se encuentran esquematizadas las fases propuestas para la metodología (Figura 1.).

Figura 1.

Etapas de la metodología para la creación y montaje del MEC.



2.2.1 Análisis de la necesidad

Dentro del plan de estudios de la escuela de Ingeniería Química se cuenta con una materia llamada laboratorio de procesos I, en ella se ponen en práctica los conocimientos teóricos aprendidos en cursos anteriores como fenómenos de transporte, termodinámica y manejo de fluidos y sólidos; por este motivo se toman los conocimientos adquiridos, se recopilan nuevos y se crea este proyecto el cual hace énfasis en el equipo: evaporador de termosifón vertical explicando sus partes, funcionamiento y fenómenos presentes, de forma didáctica, clara y sencilla.

2.2.2 Selección del software

Para la realización de la MEC, primero se hizo una búsqueda detallada de software usados como herramientas educativas, los cuales permiten la creación de un contenido didáctico e interactivo y que a su vez son de manejo sencillo.

Tabla 1.

Listado de softwares usados para la creación de la MEC.

PROGRAMA	DESCRIPCION
Genially	Esta plataforma es la base para crear la presentación del MEC, posee diferentes plantillas, botones interactivos, también permite subir imágenes, enlaces y videos propios.
Edraw max	Este programa permite la creación de diagramas de flujo, planos de plantas, organigramas entre otros; este programa fue usado para facilitar la creación de la imagen animada del equipo de laboratorio.
Filmora 9	Este programa se usa para crear videos, posee animaciones y elementos para agregar a la presentación, así como también permite realizar ajustes a los audios que se incluyen.
Goncorq	Esta aplicación permite crear mapas mentales y tarjetas didácticas; esta aplicación fue usada para la el evaporador y condensador.

2.2.3 Estructuración del contenido del MEC

CAPITULO 1. Presentación del equipo de laboratorio

El objetivo de este capítulo es dar una vista rápida del equipo de laboratorio a los estudiantes con el fin de que se familiarice y luego en los siguientes capítulos conocer más a fondo cada parte del equipo, vea Anexo A.1.

CAPITULO 2. Conceptualización

En este capítulo se proporciona a los estudiantes los conceptos básicos de transferencia de masa y energía, además del uso de diferentes ecuaciones para el cálculo de propiedades en las soluciones; indispensables para comprender el funcionamiento del equipo, vea Anexo A.2.

2.1. Balance de masa.

2.2. Balance de energía.

2.3. Coeficiente global de transferencia de calor (U).

2.4 Ecuación de diseño del intercambiador de calor.

2.5 Grados Brix.

2.6 Ecuación para calcular la densidad de una solución.

2.7 Ecuación para calcular el Cp de una solución.

CAPITULO 3. Evaporador

Un evaporador es un intercambiador de calor diseñado para suministrar calor latente de vaporización a un fluido, sabiendo esto; en este capítulo se enseña cada fenómeno esencial que

posee el evaporador, además se proporcionan las suposiciones del equipo y las ecuaciones útiles para cálculos fundamentales a la hora de conocer la eficiencia del equipo, la relación de recirculación, vea Anexo A.3.

3.1. Geometría del evaporador

3.2. Relaciones de equilibrio líquido - vapor

3.3. Balance de energía mecánica

3.4. Relación de recirculación

3.5. Economía

CAPITULO 4. Hidrodinámica

En este capítulo se conocerá, como se mueve el fluido de trabajo dentro del evaporador conociendo el efecto termosifón y los cálculos necesarios para realizar un dimensionamiento a través de las propiedades del fluido estudiando el proceso sensible y el proceso donde coexisten la fase líquida y vapor, vea Anexo A.4.

4.1. Calentamiento sensible

4.2. Zona de dos fases en flujo vertical

4.2.1. Flujo de burbuja vertical

4.2.2. Flujo de paquetes vertical

4.2.3. Flujo transición vertical

4.2.4. Flujo de rocío vertical

4.3. Cálculo de holdups[§] para flujo vertical

CAPITULO 5. Condensador

El condensador es un intercambiador de calor tubular donde se intercambia calor latente este permite que se dé el cambio de fase, en este capítulo aprenderemos más sobre la descripción del intercambio térmico al interior del equipo, sus suposiciones para el correcto trabajo y su eficiencia, vea Anexo A.5.

5.1. Geometría del condensador

5.2. Eficiencia del condensador

CAPITULO 6. Accesorios del equipo

Dentro del equipo evaporador de termosifón vertical existen una serie de accesorios, los cuales serán explicados en este capítulo con el fin de que el estudiante afiance más su conocimiento acerca de ellos ya que son importantes para su funcionamiento, vea Anexo A.6.

6.1. Termocupla

6.2. Válvulas

6.3. Trampa de vapor tipo disco

6.4. Manómetro

6.5. Rotámetro

[§] El holdup es la fracción de un elemento de volumen ocupado en cualquier instante por una fase líquida o gaseosa (Mora Vargas, 1994)

6.6. Platinas de disco

2.2.4 Creación de las ayudas multimedia para el MEC

La finalidad del MEC es facilitar el manejo y comprensión de cada uno de los conceptos necesarios para una mejor apropiación del equipo de laboratorio de la mano con una interfaz agradable e interactiva. Se propone realizar esto por medio del software Genially, en el cual se crea una presentación con múltiples ayudas multimedia, como gif, videos, imágenes, diagramas, mapas mentales; donde algunas de estas ayudas fueron elaboradas por medio de programas como Edraw max, Filmora 9 y Goncorq; las cuales permiten conocer la información de una forma más sencilla. En las siguientes figuras se encuentran ejemplos de las ayudas multimedia creadas para el MEC.

Figura 2.

Gif del equipo de laboratorio de procesos



Figura 3.

Video de la presentación del equipo.

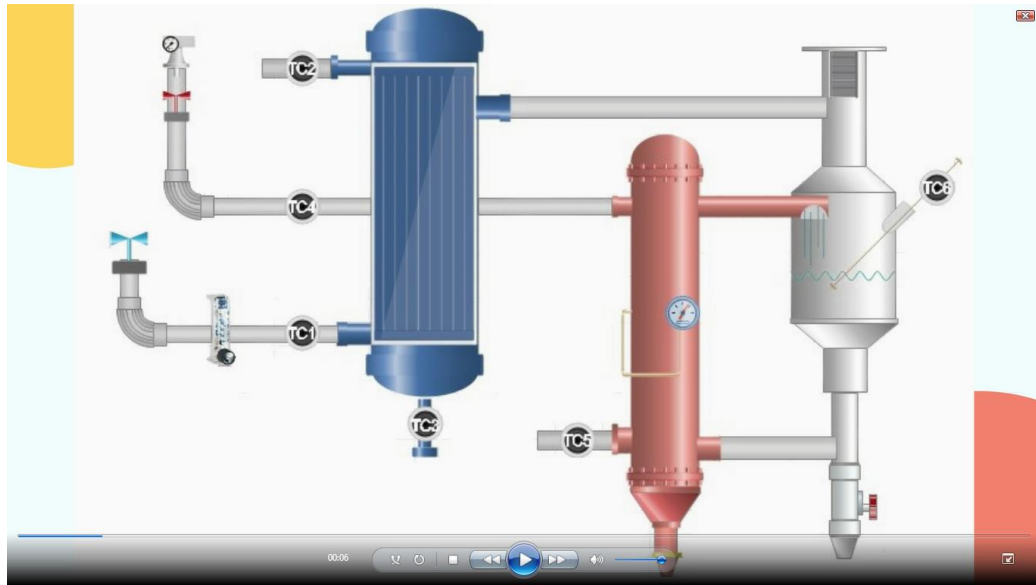


Figura 4.

Mapa mental de tipos de condensadores.



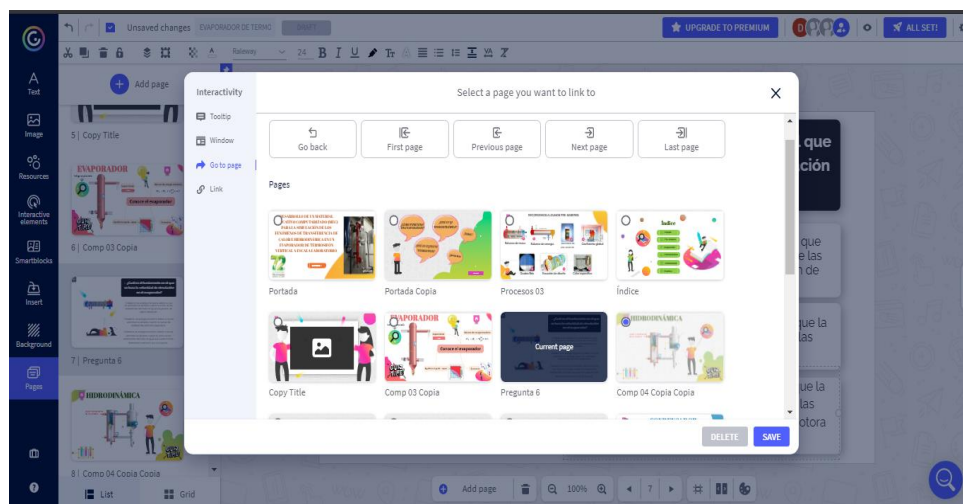
Figura 5.

Imagen borrador capítulo hidrodinámica.



2.2.5 Diseño de botones interactivos

Para la creación del MEC el programa Genially dispone de botones interactivos que facilitan el ingreso de información y vínculos en cada página, permitiendo agregar ventanas con información, enlaces que redireccionan a páginas web, opción de cambiar de página y una descripción emergente con información, estas funciones se pueden adicionar en imágenes, textos, recursos y elementos.

Figura 6.*Descripción emergente.***Figura 7.***Visualización de la acción para cambiar de página.*

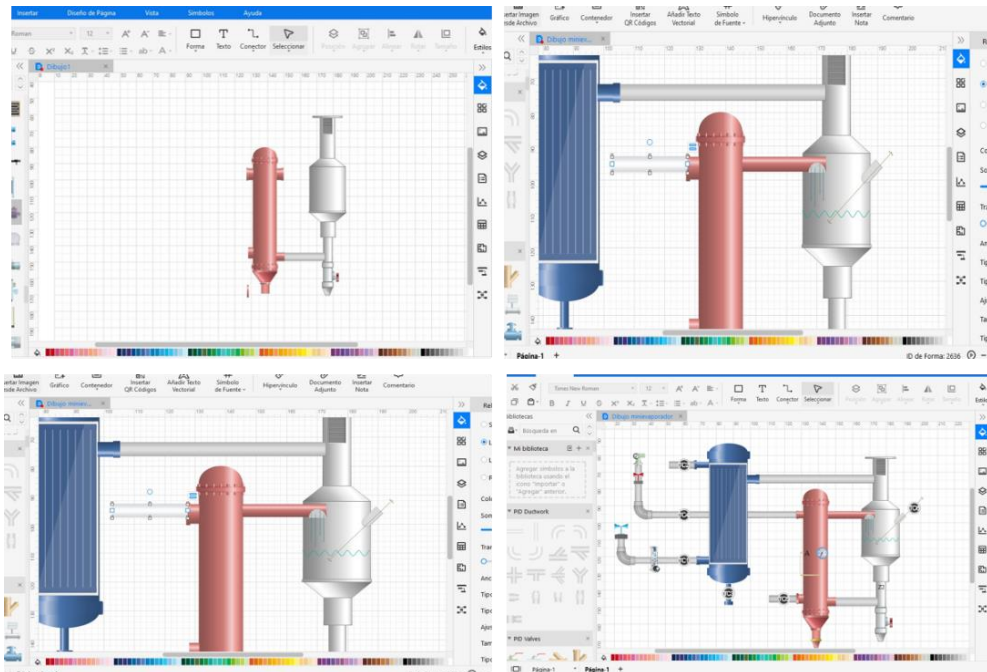
2.2.6 Diseño y montaje del MEC

Para el diseño y montaje del MEC se tuvieron en cuenta los siguientes aspectos:

- Contenido teórico: Para este aspecto se realizó una extensa revisión bibliográfica, la cual se fue depurando con el fin de que la información suministrada al estudiante fuese lo más clara y completa posible. Una vez se obtuvo la información se organizó de forma tal que tuviera una secuencia lógica del funcionamiento del equipo y los fenómenos presentes en el.
- Figuras y animaciones: Teniendo ya definido el contenido teórico de cada capítulo, se continuó con la creación y adición de figuras e imágenes para permitir una mejor visualización del contenido teórico dentro del programa. Por otro lado, se añadieron animaciones con ayuda del mismo software Genially con el propósito de generar una interfaz más agradable e interactiva; la selección de todas las figuras y animaciones se realizó bajo el criterio de incidir positivamente en el estudiante.

Figura 8.

Secuencia de creación de la imagen del equipo de laboratorio en Edraw max.



- **Enlaces:** este aspecto se adicionó dentro de cada capítulo; se agregaron enlaces en los cuales el estudiante puede visitar y profundizar más cada tema, entre los contenidos se encuentran, textos, artículos y vínculos a páginas web.
- **Quiz:** el MEC contiene unas preguntas llamadas quiz time las cuales ayudaran a comprobar que el estudiante si está leyendo y comprendiendo el contenido ya que si el da una respuesta errada no podrá continuar con la visualización del mismo y deberá devolverse a leer nuevamente el capítulo.

Montaje: una vez se tienen todos los elementos, ayudas multimedia diseñadas y organizadas, se procede a diseñar la interfaz del MEC; se diseñó el índice el cual presenta el contenido del mismo; a su vez cada capítulo posee elementos interactivos los cuales facilitan la navegación entre ventanas.

El diseño de la interfaz es uno de los pasos esenciales para el triunfo del MEC, ya que debe ser sencilla, agradable y de fácil manejo, teniendo en cuenta esto se diseñaron las siguientes ventanas, considerando la distribución planteada anteriormente para el MEC.

En la figura 9 se presenta la página de inicio del MEC, la cual posee un gif del equipo de laboratorio, el logo de la Universidad Industrial de Santander, el título de la práctica de laboratorio y el botón de “empezar” para visualizar el contenido.

Figura 9.

Página inicio del MEC.



En la figura 10 se encuentra el índice del MEC, aquí se observan los botones interactivos por los cuales se puede acceder a cada uno de los capítulos correspondientes a la metodología planteada.

Figura 10.

Índice del MEC.



En la figura 11 y 12 se puede visualizar dos ejemplos de los capítulos creados para el MEC. En la figura 11 se observa una imagen del equipo, aquí se agregaron botones en forma de lupa los cuales indican tanto el accesorio como su función al dar clic sobre ellos y en la figura 12 se observa la secuencia para el correcto desarrollo de la práctica.

Figura 11.

Imagen del equipo indicando sus accesorios.

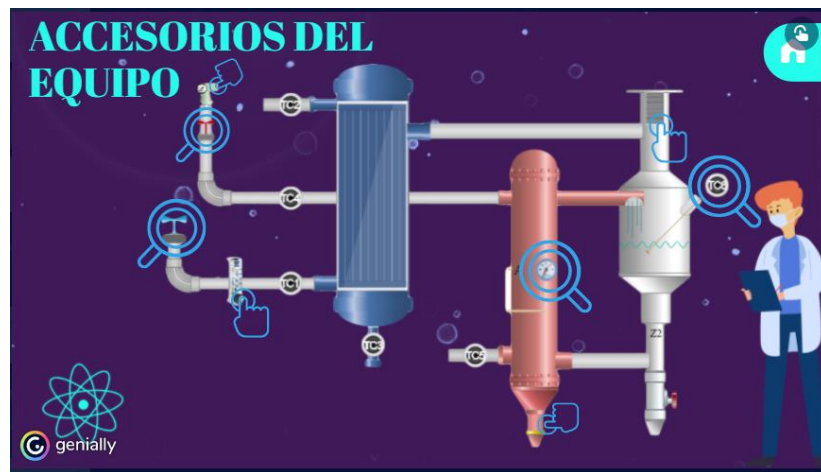


Figura 12.

Secuencia desarrollo de la práctica.



2.2.7 Prueba y ajuste del MEC

Al finalizar el montaje del MEC, se realizó la pre-visualización de toda la herramienta, allí se corroboró que todos los contenidos interactivos, enlaces, videos y animaciones presentes en él, estuvieran funcionando correctamente, corrigiendo algunos errores encontrados en la prueba. Luego de realizar la pre-visualización del MEC, se solicitó al director del proyecto, el cual ya ha sido encargado de la materia de laboratorio de procesos, que revisara el MEC, allí él exploró el contenido de la herramienta y su funcionalidad pedagógica e interactiva. De acuerdo con lo socializado por profesor después de revisar el MEC, se realizaron solo correcciones de forma en la herramienta como: adición de indicaciones para responder las preguntas del quiz time, referencias y algunas imágenes del capítulo de conceptualización.

2.3 Resultados

El contenido teórico del MEC es fácil de comprender, ya que fue organizado de forma secuencial para que el estudiante pueda reforzar el conocimiento ya adquirido y al mismo tiempo conocer cada parte del equipo de laboratorio de forma clara y precisa; teniendo en cuenta que el MEC suministra un ambiente interactivo y agradable para el aprendizaje del estudiante.

Con relación al diseño gráfico del MEC, el estudiante podrá visualizar cada una de las páginas que se encuentran dentro de la herramienta de forma práctica, ya que su composición grafica es llamativa, el diseño de los botones es dinámico y sencillo; además la presentación de la interfaz es agradable para el estudiante durante todo el uso de la herramienta.

La funcionalidad del MEC es eficaz, puesto que la navegación dentro de la herramienta es sencilla, permitiendo al estudiante apropiarse de todo el contenido, ya que posee botones los cuales

orientan como avanzar dentro de la misma; además en la parte superior derecha se encuentra un ícono en forma de mano que indica donde se debe hacer clic dentro de cada página, para que el estudiante no se pierda de ninguna explicación.

3. Conclusiones

- El material educativo computarizado (MEC), creado para la práctica del evaporador de termosifón vertical del laboratorio de procesos I, es una herramienta con la cual los estudiantes de la escuela de ingeniería química – UIS, pueden apropiarse del equipo y sus fenómenos de transferencia de calor e hidrodinámica de forma interactiva, esto antes de realizar la práctica de laboratorio de tal forma que el contenido sea mejor asimilado por parte del estudiante, ya que posee la conceptualización, explicación de cada parte del equipo, sus accesorios y referencias bibliográficas.
- Se realizó una rigurosa búsqueda bibliográfica con el fin de proporcionar a los estudiantes el más acertado fundamento teórico en torno a los fenómenos de transferencia de calor, así como el mejor acercamiento al movimiento del fluido dentro del evaporador que recibe el nombre de hidrodinámica, estos presentes dentro de un evaporador de termosifón vertical.
- En el presente trabajo se creó y desarrollo un software computarizado interactivo en conjunto con las TICs para la operación de un termosifón vertical como soporte para el proceso de enseñanza del mismo, la metodología aplicada permitió un buen diseño del material educativo, el cual genera una excelente ayuda dentro del laboratorio

para la mejor comprensión de la teoría y descripción del funcionamiento del equipo, navegando libremente por todo el contenido por medio de botones interactivos los cuales permiten un fácil manejo de la herramienta.

4. Recomendaciones

- Se sugiere a la escuela de ingeniería química – UIS, crear una plataforma propia donde se puedan adicionar estas herramientas interactivas que se vienen desarrollando, con el fin de que el estudiante se dirijan allí y puedan apropiarse de estas ayudas.
- Se recomienda al docente de la asignatura de laboratorio de procesos I, que dé a conocer esta herramienta interactiva a los estudiantes y se apropien de ella, siendo un requisito para que el estudiante pueda realizar la práctica.

Referencias Bibliográficas

- Álvarez Rafael, Liendo Lorena, Vargas Juan, L. de R. A. (2009). Estudio de la coalescencia de burbujas en sistemas electrolíticos. Retrieved January 13, 2021, from http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0798-40652009000300003
- Alzate R., H. F., Bustamante T., C. A., & Monsalve D., E. A. (2008). *Diseño de un material educativo computarizado para la comprensión e interpretación de los componentes del caudal ecológico y la gestión integral del río Quindío*. 86–101.
- Angarita, R., Duarte, J., & Fernández, F. (2018). Desarrollo de un MEC para la creación de cultura ciudadana sobre el uso del recurso hídrico en estudiantes de educación básica. *Revista Espacios*, 39(15). Retrieved from <http://www.revistaespacios.com/a18v39n15/a18v39n15p19.pdf>
- Arian Control & Instrumentation. (2013). Tipos de termocupla. *Arian S.A Santiago de Chile*, 10. Retrieved from <http://www.arian.cl/downloads/nt-002.pdf>
- Cabanzón, J. (2018). *Design and Analysis of a Heat Exchanger*. 73.
- CAIBE YANZAPANTA, F. M. (2015). *Diseño y construcción de un sistema de transporte de fluidos para la medición de caudales (Rotámetro)*.
- Çengel, Y. A., & Cimbala, J. M. (n.d.). *Mecánica de fluidos*.
- Cengel, Y. A., & Ghajar, A. J. (2011). TRANSFERENCIA DE CALOR Y MASA fundamentos y aplicaciones. *Mc Graw Hill*, 93.
- Cómo Trabaja una Trampa de Disco: Una Mirada a su Mecanismo y sus Méritos | TLV - Compañía

Especialista en Vapor (América Latina). (n.d.). Retrieved December 26, 2020, from <https://www.tlv.com/global/LA/steam-theory/how-disc-traps-work.html>

Díaz Pineda, J. (2017). *Evaluación de la operación del evaporador de múltiple efecto empleado en el procesamiento de tomates en el Combinado Industrial “Héroes de Girón” Universidad de Matanzas Facultad de Ciencias Técnicas Departamento de Química e Ingeniería Química Trabajo*. (April 2020).

FESTO. (2018). *Válvulas de estrangulación*. 11. Retrieved from https://www.festo.com/cat/en-gb_gb/data/doc_ES/PDF/ES/GRLO-VFFS_ES.PDF%0A%0A

Fiad, S. B., & Galarza, O. D. (2015). El laboratorio virtual como estrategia para el proceso de enseñanza-aprendizaje del concepto de mol. *Formacion Universitaria*, 8(4), 3–14. <https://doi.org/10.4067/S0718-50062015000400002>

Friedrich, F. E., & Álvarez, F. J. . (2016). *La conservación de la energía en los fluidos: hidrodinámica, hidrostática y termodinámica*. 25. Retrieved from https://riull.ull.es/xmlui/bitstream/handle/915/5868/La_conservacion_de_la_energia_en_los_fluidos__hidrodinamica__hidrostatica_y_termodinamica.__F._Jarabo_Friedrich__F.J._Garcia_Alvarez__N._Elortegui_Escartin.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Incropera, F. P., & DeWitt, D. P. (1999). INCROPERA Transferencia de calor.pdf. *Fundamentos de Transferencia de Calor*, pp. 2–8.

Lopez Santander, M. B. (2018). “*Diseño del proceso industrial para la obtención de alcohol a partir de Eugenia Stipitata*.”

McCabe, W. L., Smith, J. C., & Harriott, P. (1993). Scilab Code for unit operations of chemical

- engineering. In *Education* (Vol. 5). Retrieved from <http://scilab.in/files/textbooks/PrashantDave/McCabe.pdf>
- Mendizabal, G. D., L., M., & C, O. (2005). *Válvulas y accesorios*. 2005, 10. Retrieved from <https://es.slideshare.net/n.ando/vlvulas-y-accesorios>
- Mora Vargas, S. P. (1994). Simulación de los procesos de transferencia de calor e hidrodinámica en un evaporador de termosifón vertical. *Universidad Industrial de Santander*, 132.
- Orkiszewski, J. (1967). Predicting Two-Phase Pressure Drops in Vertical Pipe. *Journal of Petroleum Technology*, 19(06), 829–838. <https://doi.org/10.2118/1546-pa>
- Pere Marquès, G. (2020). *Innovación educativa con las TIC: infraestructuras, entornos de trabajo, recursos multimedia, modelos didácticos, competencias TIC*. 2007, 1–19.
- Ríos, L. G. (2011). Determining the Enthalpy of Vaporization of Water. *Scientia et Technica*, (49), 163–166.
- Rojas Gonzalez, A. F. (2012). *Fundamentos de procesos químicos*.
- Salinas Ibañez, J. (2008). *Innovacion educativa y uso de las TIC*.
- Tamayo, E. T., Medianeja, Y. R., & Leyva, E. G. (2014). *Coeficientes de transferencia de calor experimental para el enfriamiento de licor en intercambiadores de placas Experimental heat transfer coefficients for the liquor cooling in plate heat exchanger Métodos y Materiales*. 17(1), 68–77.
- Valiente Barderas, A. (2013). *Ingeniería del calor*. 141. Retrieved from <https://librosdrvaliente.files.wordpress.com/2015/09/ingenierc3ada-de-calor-dr-antonio-valiente.pdf>

Wahid, H., Ahmad, S., Nor, M. A. M., & Rashid, M. A. (2017). Procesos Transf.Erencia De Calor.

Jurnal Ekonomi Malaysia, 51(2), 39–54. Retrieved from

https://thunderbooks.files.wordpress.com/2009/06/procesos_de_transferencia_de_calor_-_kern__31_ed_.pdf

Zavaleta, R. (2011). Preparación de jarabes de sacarosa mediante mediciones volumétricas

Sucrose syrup preparation by volumetric measurements. *Acta Nova*, 5, 1683–0768. Retrieved

from <http://www.scielo.org.bo/pdf/ran/v5n1/v5n1a06.pdf>

Apéndice

Apéndice A.

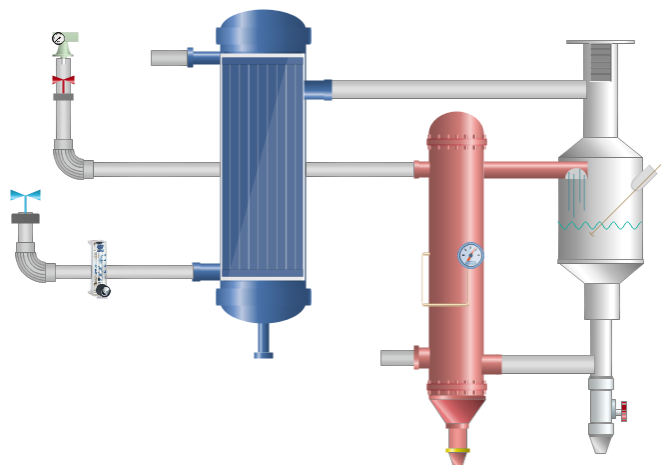
Manual de operación- contenido teórico de los capítulos del MEC

- **A.1. Presentación del equipo de laboratorio**

El evaporador de termosifón vertical del laboratorio de procesos I consta de tres partes fundamentales: el evaporador, cámara de vapor y un condensador.

Figura 13.

Equipo de laboratorio.



El evaporador vertical es un intercambiador de tubo y coraza fabricado en acero inoxidable; el fluido de proceso circula naturalmente por el tubo siendo este de efecto simple, y el vapor de calentamiento fluye en contra corriente por la coraza del evaporador.

Cámara de vapor cilíndrica fabricada con vidrio Pyrex, la cual posee una trampa de vapor en su parte superior, el vapor dentro de ella sube para darse paso al condensador a través de una tubería aislada en fibra de vidrio.

Por último, el condensador es un intercambiador de calor 1-1 convencional fabricado en acero inoxidable, consta de 7 tubos distribuidos en arreglo triangular por los cuales fluye el vapor proveniente de la cámara de vapor y por la coraza fluye agua de enfriamiento en contracorriente.

- **A.2. Conceptos básicos**

2.1. Balance de masa (Cengel & Ghajar, 2011).

$$(\dot{m})_e - (\dot{m})_s + (\dot{m})_{genera} = \frac{d(m)}{dt} \quad (1)$$

Dónde: m: Masa del fluido de trabajo [Lb]

t: tiempo de operación [s]

2.2. Balance de energía (Cengel & Ghajar, 2011).

$$(\dot{m}H)_{Le} - (\dot{m}H)_{Ls} + (\dot{m}H)_{Lgenera} = \frac{d(\dot{m}U)}{dt} \quad (2)$$

Dónde: H: Entalpia [BTU/Lb]

U: Energía interna [BTU/Lb]

2.3. Coeficiente global de transferencia de calor (U).

Es el inverso de la resistencia global a la transferencia de calor entre el vapor condensante y el líquido en ebullición, es decir, la suma de cinco resistencias las cuales son: la resistencia de la película de vapor condensante; la resistencia de las dos costras, una en el interior y otra en el exterior del tubo; la resistencia de la pared del tubo; y la resistencia del líquido hirviente (Tamayo, Medianeja, & Leyva, 2014).

2.4. Ecuación de diseño del intercambiador de calor (Cengel & Ghajar, 2011).

$$Q = (U)(A)(\Delta T_{ML}) \quad (3)$$

Dónde: Q: Calor transferido en el intercambiador de calor [BTU/h]

U: Coeficiente global de transferencia de calor [BTU/h ft² °F]

A: Área de transferencia de calor [ft²]

ΔT_{LM} : Media logarítmica de la diferencia de temperatura [°F]

Teniendo en cuenta que la diferencia de temperatura en la media logarítmica en evaporador es sencillamente la diferencia entre la temperatura de vapor de agua y la temperatura de vapor de la solución de trabajo (Mora Vargas, 1994).

Por otro lado para hallar la diferencia de temperaturas media logarítmica en el condensador se debe asumir en primer lugar, que los calores específicos no varían con la temperatura y que los coeficientes de transferencia de calor son constantes a través del intercambiador, expresandose de la siguiente manera (Cengel & Ghajar, 2011):

$$\Delta T_{ml} = \frac{(T_s - T_1) - (T_s - T_2)}{\ln\left(\frac{T_s - T_1}{T_s - T_2}\right)} \quad (4)$$

Donde: T_s es la temperatura de saturación del fluido (K), T_1 y T_2 son las temperaturas de entrada y salida respectivamente en el condensador del fluido (K).

2.5. Grados Brix.

Los grados Brix (°Bx) miden el cociente total de sacarosa disuelta en un líquido, que en el caso de la práctica del evaporador de termosifón vertical es la solución de sacarosa, dicho de otra forma 25°Brix equivaldrían a 25 g de sacarosa por cada 100 g de líquido. Para medir los grados Brix en el laboratorio se hace uso del refractómetro (Lopez Santander, 2018).

2.6. Ecuación para calcular la densidad de una solución.

Para el cálculo de la densidad deben tenerse en cuenta los grados Brix, los cuales representan la concentración de la solución, es decir, debe tenerse en cuenta el cambio que produce el soluto, en este caso la sacarosa, en las propiedades del solvente. Para determinar la densidad se hace por medio de la siguiente ecuación (Zavaleta, 2011):

$$\rho_{sln} = \left(\frac{\text{Masa de sto}}{\frac{^{\circ}\text{Brix de la sln}}{\rho_{sto}} + \frac{100 - ^{\circ}\text{Brix de la sln}}{\rho_{ste}}} \right) \quad (5)$$

Dónde: ρ_{sln} : densidad de la solución [g/mL]

Masa de soluto (sto) [g]

ρ_{sto} : densidad del soluto [g/mL]

ρ_{ste} : densidad del solvente [g/mL]

Donde, m_0 = masa del picnómetro vacío (kg), m_1 = masa del picnómetro con agua (kg), m_2 = masa del picnómetro con el líquido a investigar (kg) y, por último, ρ_w = densidad del agua a la temperatura experimental (1000 kg/m³).

2.7. Ecuación para calcular el Cp de una solución (McCabe, Smith, & Harriott, 1993).

Para el cálculo del calor específico de la solución se utiliza la siguiente ecuación:

$$Cp_{sln} = 1 - (0.056 * ^{\circ}\text{Brix}) * Cp_{H2O} \quad (6)$$

Donde:

Cp_{sln} = Capacidad calorífica de la solución [kJ/kg°C]

Cp_{H2O} = Capacidad calorífica del agua [kJ/kg°C]

Figura 14.

Vista de los conceptos básicos en el MEC.



- **A.3. Evaporador**

En esta operación la transferencia de calor ocurre cuando el tubo de calor recibe el calor y el fluido de trabajo se evapora; en un termosifón solo una parte del fluido de trabajo se vaporiza y otra sigue permaneciendo líquida retornando al tanque de alimentación, de tal forma que en cada paso del líquido por los tubos solo se evapora una fracción de la carga inicial (Mora Vargas, 1994).

Suposiciones en el evaporador (Mora Vargas, 1994):

- Líquido incompresible, las soluciones de trabajo se consideran puras
- Las pérdidas de calor en las tuberías de entrada y salida del evaporador son despreciables para los cálculos

- Se supone que el condensado abandona el tubo del evaporador a la temperatura de condensación
- La presión en la fase vapor es siempre igual a la presión de vapor del líquido a la temperatura del fluido

3.1. Geometría del evaporador

El evaporador posee las siguientes dimensiones:

Tabla 2.

Dimensiones del interior del evaporador.

	Diámetro interno (cm)	Diámetro externo (cm)
Tubo interno	3,4925	3,81
Tubo externo	4,625	5,08

Tabla 3.*Longitud y material del evaporador.*

Longitud (cm)	Material
55	Acero inoxidable

3.2. Relaciones de equilibrio líquido - vapor.

Sabiendo que vaporizar pocas moles en el evaporador generan un cambio de presión podemos asumir que: la presión en la fase vapor es igual a la presión de vapor del líquido, esto con el fin de hacer más sencillo el cálculo. Para realizar el cálculo de las condiciones de saturación tomamos la ecuación de Antoine (Rojas Gonzalez, 2012), obteniendo la temperatura de saturación del agua a una presión constante del equipo y la presión de saturación se calcula según la ecuación de Wagner (Ríos, 2011) como se indica a continuación:

$$T_{sat} = \frac{B}{A - \ln(P_{sat})} - C \quad (7)$$

Donde: T_{sat} : Temperatura de saturación [K]

P_{sat} : Presión de saturación [KPa]

$$\ln\left(\frac{P_{sat}}{P_c}\right) = \frac{At + Bt^3 + Ct^5}{1-t} \quad (8)$$

Donde : $t = 1 - \frac{T}{T_c}$; $T_c = 647,14 \text{ K}$; $P_c = 22,064 \text{ MPa}$;

$$A = -7,0811; B = -1,2452; C = -4,0662$$

3.3. Balance de energía mecánica

El balance de energía mecánica es el fundamento en el que se basa la velocidad de circulación en el evaporador, esta velocidad se alcanza cuando la suma de las resistencias del fluido en el evaporador es igual a la fuerza motora hidrostática del fluido que se evapora (Mora Vargas, 1994).

$$\Delta E_k + \Delta E_p + \Delta \left(\frac{P}{\rho} \right) v = 0 \quad (9)$$

Considerando: $w=0$, pérdidas por fricción=0, $v=1$, $\rho=\text{cte}$ (Friedrich & Álvarez, 2016)

$$g(z_2 - z_1) + \left(\frac{v_2^2}{2\alpha_2} - \frac{v_1^2}{2\alpha_1} \right) + \frac{p_2 - p_1}{\rho} = 0 \quad (10)$$

Dónde: g : Gravedad [m/s²]

z : Altura [m]

p : Presión [Pa]

ρ : Densidad [kg/m³]

α : Factor de conversión [J/kg]

3.4. Relación de recirculación

Es la relación entre la masa vaporizada y la masa que circula a través del evaporador (Valiente Barderas, 2013).

$$R = \frac{W_1 * \rho_{H2O} - W_2 * \rho_{sl} \ln}{W_1 * \rho_{H2O}} \quad (11)$$

3.5. Economía

La economía es una forma de medir la eficiencia del evaporador, la podemos calcular a partir del cociente entre la masa de vapor generado sobre la masa de vapor consumido proveniente de la caldera (Diaz Pineda, 2017).

$$\text{Economía} = \frac{v}{w} \quad (12)$$

Figura 15.

Vista del contenido del evaporador en el MEC.



- **A.4. Hidrodinámica**

En un evaporador con efecto termosifón la circulación del fluido de proceso se realiza de forma natural, es decir, el fluido tiene la libertad de circular por el equipo mientras lo permita la caída de presión hidrostática entre Z1 Y Z2 (observar figura 2).

Figura 16.

Equipo de laboratorio indicando las alturas para la caída de presión hidrostática.

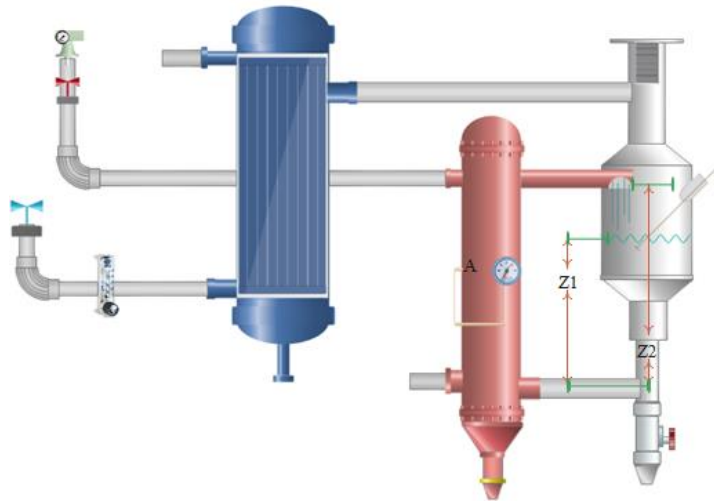


Figura 17.

Vista de la ventana de hidrodinámica en el MEC.



Una vez el líquido entra al evaporador recibe el calor sensible suministrado por el vapor proveniente de la caldera, esto ocurre hasta el punto A, donde la temperatura del líquido es igual a la temperatura de saturación correspondiente a la presión en ese punto. En el punto A la ebullición nucleada provoca la vaporización del líquido que continua a lo largo del tubo, además la formación de burbujas reduce la densidad aparente del líquido en el tope, es decir, el líquido sube y el vapor va hacia el fondo del intercambiador (Mora Vargas, 1994).

Tras entender cómo se mueve el líquido dentro del intercambiador procedemos al cálculo hidrodinámico, siendo el cálculo necesario para realizar un dimensionamiento a través de las propiedades del fluido los cuales se dividen en dos procesos: uno sensible y el otro donde coexisten fase líquida y vapor.

4.1. Calentamiento sensible

Primero se necesita conocer las características de flujo de la solución que entra al evaporador y el flujo de calor que la solución puede recibir durante su paso por el evaporador formuladas por Donald Q. Kern (Wahid, Ahmad, Nor, & Rashid, 2017):

Velocidad del fluido en la tubería de entrada al evaporador

$$V_e = \frac{N_t V_L D^2}{D e^2} \quad (13)$$

Numero de Reynolds para el flujo en la tubería de entrada

$$Re_e = \frac{V_e D_e \rho L_e}{(\mu L_e 3600)} \quad (14)$$

Ecuación de Colebrook

$$\frac{1}{\sqrt{f_e}} = -2 \text{Log} \left[\frac{\epsilon}{3,7D_e} + \frac{2,51}{Re_e \sqrt{f_e}} \right] \quad (15)$$

Caída de presión en la tubería

$$\Delta P_e = \frac{L_e \rho f_e V_e^2}{2g_c D_e} \quad (16)$$

Flujo de calor que puede ceder el vapor de calentamiento

$$q_v = \frac{W_{st} \lambda_{st}}{\pi D L} \quad (17)$$

El cálculo en esta zona se basa en conocer en qué punto termina el calentamiento sensible dando paso a la ebullición por lo tanto a partir de este punto la temperatura del fluido es la de saturación a la presión existente.

Por otro lado la caída de presión en la zona es calculada con la ecuación de Bernoulli, asumiendo que la velocidad del líquido que coexiste con el vapor tiende a ser uniforme (Mora Vargas, 1994).

Temperatura de saturación en el punto donde comienza la ebullición

$$T_{SSC} = T_e + \frac{q \pi D L_{SH}}{3600 C_{pL} W_t} \quad (18)$$

Caída de presión en la zona de calentamiento sensible

$$\Delta P_{SH} = \rho L_{SH} + \frac{f V_1^2 L_{SH} \rho L}{2g_c D} \quad (19)$$

Presión en el punto inicial del evaporador, P_B : calculado con el lado izquierdo de la ecuación

$$P_B - P_A = L_A - B\rho L - \Delta P_e = \Delta P_{SH} + \Delta P_{TP} + \Delta P_S \quad (20)$$

Valor calculado de presión de saturación del punto donde comienza la ebullición

$$P_{SS} = \frac{P_B - \Delta P_{SH}}{144} \quad (21)$$

Valor calculado de la temperatura de saturación del punto donde comienza la ebullición

$$T_{SS} = T_{SAT}(P_{SS}) \quad (22)$$

4.2. Zona de dos fases en flujo vertical

Tomando la ecuación del balance de energía mecánica podemos realizar la aproximación de Oskiszewski (Orkiszewski, 1967) ya que el fórmula ecuaciones para flujo en dos fases, vertical hacia arriba y co-corriente, esto lo realiza por medio de una gran cantidad de datos empíricos y haciendo uso del conocimiento sobre el régimen del flujo.

Comenzamos dividiendo la zona de dos fases en n elementos de volumen según Oskiszewski (Orkiszewski, 1967) con el fin de conocer el régimen de flujo existente en cada uno por ello es necesario definir los siguientes términos:

Temperatura correspondiente a la presión final del elemento

$$T_2 = T_{SAT}(P_2) \quad (23)$$

Presión al final del elemento

$$P_2 = P_1 - \Delta P_A \quad (24)$$

Temperatura promedio del elemento

$$T_M = \frac{T_1 + T_2}{2} \quad (25)$$

Calor suplico al elemento de longitud ΔL

$$\Delta Q = q\pi(\Delta L)D \quad (26)$$

Calor latente a la T_M

$$\lambda = \lambda(t_M) \quad (27)$$

Incremento de calidad en el elemento

$$\Delta X = \frac{\Delta Q}{3600\lambda W_T} \quad (28)$$

La calidad de la mezcla dentro del evaporador permite trabajar con las fases vapor y líquido de la mezcla así:

Calidad del vapor al final del elemento

$$X_2 = X_1 + \Delta X \quad (29)$$

Velocidad superficial del líquido al comienzo del elemento

$$V_{SL1} = \frac{G_T(1-X_1)}{\rho_{L1}} \quad (30)$$

Velocidad superficial del líquido al final del elemento

$$V_{SL2} = \frac{G_T(1-X_2)}{\rho_{L2}} \quad (31)$$

Velocidad superficial del gas al comienzo del elemento

$$V_{SG1} = \frac{G_T X_1}{\rho_{G1}} \quad (32)$$

La velocidad que cada fase tendría en un conducto si fuera la única fase fluyendo se conoce como velocidad superficial (V_{SL} , V_{SG}); por otro lado la velocidad slip es la diferencia entre las velocidades de las fases y el cálculo de la velocidad no slip (V_{ns}) se realiza considerando el flujo en el evaporador (Mora Vargas, 1994).

4.2.1. Flujo de burbuja vertical

Se considera a esta la primera geometría de flujo que se encuentra en la zona de dos fases.

Existe cuando

$$\frac{V_{SG}}{V_{ns}} < N_b \quad (33)$$

Holdup liquido

$$R_L = 0,5 - 0,625 V_{ns} + [(0,5 + 0,625 V_{ns})^2 - 1,25 V_{sg}]^{1/2} \quad (34)$$

Densidad de dos fases

$$\rho_b = R_L \rho_L + (1 - R_L) \rho_G \quad (35)$$

Número de Reynolds

$$Re_b = \frac{\rho_L D V_{SL}}{\mu_L R_L} \quad (36)$$

Gradiente fraccional

$$v_b = \frac{f \rho_l (V_{SL}/R_L)^2}{2G_c D} \quad (37)$$

4.2.2. Flujo de paquetes vertical: En este régimen de fuljo las burbujas coalescen⁵, formando burbujas estables de aproximadamente el mismo tamaño de la tubería.

Existe cuando

$$\frac{V_{SG}}{nsT_s} > N_b \text{ y } N_{gv} < N_s \quad (38)$$

Número de Reynolds

$$Re_b = \frac{\rho_L D V_{SL}}{\mu_L R_L} \quad (39)$$

Parâmetros N_1 y N_2

⁵ La coalescencia es la propiedad de fundirse, es decir, dos gotas de un gas o líquido se fusionan para formar una sola gota; la coalescencia es el fenómeno que se ocasiona cuando se unen las burbujas de aire mientras estas atraviesan el fluido del agua (Álvarez Rafael, Liendo Lorena, Vargas Juan, 2009).

$$N_1 = 0,372 E05 \left(-0,35 + 0,1225 + 0,04931 \frac{V_{ns}}{D^2} \right) \quad (40)$$

$$N_2 = 0,3721 E05 \left(-0,546 + 0,2981 + 0,01849 \frac{V_{ns}}{D^2} \right) \quad (41)$$

Velocidad de crecimiento de las burbujas

$$Si Re_s > N_1, \quad V_r = (1,985 + 4,985E - 05 * Re_s) D^{1/2} \quad (42)$$

$$Si Re_s > N_2, \quad V_r = (3,097 + 4,985E - 05 * Re_s) D^{1/2} \quad (43)$$

$$Si N_1 > Re_s > N_2, \quad V_r = 0,5 \gamma + \left(\frac{\gamma^2 + 13,59 \mu L}{2,42 \rho L D^{1/2}} \right)^{1/2} \quad (44)$$

Pero la relación deslizamiento λ modifica la suposición de que las burbujas son estables, considerando que ambas fases fluyen a diferentes velocidades.

Velocidad superficial del gas al final del elemento

$$V_{SG2} = \frac{G_T X_2}{\rho_{G2}} \quad (45)$$

Velocidad superficial promedio del líquido

$$V_{SL} = \frac{V_{SL1} + V_{SL2}}{2} \quad (46)$$

Velocidad superficial promedio del gas

$$V_{SG} = \frac{V_{SG1} + V_{SG2}}{2} \quad (47)$$

Velocidad <no slip> del flujo en el elemento

$$V_{ns} = V_{SL} + V_{SG} \quad (48)$$

Relación deslizamiento correspondiente al flujo en el elemento

$$\lambda_S = \frac{V_{SL}}{V_{ns}} \quad (49)$$

Deslizamiento al final del elemento

$$\lambda_{S2} = \frac{V_{SL2}}{V_{SL2} + V_{SG2}} \quad (50)$$

Por lo tanto Orkiszewski (Orkiszewski, 1967) define los siguientes parámetros de flujo para determinar el régimen de flujo por medio de comparación entre ellos:

Número de flujo de burbuja

$$N_b = 1,071 - 0,2218 \frac{V_{ns}^2}{D} \quad (51)$$

Número de flujo de paquetes

$$N_s = 50 + 70V_{SL} \left(\frac{\rho L}{\sigma} \right)^{1/4} \quad (52)$$

Número de flujo de rocío

$$N_m = 75 + 138 \left[V_{SL} \left(\frac{\rho L}{\sigma} \right)^{1/4} \right]^{0,75} \quad (53)$$

Número de velocidad del gas

$$N_{gv} = 1,938 V_{sg}^2 \left(\frac{\rho L}{\sigma} \right)^{1/4} \quad (54)$$

Por otro lado, a continuación, encontramos el listado con las ecuaciones que nos permiten determinar la densidad y el gradiente friccional en la zona de dos fases en cada régimen de flujo.

Parámetro γ

$$\gamma = (1,423 + 4,958E05 Re_s) D^{1/2} \quad (55)$$

Parámetro Γ

$$Si V_{ns} < 10, \Gamma = 0,013 \text{Log}(\mu L / 2,42) / D^{1,8} - 0,681 + 0,232 \text{log} V_{ns} - 0,428 \text{Log} D \quad (56)$$

$$Si V_{ns} > 10, \Gamma = 0,045 \text{Log}(\mu L / 2,42) / D^{0,799} - 0,709 - 0,162 \text{log} V_{ns} - 0,888 \text{Log} D \quad (57)$$

Valores límites para Γ

$$Si V_{ns} < 10, \Gamma = -0,065 V_{ns} \quad (58)$$

$$Si V_{ns} > 10, \Gamma = \frac{V_r(G_t - V_{ns})}{[(V_r + V_{ns})(V_r + V_{ns} + 1)]} \quad (59)$$

Densidad de dos fases

$$r_s = \frac{G_t + r L V_r}{V_{ns} + V_r} + \Gamma \rho L \quad (60)$$

Gradiente de presión friccional

$$\tau_s = \left(\frac{f \rho L V_{ns}^2}{2 g_c D} \right) \left(\frac{V_{sL} + V_r}{V_{ns} + V_r} + \Gamma \right) \quad (61)$$

4.2.3. Flujo transición vertical

Existe cuando $N_m > N_{gv} > N_s$ (62)

Parámetro t_1 $t_1 = \frac{N_m - N_{gv}}{N_m - N_s}$ (63)

Densidad de dos fases $\rho_t = t_1 \rho_s + (1 - t_1) \rho_m$ (64)

Gradiente de presión friccional

$$\rho_t = t_1 \rho_s + (1 - t_1) \rho_m \quad (65)$$

4.2.4. Flujo de roció vertical

Continuamos con el cálculo del gradiente de presión del flujo de roció el cual resulta siendo similar al del flujo de burbuja, con unos pequeños cambios primero el termino densidad es densidad no slip y el gradiente friccional como la perdida friccional de presión en un gas.

Existe cuando $N_{gv} > N_s$ (66)

Numero de Reynolds $Re_m = \frac{\rho_G D V_{SG}}{\mu_G}$ (67)

Densidad de dos fases $\rho_m = \lambda_s \rho_L + (1 - \lambda_s) \rho_G$ (68)

Gradiente friccional $\tau_m = \frac{f \rho_G V_{SG}^2}{2 D g_c}$ (69)

Parámetro N_w $N_w = 4,52E - 07 \left(\frac{452,9 V_{SG}}{2,42 \sigma} \right)^2 \left(\frac{\rho_G}{\rho_L} \right)$ (70)

Si $1E-03 \leq \epsilon / D \leq 0,5$

$$N_w > 0,005, \epsilon/D = \left(\frac{0,3859\sigma N_w^{0,302}}{\rho_G V_{SG}^2 D} \right) \quad (71)$$

$$N_w < 0,005, \epsilon/D = \left(\frac{0,07508\sigma}{\rho_G V_{SG}^2 D} \right) \quad (72)$$

Seguimos definiendo el término de aceleración del gradiente de presión del elemento y determinar la caída de presión en la zona de dos fases.

$$\text{Aceleración del fluido} \quad AC = \frac{G_t V_{SG}}{P g_c} \text{ donde } V_{SG} = \frac{G_G}{P G} \quad (73)$$

$$\text{Gradiente total de presión en el elemento} \quad \frac{\partial P}{\partial Z} = - \frac{\tau f + \alpha \rho T P g / g_c}{1 - AC} \quad (74)$$

$$\text{Caída de presión total en el elemento} \quad \Delta P_n = \frac{\partial P}{\partial L} \Delta L \quad (75)$$

$$\text{Caída de presión en la zona de dos fases} \quad \Delta P_{TP} = \sum \Delta P_n \quad (76)$$

$$\text{Caída de presión en el tubo del evaporador} \quad \Delta P_T = \Delta P_{SH} + \Delta P_{TP} \quad (77)$$

4.3. Cálculo de holdups para flujo vertical

El holdup volumétrico in situ es una variable clave para la caracterización del flujo en la zona de dos fases. El holdup es la fracción de un elemento de volumen ocupado en cualquier instante por una fase (R_L y R_G). Duns y Ros (Orkiszewski, 1967) entregan ecuaciones más sencillas las cuales facilitan el uso de la correlación planteada por Hagerdorn & Brown de la mano con los grupos adimensionales de Ros del teorema Pi del Buckingham (Orkiszewski, 1967).

Número adimensional N_d $N_d = 120,9 \left(\frac{\rho_L}{\sigma} \right)^{1/2}$ (78)

Número adimensional N_L $N_L = 0,1573 \left(\frac{\mu_L}{2,42} \right) \left(\frac{1}{\rho_L \sigma^3} \right)^{1/4}$ (79)

Número de velocidad del líquido $N_{LV} = N_{GV} N_L \left(\frac{\rho_L}{\sigma} \right)^{1/4}$ (80)

Parámetro N_{SEC} $N_{SEC} = \frac{N_{GV} N_L^{0,38}}{N_d^{2,14}}$ (81)

Parámetro C_n $Si N_L < 0,01, C_n = 0,0115$ (82)

$Si N_L > 0,002, C_n = 0,00195$ (83)

$$C_n = \exp \left[\frac{-4,895 - 1,0775 \ln N_L - 0,808 (\ln N_L)^2 - 0,1597 (\ln N_L)^3}{-0,01019 (\ln N_L)^4} \right] \quad (84)$$

Parámetro φ $Si N_{SEC} < 0,01, \varphi = 1$ (85)

$Si N_{SEC} > 0,09, \varphi = 1,82$ (86)

$$\varphi = 1 + \exp \left[\frac{6,6598 + 8,8173 \ln N_{SEC} + 3,7693 (\ln N_{SEC})^2}{+0,5359 (\ln N_{SEC})^3} \right] \quad (87)$$

Con el fin de encontrar el holdup necesario para dar el gradiente total de presión se midió el gradiente de presión y luego si fue calculado.

Parámetro N_{hold} $N_{hold} = \left(\frac{N_{LV}}{N_{GV}^{0,575}} \right) \left(\frac{P}{14,65} \right)^{0,1} C_n \left(\frac{10^6}{N_d} \right)$ (88)

Holdup líquido $Si N_{hold} > 4000, R_L = \varphi$ (89)

$$\text{Si } N_{\text{hold}} < 0,1 \quad R_L = 0,02633 \quad (90)$$

$$R_L = \varphi \exp[-3,6372 + 0,8813(\text{Ln}N_{\text{hold}}) - 0,1335(\text{Ln}N_{\text{hold}})^2 + 0,018534(\text{Ln}N_{\text{hold}})^3] \quad (91)$$

Nomenclatura del capítulo

AC: Aceleración	Adimensional.
C _p : Calor específico	BTU/lb°F
D: Diámetro	ft
f: Factor de fricción de Moody	Adimensional.
g: Constante gravitacional	ft/s ²
g _c : Factor de conversión	lbft/ft ² s
G: Velocidad másica	lb/ft ² s
L: Longitud	ft
n: Número de diferenciales de volumen en la zona de dos fases	Adimensional.
N _b , N _s , N _m : Números de flujo burbuja, de paquetes y roció	Adimensional.
N _d , N _L : Números adimensionales	Adimensional.
N _{gv} , N _{lv} : Números de velocidad del gas y del líquido	Adimensional.
N _{hold} , N _{sec} : Parámetros	Adimensional.
P: Presión	lb/in ²

q : Flujo de calor	BTU/hft ²
Q : Calor transferido	BTU/h
Re : Número de Reynolds	Adimensional.
R_L, R_G : Holdup	Adimensional.
T : Temperatura	°F
T_b, T_r : Temperatura de burbuja y de referencia	°F
V_{ns} : Velocidad no-slip del fluido	ft/s
V_{SG}, V_{SL} : Velocidad superficial del vapor y el líquido	ft/s
V_f : Parámetro	Adimensional.
W : Flujo másico	lb/s
ΔP : Caída de presión en cada elemento de volumen	lb/ft ² o lb/in ²
ΔX : Incremento de calidad por elemento	Adimensional.
ϵ : Rugosidad de superficie	ft
γ : Parámetro	Adimensional.
Γ : Parámetro	Adimensional.
λ : Calor latente de vaporización	BTU/lb
λ_s : Relación slip correspondiente al flujo en un elemento	fracción
μ : Viscosidad	lb/ft ^h

π : Constante	Adimensional.
ρ : Densidad	lbf/ft ³
σ : Tensión superficial en el cálculo de h_N	lbf/ft
τ : Gradiente de presión friccional en el elemento de volumen	lbf/ft ³

Subíndices

A: Nivel de solución en la cámara de vapor

B: Burbuja

e: Tubería de entrada al evaporador

L: Líquido

M: Medio, promedio

m: Régimen de flujo de rocío

n: Elemento de volumen de la zona de dos fases

ns: No deslizamiento entre las fases de líquido y vapor

s: Régimen de flujo de paquetes (slug)

SAT: Saturación

SH: Calentamiento sensible

SS: Condición de equilibrio o de saturación

V, G: Vapor

t: total

TP: Dos fases

ST: Lado del vapor de calentamiento

- **A.5. Condensador**

Los condensadores son aquellos equipos que convierten un fluido que está en estado gaseoso (vapor) a su estado líquido por medio de transferencia de calor desde un foco de enfriamiento, que es otro fluido (líquido y gaseoso), con una temperatura menor a una temperatura del vapor a condensar (Cabanzón, 2018). Las condiciones en el interior del condensador son de saturación, es decir, está a la presión de saturación correspondiente a la temperatura de condensación del vapor, esta presión es siempre inferior a la atmosférica, que expresa hablar de vacío (Valiente Barderas, 2013).

Suposiciones en el condensador (Mora Vargas, 1994):

- La inercia y los efectos convectivos son despreciables en el impulso de la capa límite y en la ecuación de energía
- La transferencia de calor a través de la película líquida es solo por conducción, es decir, el término convectivo en la ecuación de energía es despreciable.
- La velocidad del líquido y el vapor es igual en la interface.
- Las fuerzas de fricción y cortes son iguales en la misma interfaz.

5.1. Geometría del condensador

Como se mencionó anteriormente el condensador del equipo evaporador de termosifón vertical está fabricado en acero inoxidable y a continuación se presentan las dimensiones de los tubos y la coraza del equipo.

Tabla 4.

Dimensiones de los tubos del condensador.

Tubos	
Número	7
Diámetro interno (cm)	1,5875
Diámetro externo (cm)	1,905

Tabla 5.

Dimensiones de la coraza del condensador.

Coraza	
Diámetro interno (cm)	8,5725
Diámetro externo (cm)	8,89
Longitud (cm)	60
Material	Acero inoxidable

5.2. Eficiencia del condensador

Se puede definir la eficiencia de un intercambiador de calor como el condensador, como la razón entre la transferencia real de calor para un intercambiador y la transferencia de calor máxima ($q_{m\acute{a}x}$) posible que cede el vapor de la solución en el intercambiador (Incropera & DeWitt, 1999), lo que es igual a:

$$\varepsilon = \frac{q}{q_{m\acute{a}x}} \quad (92)$$

Figura 17.

Vista del contenido del condensador en el MEC.



- **A.6. Accesorios del equipo**

Termocupla: en el equipo contamos con 6 termocuplas ya que son el sensor de temperatura más común utilizado en las diferentes industrias, gracias a su versatilidad y sencillez, siendo la unión en un extremo de dos alambres de distinto material de forma tal que al aplicar temperatura

en dicha unión se genera un voltaje (Arian Control & Instrumentation, 2013) y por consiguiente el valor de la temperatura en el tablero del equipo.

Válvulas: el equipo posee dos tipos de válvulas; la primera es una válvula de estrangulamiento la cual ayuda a regular la velocidad, dicha regulación se consigue mediante la estrangulación apropiada del caudal de aire comprimido (Mendizabal, L., & C, 2005) y una válvula de paso siendo esta la más común ya que nos permite abrir o cerrar herméticamente el paso del fluido de trabajo (FESTO, 2018).

Trampa de vapor tipo disco: el flujo de condensado en el equipo es controlado por un obturador en forma circular o de disco que abre y cierra contra el asiento, es decir, el asiento de la trampa consta de dos anillos concéntricos uno interno y otro externo, el anillo interno ayuda a que el vapor no encuentre un camino corto a la salida y el anillo externo controla la fuga de vapor de la cámara de presión arriba del disco hacia la salida de la trampa (“Cómo Trabaja una Trampa de Disco: Una Mirada a su Mecanismo y sus Méritos | TLV - Compañía Especialista en Vapor (América Latina),” n.d.).

Rotámetro: es un instrumento que nos permite medir el caudal en tuberías de área variable con caída de presión constante, el rotámetro está compuesto de un flotador (indicador) que se mueve libremente dentro de un tubo vertical ligeramente cónico (CAIBE YANZAPANTA, 2015), en el equipo de laboratorio, se encuentra midiendo el caudal de agua de enfriamiento de la corriente que ingresa a la carcasa del condensador.

Manómetro: es un instrumento que se basa en los principios de presión hidrostática en líquidos, su uso común es medir diferencias en la presión tanto pequeñas como moderadas (Çengel & Cmbala, n.d.). El equipo del laboratorio cuenta con dos manómetros metálicos, uno nos permite

conocer la presión a la que ingresa el vapor proveniente de la caldera, el cual podemos regular y el otro nos ayuda a leer la presión a la que se encuentra el vapor dentro del evaporador.

Platinas de disco: la función de esta platina es evitar el paso de sólidos (sacarosa) que suben con el vapor que abandona la cámara de vapor y que ingresa al condensador por la tubería de fibra de vidrio.

Figura 18.

Vista de los accesorios del equipo en el MEC.

